



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS

Las autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del jefe de la División de Educación Continua, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso.

El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona que le entregó las notas. Las inasistencias serán computadas por las autoridades de la División, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo de 80% de asistencias.

Pedimos a los asistentes recoger su constancia el día de la clausura. Estas se retendrán por el periodo de un año, pasado este tiempo la DECFI no se hará responsable de este documento.

Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece la División están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo para que coordinen las opiniones de todos los interesados, constituyendo verdaderos seminarios.

Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes, que se entregará oportunamente.

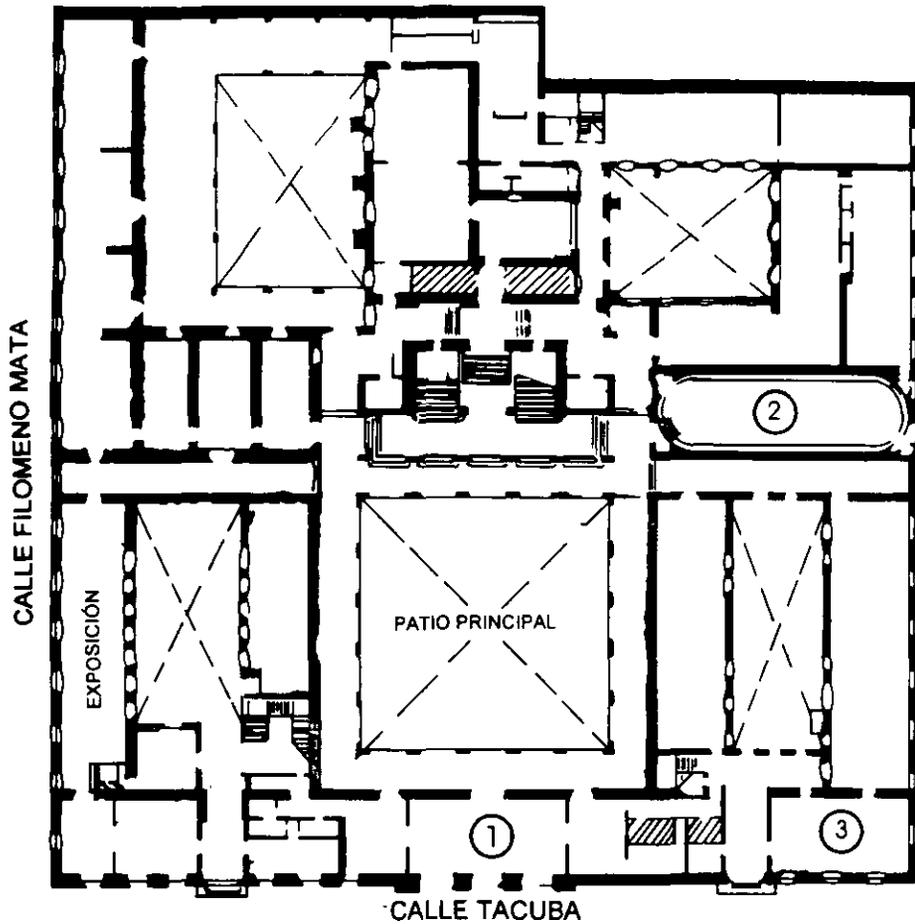
Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de no llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.

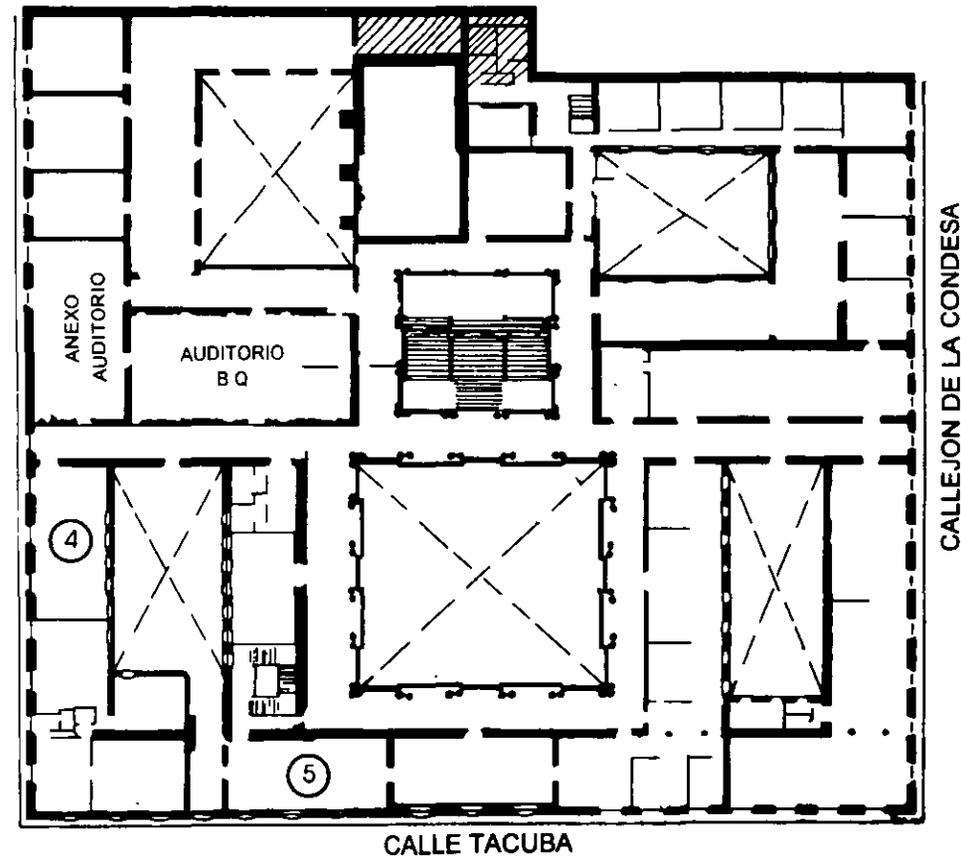
Atentamente

División de Educación Continua.

PALACIO DE MINERIA



PLANTA BAJA



MEZZANINNE



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

TEMA :

**EL HUNDIMIENTO DEL TERRENO EN LA CIUDAD DE MÉXICO Y SUS
IMPLICACIONES EN EL SISTEMA DE DRENAJE**

**ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE – OCTUBRE 1999**

Hundimiento histórico

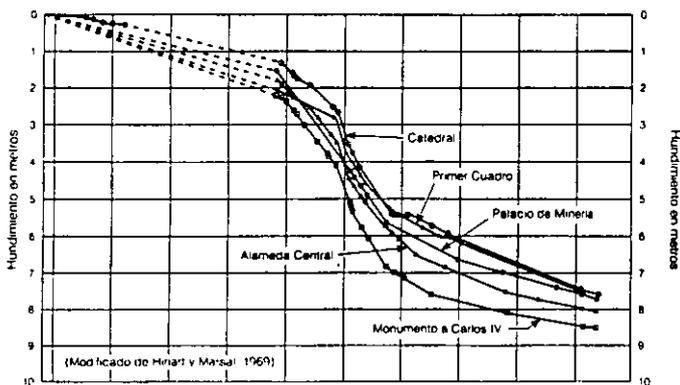
Existen varias citas históricas sobre nivelaciones en la CM (Hiriart y Marsal, 1969). Es particularmente interesante el levantamiento topográfico de Roberto Gayol (Hiriart *et al.*, 1969), realizado a fines del siglo pasado, a partir del cual se ha hecho una reconstrucción de la historia del hundimiento de la CM. El primer dato encontrado en la recopilación efectuada en este trabajo corresponde a A. Humbolt, 1803. Existen también citas del monumento a Enrico Martínez en 1862, del ingeniero Velázquez y Aldasoro en 1876 y del ingeniero Gayol en 1891.

En relación con los hundimientos medidos, hacia el año de 1925 algunos ingenieros sostenían la teoría de que el lago de Texcoco se estaba azolvando. Posteriormente empezó a lucubrase sobre el secado del lago como factor determinante del asentamiento de la CM. Fue Nabor Carrillo quien llamó la atención en 1947 sobre la verdadera causa del proceso, al analizar la influencia de los pozos de bombeo en el hundimiento (Hiriart *et al.*, 1969).

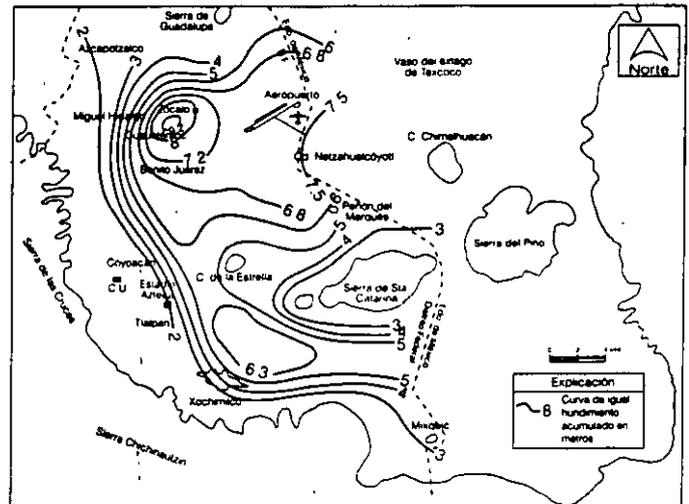
En la ilustración 3 se observa el hundimiento histórico de varios monumentos de la CM de 1900 a 1996, en donde hacen notar que hasta el año de 1968 el hundimiento pasó por tres etapas. En la primera, de 1898 a 1937, el hundimiento es prácticamente lineal de 4 cm por año. La segunda fase del proceso se marca de 1937 a 1947, donde también es de tipo lineal con un hundimiento medio de 14 cm por año. De 1947 a 1996, se marcó ya una tercera etapa en la que se registran velocidades de hundimiento de 40 cm por año o mayores al inicio de la etapa y que tienden a disminuir en forma progresiva hasta llegar al final de la etapa a valores de 10 cm por año.

Datos más recientes del hundimiento fueron registrados a través de un gran número de piezómetros por

3. Hundimientos en varios puntos de la ciudad



4. Hundimiento del terreno, periodo 1891-1994



la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México en las últimas tres décadas. Una nueva época de mediciones se inició por parte del Departamento del Distrito Federal y consiste en nivelaciones cada dos años de 1978 a 1994.

Hundimiento 1891-1994

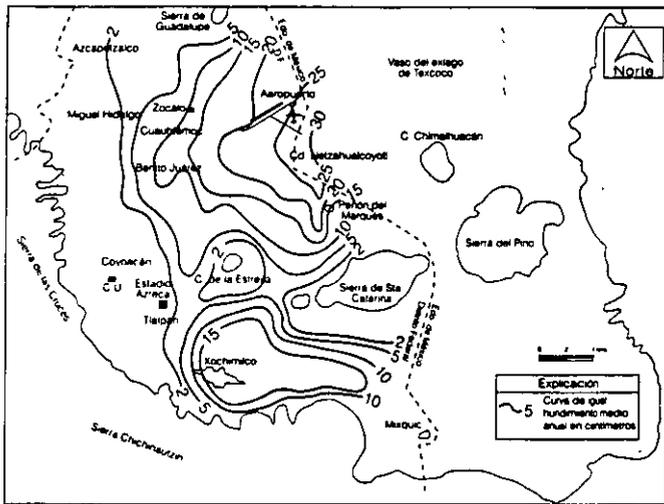
La ilustración 4 muestra el hundimiento acumulado del terreno de 1891 a 1994, observándose máximos de poco más de 10 m en el centro de la CM; hundimientos entre 6 y 7 m del centro hacia el Aeropuerto Internacional de la ciudad de México; hundimientos ligeramente mayores a 6 m en el canal Nacional y en el canal de Chalco, en el tramo donde se encuentra la batería de pozos Tlahuac-Neza; y hundimientos ligeramente mayores a 5 m en el área de Tláhuac.

Los hundimientos tienden a desaparecer hacia las elevaciones topográficas correspondientes a la sierra de las Cruces al poniente, la sierra del Chichinautzin al sur, y el cerro de la Estrella y la sierra de Santa Catalina en el centro-este de la ciudad de México.

Hundimiento 1983-1992

Por ser el periodo con mayor consistencia en nivelaciones diferenciales, la DGCOH-DDF construyó la configuración del hundimiento del terreno para el periodo 1983-1992, la cual se muestra en la ilustración 5, donde se observa que los mayores hundimientos se registraron en la zona oriental, alrededor del aeropuerto internacional, con un promedio de entre 150 y 250 cm; hacia el centro de la ciudad el hundimiento registrado

5. Hundimiento medio anual 1983-1992



en el periodo aquí tratado es de alrededor de 100 cm. En el sur, entre Xochimilco y Tláhuac, los hundimientos han sido de entre 100 y poco más de 150 cm. Se hace notar que esta configuración se construyó con más de 1,500 bancos de nivel que se han venido midiendo cada dos años.

Hundimiento medio anual

Tomando en cuenta que la configuración mencionada en el inciso anterior presenta buen control y amplia distribución para un periodo de nueve años, se consideró que podría tomarse como representativa para la obtención de un hundimiento medio anual.

De esta manera, se dividieron los datos de la configuración entre 9 y se obtuvo el hundimiento medio anual, observándose valores máximos de 30 cm en los límites entre el Distrito Federal y Ciudad Nezahualcóyotl; entre 20 y 25 cm anuales de hundimiento en el Aeropuerto Internacional; alrededor de 10 cm en el centro de la CM, entre 2 y 5 cm en el área de Azcapotzalco, y alrededor de 15 cm en las áreas de Xochimilco y el canal de Chalco, en el tramo donde se ubica la batería de pozos Tláhuac-Neza.

Predicción del hundimiento

Para la predicción de los hundimientos que se registrarán en los próximos años en la zona metropolitana de la CM, se aplicaron varios métodos de cálculo. Éstos correspondieron a un método estadístico lineal; al cálculo de la predicción mediante regresión logarítmica y a la aplicación de un modelo matemático desarrollado por Cruickshank *et al.*, 1979 (DGCOH-DDF, 1992).

Predicción de hundimientos sobre los principales drenes

De las 25 secciones elaboradas, en el presente trabajo se presenta una de ellas a manera de ejemplo que incluye el hundimiento histórico y predicción al año 2000 a lo largo del Gran Canal del Desagüe, desde su inicio en el kilómetro 0 hasta el túnel del Tequisquiác, en el kilómetro 47 (ilustración 6). En los primeros kilómetros del trazo, el hundimiento ha sido considerable y disminuye en dirección al norte. Entre los kilómetros 0 y 18, el hundimiento medio registrado para el periodo 1963-1993 fue de 2 m; del kilómetro 18 al 20 el hundimiento fue menor, con una media de 1 m para el periodo mencionado. En contraste, en la porción norte del canal, entre el kilómetro 20 y el 46, el hundimiento medio fue de 40 centímetros.

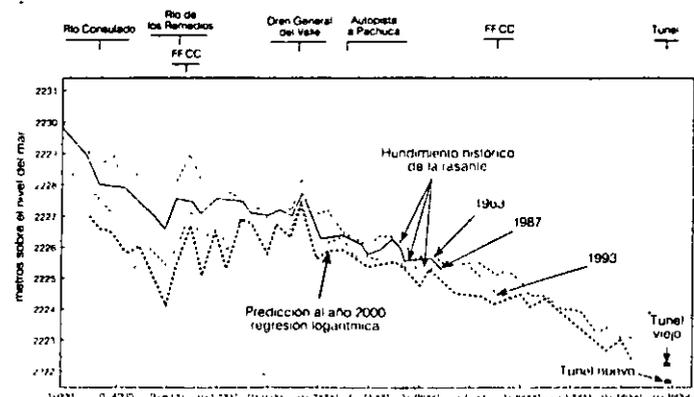
Se obtuvo la predicción del hundimiento a lo largo de los principales drenes. Los resultados más sobresalientes, se marcan en la ilustración 7, observándose que existirán asentamientos diferenciales que deberán remediarse a fin de evitar inundaciones.

Conclusiones

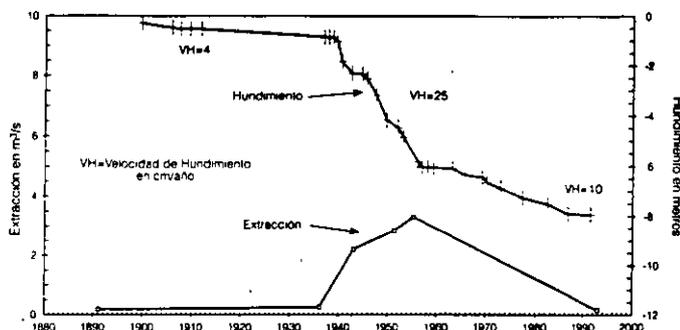
La presencia de antiguos lagos en el Valle de México, originó la acumulación de un sedimento arcilloso que actualmente cubre la parte plana de la zona metropolitana de la CM. Las características de las arcillas y los efectos a que se encuentran sujetas, han sido la causa del hundimiento del terreno.

En secciones geológicas elaboradas a lo largo de los ejes de los principales drenes, se diferencié la capa de arcillas que sobreyace al acuífero, observándose que los hundimientos son proporcionales al espesor de éstas.

6. Hundimiento histórico y predicción sobre el fondo del Gran Canal del Desagüe



1. Extracción de agua y hundimiento en el centro de la ciudad de México



principales drenes de la ciudad, correspondientes a Gran Canal del Desagüe; Dren General del Valle; Río de la Compañía; Río Churubusco, incluyendo brazo derecho y brazo izquierdo; Colector Churubusco; Colector 15; Colector Iztapalapa; Canal Nacional-Canal Chalco; Río San Buenaventura; Río de los Remedios; Colector Miramontes; Canal de Garay; Río Consulado y Colector Central.

Extracción de agua subterránea y hundimientos del terreno

La CM originalmente se abastecía de agua de un gran número de manantiales. Al incrementarse las demandas, se recurrió a la extracción de agua del subsuelo, primeramente con varios cientos de pozos someros (norias) de los que en la literatura se mencionan más de mil para el año de 1886 (DDF, 1982). Posiblemente el hundimiento de la CM se inició en esas fechas. Nivelaciones realizadas de 1891 a 1895 ya registran hundimientos de 5 cm por año. En el periodo de 1936-1944, se perforaron los primeros 93 pozos profundos que provocaron hundimientos en el centro de la CM de hasta 18 centímetros por año. Entre 1938 y 1948, continúa la perforación que va extendiéndose intermitentemente hacia los alrededores del Centro Histórico. El año de 1960 se puede marcar como la frontera en que se inició la disminución de la extracción de agua en el centro de la CM y, a su vez, el inicio de la explotación acuífera en el sur (Xochimilco-Chalco).

En la ilustración 1 se muestra el hundimiento del terreno y la extracción de agua subterránea en el centro de la CM, observándose que esta tuvo su mayor nivel en los años cuarenta y cincuenta, periodo en el que el hundimiento del terreno se aceleró. A partir de los años sesenta, la extracción en el centro de la CM ha disminuido notablemente, sin embargo, el hundimiento ha continuado aunque en menor grado.

En contraste, hacia el sur del Distrito Federal, en el área de Xochimilco-Chalco, la extracción prácticamente se inició en la década de los años sesenta, época a partir de la cual se ha ido incrementado hasta nuestros días. Por lo que respecta al hundimiento, éste se registra en forma notable a partir de la explotación acuífera de los años sesenta (ilustración 2).

Otra observación importante es que la magnitud del hundimiento total del terreno está en relación con el espesor de las arcillas. Se formaron secciones geológicas a lo largo de los drenes estudiados, donde se confirmó la relación entre el hundimiento del terreno y el espesor de las arcillas lacustres.

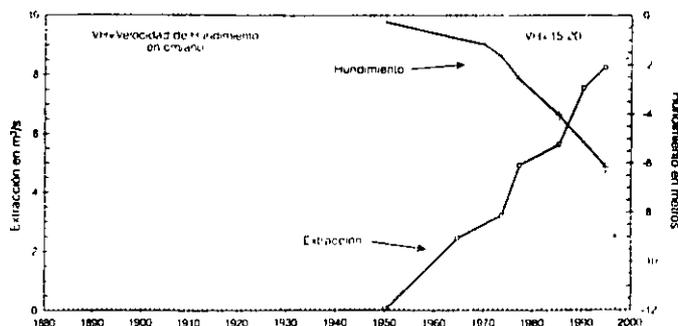
Características de las arcillas

Las arcillas se encuentran cubriendo la parte plana del valle de México y corresponden a sedimentos de los antiguos lagos. Tienen un espesor que fluctúa entre 40 y 60 m en la mayor parte del valle, el cual se acuña hacia las elevaciones topográficas o se incrementa en áreas aisladas.

Las arcillas están saturadas y presentan un nivel freático a los 2 y 3 m de profundidad. Bajo ellas, se encuentra un acuífero que originalmente funcionaba como confinado imprimiendo una presión ascendente a la base de las arcillas. Actualmente, en la mayor parte de la zona metropolitana de la CM la explotación del acuífero ha provocado el abatimiento del nivel piezométrico, modificando el tipo de acuífero de confinado a libre y eliminando la presión hidráulica ascendente que el acuífero ejercía hacia la base de las arcillas.

Diversas pruebas efectuadas a las arcillas más superficiales han permitido calcular un coeficiente de compresibilidad que va de 0.11 a 6 cm²/kg (Cruickshank *et al.*, 1979); una relación de vacíos que varía de 2 a 15 (Cruickshank *et al.*, 1979) y una permeabilidad entre 1 x 10⁻⁷ y 1 x 10⁻⁸ metros por segundo.

2. Extracción de agua y hundimientos en la zona sur del D.F. (Xochimilco-Chalco)



El hundimiento del terreno en la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje

Juan Manuel Lesser Illades

Lesser y Asociados

Miguel Ángel Cortés Pérez

Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica-DDF

La ciudad de México, (CM), históricamente ha sido una de las áreas más densamente pobladas en el mundo. Actualmente, más de veinte millones de habitantes residen en su área metropolitana, donde se utilizan 60 m³/s de agua potable, de los cuales 40 m³/s provienen del acuífero que se encuentra bajo la propia ciudad. La extracción de agua subterránea causa el abatimiento de la superficie piezométrica y produce subsidencia del terreno por la consolidación de las arcillas superficiales. Actualmente, la subsidencia del terreno en la mayor parte de la CM varía de 5 a 10 cm anuales y existen zonas locales con hasta 35 cm/año en el área de Xochimilco. El Departamento del Distrito Federal, a través de su Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH-DDF), desarrolló un plan maestro de drenaje de la ciudad. Una parte importante de dicho programa fue el análisis histórico de la subsidencia del terreno y la simulación de su comportamiento para los próximos años (DGCOH-DDF, 1994). La subsidencia acumulada de 1891 a 1995 alcanza máximos en la parte central de la CM que van de 8 a 10 m; la mayor parte del asentamiento fue generado en el periodo de 1940 a 1960. La explotación de agua subterránea disminuyó en el centro de la CM a partir de 1960 y el ritmo de subsidencia se redujo. Al mismo tiempo que la explotación de agua subterránea se reducía en el centro, se incrementaba en el sur, causando subsidencia del terreno en esta última región. Gran parte del sistema de drenaje de la ciudad es fuertemente impactado por la subsidencia, debido a que modifica el gradiente ocasionando, en algunos casos, su inversión. Se elaboró un análisis histórico y una simulación de la subsidencia, atendiendo especialmente a los 17 principales drenes de la ciudad, contándose entre ellos al Gran Canal, al Río Churubusco y otros. Con los resultados del trabajo, se programan actividades de rehabilitación del sistema de drenaje en los sitios más afectados, a fin de evitar inundaciones que, por el hundimiento del terreno, podrían ser más severas cada año.

Palabras clave: acuitardo, acuífero, abatimiento, nivel freático, superficie piezométrica, compresibilidad, subsidencia.

Introducción

En el subsuelo de la ciudad de México se encuentran una serie de materiales aluviales, constituidos esencialmente por gravas y arenas, intercalados con productos volcánicos, principalmente lavas y escorias. Estos materiales forman el acuífero explotado para el abastecimiento de sus habitantes.

Cubriendo al acuífero, se encuentra una capa de materiales arcillosos que funcionan como acuitardo, están saturados y presentan una permeabilidad muy

baja, del orden de 10^{-7} a 10^{-9} m/s, por lo que permiten un flujo muy lento del agua a través de ella.

La mayor parte del área metropolitana de la CM presenta hundimientos del terreno que varían de una zona a otra de acuerdo con la constitución del suelo. Los hundimientos, al ser diferenciales, provocan diversos problemas, entre ellos la operación por gravedad de la red de drenaje subsuperficial.

La zona estudiada comprendió el área metropolitana de la CM y de los sistemas y áreas tributarias a las salidas del valle. Dentro de esta zona, se marcaron los

Abstract

Lesser J.M. & M.A. Cortés "Land settling in México City and its implications in the drainage system". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish) Vol. XIII. Num. 3, pages 13-18 September-December, 1998.*

Mexico City has been known through history as one of the most densely populated areas in the world. Currently more than 20 million people reside in the metropolitan area and use 60 m³/s of drinking water, of which 40 m³/s are obtained from the aquifer that lies under the city. Groundwater extraction has caused a fall in the piezometric level and settling of the land due to contraction of the surface clays. Land subsidence in Mexico City varies from 5 to 10 cm annually, with isolated regions in Xochimilco where it may reach up to 35 cm a year. The Mexico City government, through the Construction and Hydraulic Operations Department (DDF-DGCOH) developed a master plan for drainage. An important part of this program entailed a historic analysis of land subsidence and a simulation of future behavior (DGCOH-DDF, 1994). The accumulated subsidence from 1891 to 1995 is greatest in downtown Mexico City 8 to 10 meters. Most of this subsidence occurred between 1940 and 1960. The extraction of groundwater in the central metropolitan area was stopped in 1960, and the descent was decreased locally, while extraction increased in the south of the city with increased subsidence in that region. Much of the city's drainage system has been severely affected by subsidence and has had to be regraded on occasions when the slope has been inverted. The historical analysis and subsidence simulation focussed on the 17 largest drains, including the Gran Canal and the Churubusco River. The results have been used to program rehabilitation activities for the most severely affected sections where subsidence has resulted in a greater flooding.

Keywords: Aquitard, aquifer, drawdown, water table, piezometric level, compressibility, land subsidence
Lesser J.M. & M.A. Cortés

Dirección Institucional de autores:

Juan Manuel Lesser Illades, Miguel Ángel Cortés Pérez

Lesser y Asociados, S A. de C.V.
Seminario No. 119
Col. Carretas Querétaro 76050, Qro.
Teléfono (42) 23 33 61



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

TEMA :

PROSPECCIÓN DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS POR HIDROCARBUROS

**ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE – OCTUBRE 1999**

ABSTRACT

Nowadays is common to find underground hydrocarbons (HC) leakages. The main pollutant sources are: leakage from underground storage tanks and pipes, and inadequate management at the maintenance yards of cars, buses, trains and airplanes. After some time storage tanks are corroded; ground movements produce accidental ruptures and dislocations of pipes. At terminals of different kind of transports, HC are used in motors cleaning and were discharged to the closest area after being used. This was not done by negligence, it was the usual method. Nowadays several countries have realized this problem and are working at underground remediation. A light HC like gasoline, infiltrates into the ground and tends to reach the static level. Due to its lower density, gasoline floats over the water. Part of this HC is volatilized and stored at the ground porous or fractures above the static level. When the HC is heavier, it tends to infiltrate and accumulate towards the base of the aquifer, or it is absorbed by molecular retention to ground particles. The volatile portion of a HC is used for detection through shallow monitoring wells. From chromatographic analysis are determined the type of HC and amount of its components. In relation to water quality polluted by HC, benzene is special importance due to its very low permissible limit in drinking water (1 ppb). Benzene is carcinogenic and 35% of it is soluble in water.

INTRODUCCION

Una fuerte transformación en la tecnología y en la vida del hombre, se produjo a partir del cambio de energía de vapor por hidrocarburo, a partir de los años 40s. El manejo y disposición de los hidrocarburos no contemplaba la repercusión de los efectos que causaría al infiltrarse al subsuelo. No fue sino hasta que se empezó a manifestar la contaminación de suelo y el agua, que se inició la cultura de la prevención de la contaminación y saneamiento del subsuelo y los acuíferos.

Por ello, es común encontrar zonas contaminadas por fugas de hidrocarburos. En esta década de los 90s, se inició en México la exploración y saneamiento del subsuelo por hidrocarburos, con las limitantes que la economía del país ha permitido.

PROSPECCION DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS POR HIDROCARBUROS

POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V.
RIO GUADALQUIVIR No. 3
QUERETARO, QRO. 76020
MEXICO

RESUMEN

En nuestros días es común la presencia de hidrocarburos en el subsuelo. Las principales fuentes de contaminación son las fugas que se generan a partir de tanques de almacenamiento y de líneas de conducción, así como en el manejo y disposición inadecuados, principalmente en patios de mantenimiento de automóviles, autobuses, ferrocarriles y aeropuertos. Los tanques y conducciones llegan a ser corroídos; acomodamientos del terreno producen tensiones y dislocaciones de tuberías; roturas accidentales también son frecuentes. En terminales de diferentes medios de transporte, se manejan hidrocarburos para el lavado de motores, los que después de su utilización eran descargados al sitio más próximo. Esta práctica no se realizaba por negligencia; era el método usual. Actualmente, ante el conocimiento del problema, en algunos países se ha tomado conciencia del problema y se trabaja en la limpieza del subsuelo. El hidrocarburo ligero, como puede ser una gasolina, se infiltra al subsuelo y tiende a avanzar hasta el nivel estático, donde por presentar una menor densidad que el agua, flota sobre ella. Parte de este hidrocarburo se volatiliza ocupando espacios porosos o fracturas arriba del nivel estático. Cuando el hidrocarburo es más pesado, tiende a infiltrarse y sedimentarse hacia las partes inferiores del acuífero o permanece absorbido por retención molecular en las partículas del suelo. Una porción del hidrocarburo llega a ser diluida por el agua. La porción volátil es la que se aprovecha para su prospección, la cual se realiza a través de pozos de monitoreo someros. Práctica útil y común es la realización de análisis de cromatografía de gases, a partir de cuyos resultados se identifica el tipo de hidrocarburo y se cuantifican sus componentes. En relación a la calidad del agua contaminada por hidrocarburos, recibe especial atención el benceno, debido al bajo límite permisible para el agua potable, el cual es de 1 ppb; es cancerígeno y el 35% de este compuesto es soluble en el agua. El movimiento del hidrocarburo en el subsuelo está influenciado por el tipo y características del material a través del cual circula. En zonas cubiertas por arcillas, como es el caso de la Ciudad de México, la circulación del contaminante es restringida, en contraste, suelos de alta permeabilidad como es el caso de la Ciudad de Guadalajara, la alta permeabilidad permite la libre circulación del contaminante en el subsuelo.

MOVIMIENTO DEL HIDROCARBURO EN EL SUBSUELO

El movimiento del hidrocarburo en el subsuelo está influenciado por el tipo y características del material a través del cual circula. A manera de ilustración de este punto, a continuación se mencionan las características de los subsuelos de las ciudades de México y Guadalajara, ya que, en la primera de ellas la existencia de arcillas superficiales restringen la contaminación, mientras que en la otra lado la alta permeabilidad del subsuelo permite la libre circulación del contaminante.

La mayor parte del área metropolitana de la Ciudad de México se encuentra asentada sobre sedimentos arcillosos de origen lacustre, cuyo espesor varía de 20 a más de 80 metros. Estas arcillas, presentan una permeabilidad reducida que las hace que funcionen como un acuitardo (material que permite la entrada de agua pero impide o limita su salida por retención molecular). El flujo de agua en el acuitardo de la Ciudad de México es muy reducido; tiene una permeabilidad del orden de 10^{-7} a 10^{-9} m/seg. La presencia de estas arcillas en el subsuelo limita el movimiento del agua y de sus contaminantes, los que circulan en forma muy lenta, retardando la contaminación. Sin embargo, el contacto de zonas impregnadas de hidrocarburos con espacios abiertos en el subsuelo, tales como el drenaje, ductos telefónicos e infraestructura subterránea en general, pueden constituir zonas a través de las cuales pueda circular libremente el hidrocarburo en el subsuelo. También la existencia de agrietamientos llega a permitir el flujo rápido de agua con hidrocarburos.

En contraste, el subsuelo de la Ciudad de Guadalajara esta constituido en sus aproximadamente 20 metros superiores, por arenas pumíticas (llamadas localmente "jales"), las cuales presentan una alta permeabilidad que permite la libre y rápida infiltración de contaminantes al subsuelo. A profundidades de entre 5 y 15 metros se encuentra el nivel freático, sobre el cual se llegan a acumular fugas de hidrocarburos líquidos. La zona no saturada, entre la superficie y el nivel freático, permite la libre circulación de volátiles, haciendo de ésta, una zona de alta vulnerabilidad.

CARACTERISTICAS DE LOS HIDROCARBUROS

Con el objeto de entender el comportamiento de los hidrocarburos en el subsuelo, se presentan algunas de sus características físicas y químicas.

Las gasolinas son una compleja mezcla de hidrocarburos. Pueden ser identificados más de 150 compuestos en una gasolina típica. Estudios efectuados por Fleischer et al (1986), enfocados a los 13 compuestos más comunes de las gasolinas, los dividió en los 4 grupos siguientes: (1) Compuestos que preferentemente son absorbidos por la estructura del suelo; (2) los que se volatilizan rápidamente; (3) los que pueden causar mayor peligro; (4) los que no tienen un comportamiento de migración definido. En la tabla No. 1 se muestra la capacidad de adsorción, volatilización y solubilidad de los componente más comunes de las gasolinas.

Los hidrocarburos ligeros tienden a volatilizarse, mientras que los pesados permanecen entre las partículas del suelo. Los hidrocarburos ligeros son conocidos como LNAPLS (Ligth-Nonaqueos Phase Liquids)

Las gasolinas son utilizadas como combustible para máquinas. Los principales componentes químicos incluyen las cadenas de los alcanos, los cicloalcanos y los aromáticos. La primera cadena corresponde también a parafinas. El porcentaje en volumen de las cadenas mencionadas, son de aproximadamente 51% para los alcanos, 36% para los cicloalcanos y 14% de aromáticos, En la tabla No. 2, se presentan algunos de estos compuestos en ciertas gasolinas.

El diesel es una mezcla de parafinas de cadena rota. Los diferentes tipos de hidrocarburos comerciales, entre ellos la gasolina y el diesel, corresponden a cortes de destilación. La gasolina contiene relativamente grandes concentraciones de aromáticos como benceno y tolueno. En contraste, en el diesel estos aromáticos prácticamente no se encuentra presentes.

Dentro de los productos del petróleo, los aromáticos corresponden al grupo más importante desde el punto de vista ambiental. El benceno, el tolueno y los xilenos, presenta densidades menores a uno. El benceno es el más soluble con hasta 1780 ppm a la temperatura ambiente. El tolueno tiene una solubilidad de 515 ppm a 20° C. Los componentes aromáticos BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos), se consideran los de más alta movilidad.

La identificación de los componentes de los hidrocarburos se realiza mediante un análisis de cromatografía, por medio del cual se llegan a identificar y cuantificar. En la figura 1 se muestra el cromatograma de una mezcla de hidrocarburos, así como los rangos de destilación de ciertos compuestos y en la figura 2 los cromatogramas de algunos productos.

Algunos constituyentes de los hidrocarburos puede ser cancerígenos, en especial el benceno. La norma de calidad para el benceno en agua es de 1 ppb. (parte por billón).

Los hidrocarburos se pueden encontrar en diferentes formas en el subsuelo como son: fase líquida; fase disuelta en el agua y; fase absorbida por el suelo. Estudios recientes han adoptado el BTEX como una forma de expresar a los hidrocarburos.

EXPLORACION Y DELIMITACION DE PLUMAS DE HIDROCARBUROS EN EL SUBSUELO

Parte de los hidrocarburos más comunes se volatiliza, propiedad que se aprovecha para, mediante perforaciones someras, realizar mediciones de los hidrocarburos volátiles existentes y delimitar la zona afectada.

El proceso de exploración se inicia con la perforación de pozos someros, mediante los cuales se realizan mediciones insitu y se obtienen muestras de gas y líquido para análisis de cromatografía. Los resultados de las mediciones permiten delimitar la zona afectada y, cuantificar el volátil y el líquido.

POZOS DE MEDICION O MONITOREO

La perforación de los pozos someros de medición, se puede realizar mediante muestreadores manuales o perforadoras sencillas. Son comunes los rotomartillos accionados por energía eléctrica. El rotomartillo "inca" barras de acero inoxidable generalmente de 3/4" de diámetro. La perforación de este tipo de pozos generalmente alcanza de 2 a 6 metros de profundidad.

Mayores profundidades requieren maquinas perforadoras especiales que incluyen tuberías para perforación y muestreo de suelo, denominadas "augers".

MEDICIONES INSITU

Una vez perforados los pozos someros, se pueden realizar mediciones insitu de hidrocarburos volátiles (HCV), oxígeno, explosividad y bióxido de carbono. Un plano con la distribución de HCV puede mostrar claramente la presencia y

extensión de la zona contaminada. Los valores de explosividad, además de poder indicar la magnitud de la pluma, dan una "idea" del riesgo, aunque su medición puede estar afectada por la ausencia de oxígeno.

En todos los suelos existen bacterias, las que biodegradan a los hidrocarburos provocando: (1) ausencia de oxígeno que es consumido por la acción bacteriana y (2) abundancia de bióxido de carbono, como producto de la biodegradación. Por ello, la medición y mapeo de los parámetros mencionados constituyen otras formas de delimitar las áreas impregnadas por hidrocarburos.

Cuando en las perforaciones de monitoreo se alcanza el nivel freático, se puede medir el espesor de los hidrocarburos líquidos (HCL) que se encuentran flotando sobre el nivel freático.

MUESTREO DE HIDROCARBUROS

El muestreo se puede llevar a cabo sobre muestras de suelo, gas, agua y producto líquido.

MUESTRAS DE SUELOS

Con el objeto de definir la litología del subsuelo y extraer muestras de suelo e hidrocarburos, se perforan pozos con obtención de núcleos de suelo inalterado, a partir de la superficie y hasta la profundidad total del pozo. Los núcleos son enviados al laboratorio para efectuarles un análisis de cromatografía. Existen varias formas de realizar el muestreo de núcleos de suelo. Generalmente para profundidades someras (1-10 m), el muestreo se realiza mediante un tubo de acero inoxidable, el cual incluye una punta cónica truncada; a través de ésta, entra el material arcilloso del suelo al tubo, al ser impulsado el muestreador hacia abajo. El tubo muestreador se encuentra revestido en su interior por un empaque de acetato, dentro del cual se aloja la muestra de material. Al sacar el tubo muestreador, se extrae el empaque de acetato y muestra de suelo, al que se le colocan tapas en las partes superior e inferior. Las tapas pueden ser de diferente color con el objeto de marcar la orientación de la muestra.

Para el muestreo a profundidades mayores de 10 metros, generalmente se utilizan máquinas perforadoras rotarias, equipadas con tuberías de perforación especiales para muestreo, denominadas "augers". En la figura 3 se muestran diferentes tipos de equipos de muestreo.



MUESTRAS DE GAS

La obtención de muestras de gas en los pozos someros se realiza colocando un tubo plástico flexible dentro del pozo. Se extrae el gas por medio de una pequeña bomba o una hipodérmica y se almacena en bolsas especiales, fabricadas con materiales que no reaccionan con el hidrocarburo o bien en recipientes de vidrio. Las muestras obtenidas son enviadas al laboratorio para su análisis cromatográfico. Son comunes los cromatógrafos portátiles que pueden realizar el análisis en el sitio.

MUESTRAS DE PRODUCTO LIQUIDO

Cuando la perforación alcanza el nivel freático, puede obtenerse una muestra de agua y del producto (hidrocarburo) líquido. Existen diferentes aparatos para su extracción. El producto líquido debe envasarse y sellarse en recipientes especiales.

ANALISIS DE LABORATORIO

En la prospección de hidrocarburos, las muestras de gas, agua o suelo, son analizadas por el método de cromatografía de gases (GC/FID = Gas chromatography with flame ionization detection). Los resultados pueden interpretarse cualitativa y cuantitativamente. En la gráfica (cromatograma) resultante de un análisis, los picos relacionan a los diferentes compuestos presentes en la muestra. (figuras 1 y 2).

CONCLUSIONES

Las fugas de hidrocarburos y su consecuente contaminación de suelos y agua subterránea, son comunes en sitios donde se manejan estos productos, principalmente gasolineras y patios de ferrocarriles, autobuses y aeropuertos. El movimiento del hidrocarburo en el subsuelo depende del tipo y características del material que constituye el medio. Los hidrocarburos comerciales corresponden a cortes de destilación, que van de ligeros y alto grado de volatilización, a pesados o densos. La exploración y delimitación de hidrocarburos en el subsuelo

se realiza mediante determinaciones de HCV, O₂, CO₂ y BTEX, entre otros, medidos en pozos someros. Generalmente se obtienen muestras de gas, líquido y/o sólido para su análisis, cualitativo y cuantitativo; la técnica usual es la cromatografía de gases.

REFERENCIAS

ABDUL, S.A. 1989. Limitations of Monitoring Wells for the Detection and Quantification of Petroleum Products in Soil and Aquifers In: GWMR.

CANTER L.W AND R.C. KNOX. 1985. Ground Water Pollution Control. Lewis Publishers, Inc. 526 p.

FETTER, C.W. 1993, Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company. 458 p.

KVA, ANALYTICAL SYSTEMAS. 1990. Soil Gas Equipment and Brief Field Techniques. Publisher K-V Associates, INC. 50 p.

KERFOOT, H. B. 1988. Is Soil-Gas Analysis, an Effective Means of Tracking Contaminant Plumes in Groundwater? What are the limitations of the Technology Currently Employed, In: GWMR.

KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1992. Contaminated Soils, Diesel Fuel Contamination. Lewis Publishers, 227 p.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1990. Proyecto Experimental para Detección de Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. DDF-DGCOH

LESSER, J. M. 1991. Contaminación de Acuíferos por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. Curso sobre Tecnología de Punta en Contaminación de Acuíferos. Intera-Lesser-CFE.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1992. Detección de Zonas Contaminadas por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas DDF-DGCOH.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1993. Evaluación de Riesgos y Diagnóstico para el Saneamiento de la Colonia Moderna Oriente de Guadalajara, Jal. CNA.

NIELSEN, D. M. 1991. Practical Handbook of Ground-Water Monitoring. National Water Well Association. 717 p.

OUDISK, G. AND K MUSICA. 1989. Handbook for the Identification, Location and Investigation of Pollution Sources Affecting Ground Water. NWWA. 185 p.

TABLA 1 CAPACIDAD DE ADSORCION, VOLATILIZACION Y SOLUBILIDAD DE LOS COMPONENTES MAS COMUNES DE LAS GASOLINAS

	CAPACIDAD DE		
	ADSORCION POR EL SUELO (%)	VOLATILIZACION (%)	SOLUBILIDAD (%)
Benceno	3	62	35
Etilbenceno	21	59	20
(n) Heptano	0.1	99.8	0.1
(n) Hexano	0.1	99.8	0.1
(n) Pentano	0.1	99.8	0.1
Benc (a)	100	0	0
Antraceno	100	0	0
Benc (a) Pireno	61	8	31
Naftaleno	88	2	10
Fenantreno	0.1	99.8	0.1
1-pentano	9	0.01	91
Fenol	3	77	20
Tolueno	15	54	31
Xileno			

De: L. Scher et al., 1986

TABLA 2 ALGUNOS DE LOS PRINCIPALES CONSTITUYENTES DE LAS GASOLINAS (ADAPTADA POR PERRY Y MODIFICADA POR NYER 1993)

	VOLUMEN %		
	GASOLINA 1	GASOLINA 2	GASOLINA 3
ALCANOS			
n-PENTANO	0.33	0.44	1.12
n-HEXANO	8.44	7.75	9.15
n-HEPTANO	8.90	6.94	8.42
2-METILPENTANO	2.89	2.56	3.47
2,3-DIMETILHEXANO	0.22	0.30	2.39
CICLOALCANOS			
CICLOPENTANO	0.88	1.78	0.67
METILCICLOPENTANO	6.61	10.29	5.01
CICLOHEXANO	10.40	7.63	7.13
METILCICLOHEXANO	22.00	14.55	18.07
ETILCICLOPENTANO	2.03	4.38	2.34
TRIMETILCICLOPENTANO	3.64	8.12	4.18
AROMATICOS			
BENCENO	3.27	2.22	3.81
TOLUENO	18.19	7.94	12.02

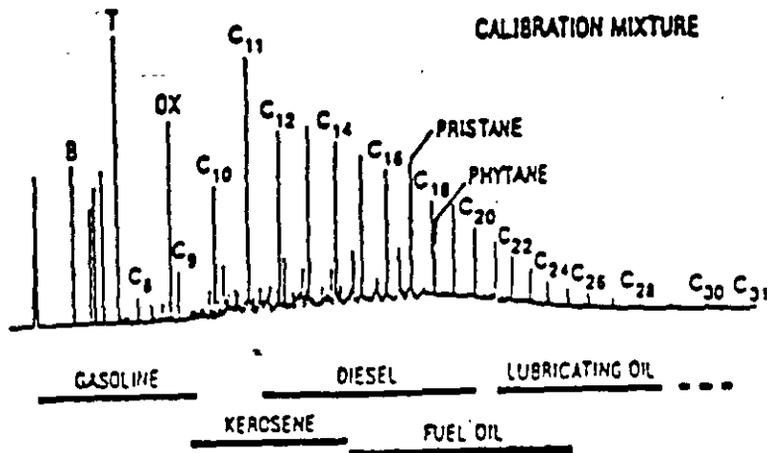


FIGURA 1. CROMATOGRAMA DE MEZCLA DE HIDROCARBUROS (MODIFICADA DE SENN AND JOHNSON, 1985)

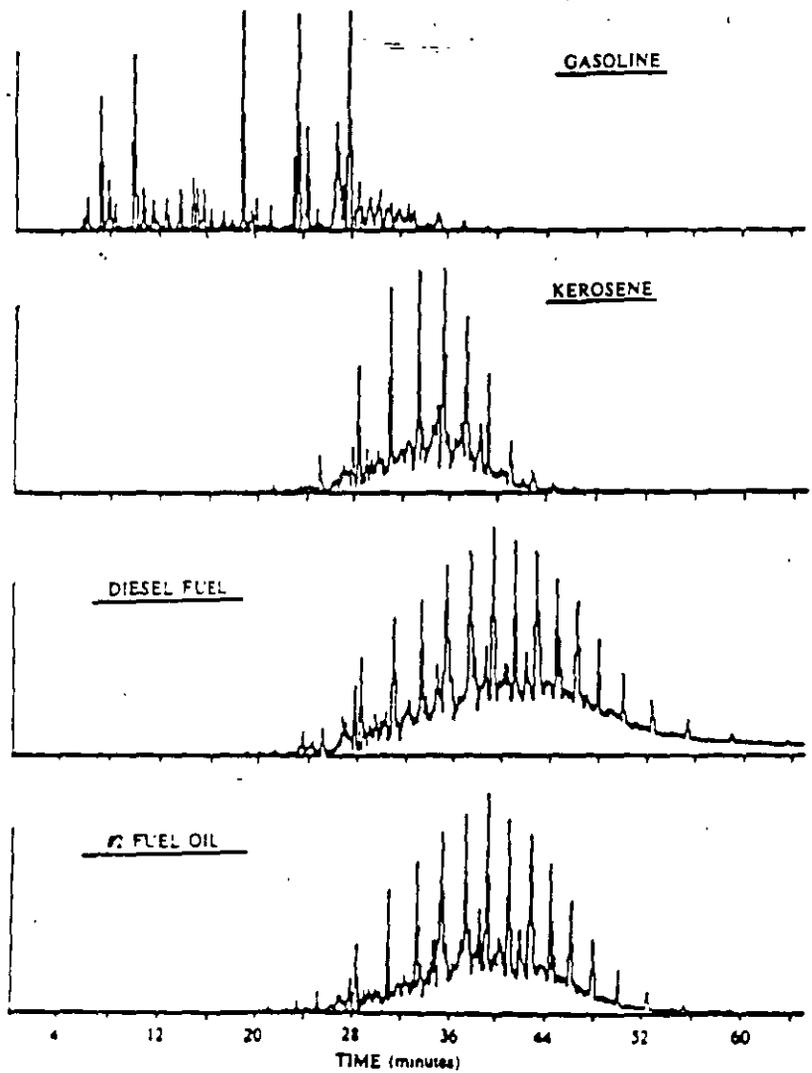
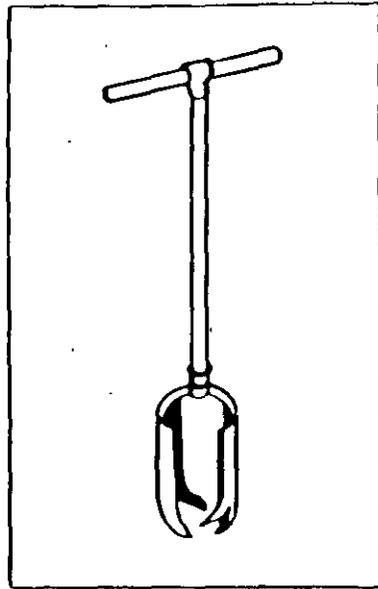
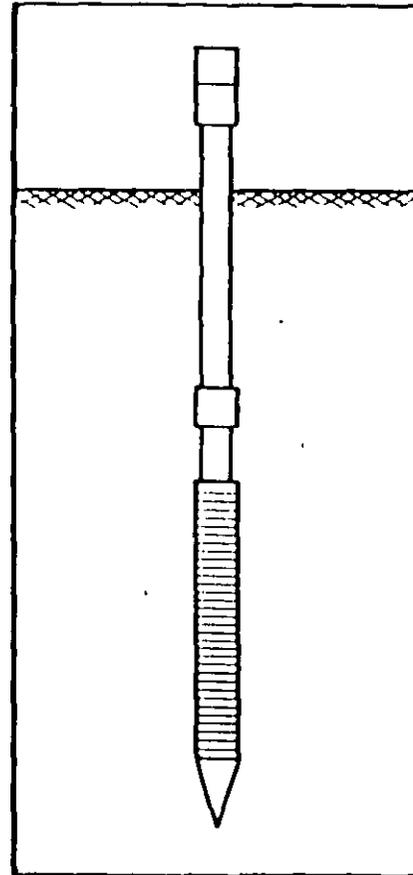


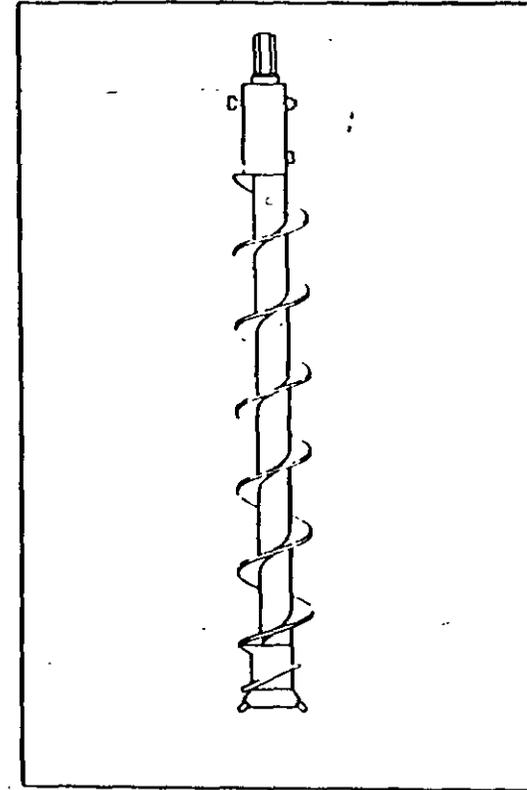
FIGURA 2. CROMATOGRAMAS DE DIFERENTES HIDROCARBUROS (DE CALABRESE Y KOSTECKI, 1989)



MUESTREADOR MANUAL



MUESTREADOR MEDIANTE
INCADO DE TUBERIA



MUESTREADOR DE MAQUINA ROTARIA

DETERMINACION DE HIDROCARBUROS VOLATILES EN LA CONTAMINACION DEL SUBSUELO

POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V.
RIO GUADALQUIVIR No. 3
QUERETARO 76020, QRO.
MEXICO

RESUMEN

En suelos y acuíferos contaminados por hidrocarburos (HC), algunos de sus componentes se disuelven en el agua; otros flotan sobre el nivel freático y otra parte se volatiliza. En los estudios de prospección de HC, se obtienen y analizan muestras de agua, de HC líquido, de volátiles y de suelos. El estudio de los componentes de los hidrocarburos se realiza mediante análisis de cromatográfico, por medio del cual se llegan a identificar los tipos de HC y a cuantificar sus componentes.

INTRODUCCION

En la prospección y saneamiento del subsuelo y acuíferos por hidrocarburos, una herramienta útil es el análisis cromatográfico. El análisis incluye una gráfica denominada cromatograma, en la que se registra la presencia de diferentes orgánicos volátiles. Mediante este análisis es factible cuantificar los compuestos presente y clasificar el tipo de hidrocarburo.

Las gasolinas son una compleja mezcla de hidrocarburos. Pueden ser identificados más de 150 compuestos diferentes en una gasolina típica y en general, se caracteriza por que los compuestos que la constituyen son más volátiles que los que forman al diesel. En contraste, los aceites lubricantes prácticamente no contienen compuestos ligeros, lo cual es claramente identificable en los cromatogramas.

Los hidrocarburos que presentan mayor volatilidad pueden perder fácilmente los compuestos más ligeros en relación al tiempo, factor que llega a permitir la diferenciación de un hidrocarburo fresco de otro antiguo.

ANALISIS DE LABORATORIO

En la prospección de hidrocarburos, las muestras de agua o suelo son analizadas en el laboratorio por el método de cromatografía de gases (GC/FID = Gas chromatography with flame ionization detection). Los resultados pueden interpretarse cualitativa y cuantitativamente. En la gráfica (cromatograma) resultante de un análisis, los picos relacionan a los diferentes compuestos presentes en la muestra.

En la figura 1 se muestra un cromatograma donde se marcan los cortes de destilación de algunos hidrocarburos como la gasolina, el diesel y el keroseno. En la figura 2 se incluyen cromatogramas típicos de una gasolina y del diesel, entre otros

VOLATILIZACION DE LOS HIDROCARBUROS

Conforme un hidrocarburo se volatiliza, la cantidad de HC ligeros disminuye. En las figuras 3 a 5, se presentan los cromatogramas de gasolina nova, diesel y petróleo, tanto frescos como volatilizados, observándose que es notoria la pérdida de volátiles en los dos primeros. En el petróleo, no se aprecia un cambio significativo, debido a que este hidrocarburo está constituido por una mezcla pobre en volátiles ligeros.

A partir de los resultados del análisis cromatográfico puede clasificarse el tipo de hidrocarburos y cuantificarse los diferentes compuestos que lo constituyen.

Con el objeto de conocer el comportamiento de la volatilización de los hidrocarburos a la intemperie, se obtuvieron muestras de gasolina magna, gasolina nova, diesel y petróleo. A las muestras obtenidas se les efectuó un análisis de cromatografía. Se colocaron en un espacio abierto y ventilado, y se tomaron muestras periódicas. Algunos de los cromatogramas resultantes se muestran en las figuras 3 a 5. Con los valores de compuestos volátiles obtenidos, se formó una gráfica (fig. 6) donde se observó una clara volatilización en las gasolinas. Por lo que respecta al diesel y al petróleo, la respuesta fue mínima, debido a que estos hidrocarburos son pobres en volátiles, en relación con las gasolinas.

CONCLUSIONES

La cromatografía de gases es una herramienta útil para la identificación de los hidrocarburos y para la cuantificación de sus componentes. Dentro de un cromatograma se marcan los compuestos de acuerdo a su grado de volatilización. Las gasolinas presentan compuestos más ligeros que el diesel. En contraste, los aceites

lubricantes no contienen compuestos ligeros. Con el tiempo un hidrocarburo puede volatilizarse, factor que llega a permitir diferenciar a un hidrocarburos fresco de otro antiguo.

REFERENCIAS

- CALABRESE, E.J. AND P.T. Kostecki. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Volume 2. Remediation Techniques Environmental Fate Risk Assesment Analytical Methodologies. Lewis Publishers, Inc. 515 p.
- KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Volume 1. Lewis Publishers. 357 p.
- KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1991. Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater, Lewis Publishers. 354 p.
- LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1990. Proyecto Experimental para Detección de Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. DDF-DGCOH
- LESSER, J. M. 1991. Contaminación de Acuiferos por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. Curso sobre Tecnología de Punta en Contaminación de Acufferos. Intera-Lesser-CFE.
- LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1992. Detección de Zonas Contaminadas por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas DDF-DGCOH.
- LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1993. Evaluación de Riesgos y Diagnóstico para el Saneamiento de la Colonia Moderna Oriente de Guadalajara, Jal. CNA.
- LYMAN, W.S., P.S. REIDY AND B. LEVY. 1992. Mobility and Degradation of Organic Contaminants in Subsurface Environments. C. K. Sholey, Inc. 395 P.
- RISER-ROBERTS, E. 1992. Bioremediation of Petroleum Contaminated Sites, C. K. Smoley, Inc. 264 p.

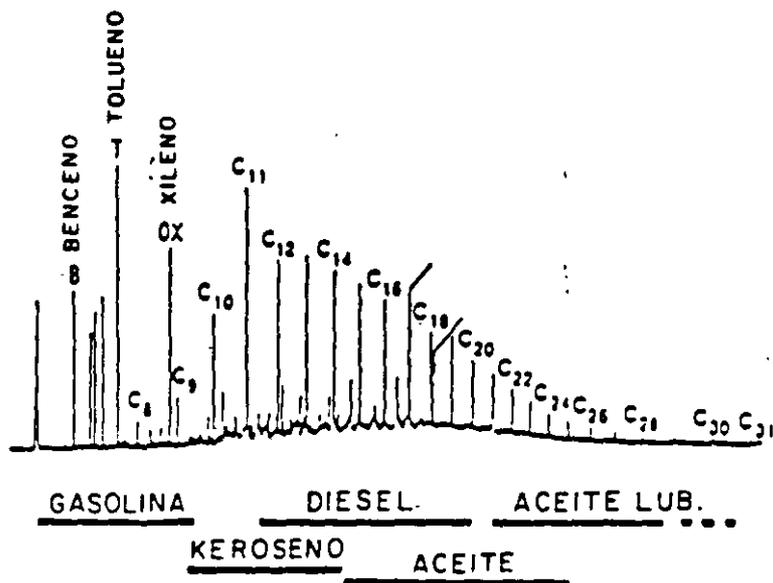
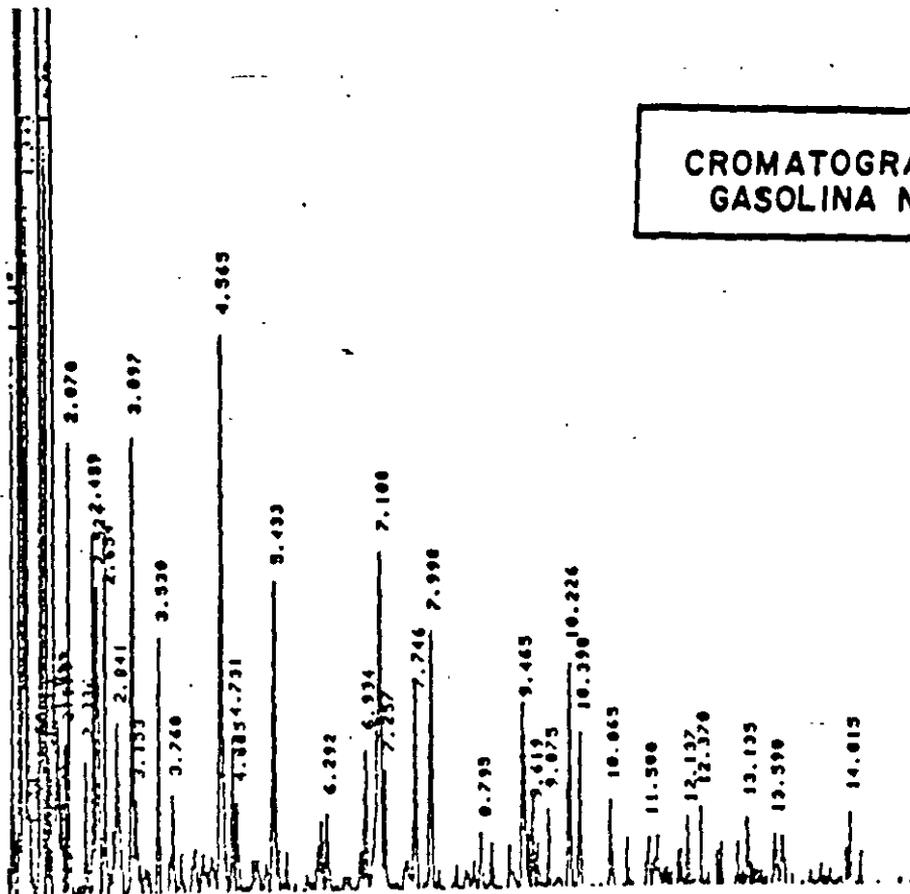


FIGURA 1 CROMATOGRAMA DE UNA MEZCLA DE
 HIDROCARBUROS.
 (MODIFICADA DE SENN AND JOHNSON 1985)

1.427
1.812

CROMATOGRAMA DE GASOLINA NOVA



CROMATOGRAMA DE DIESEL

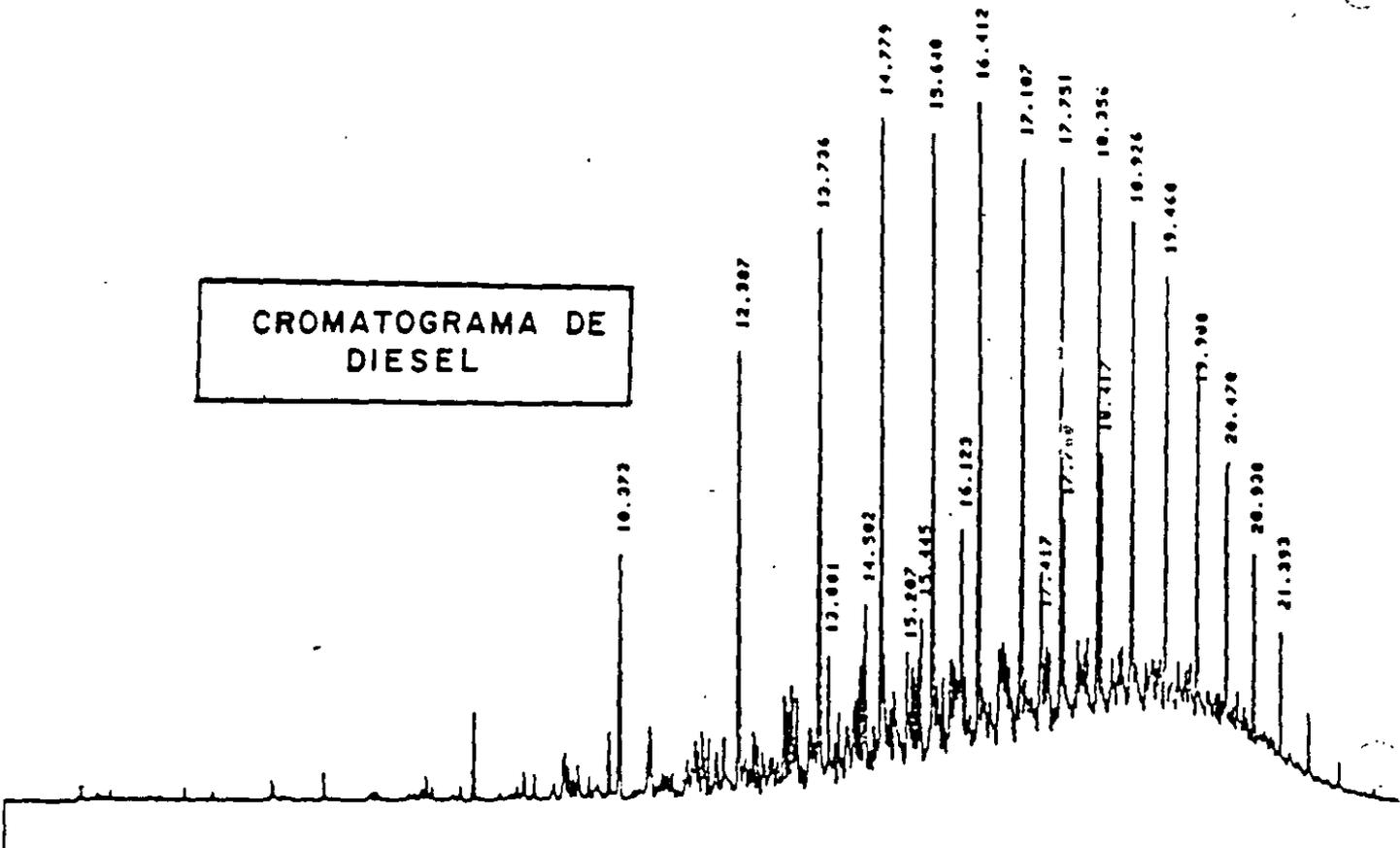


FIGURA 2 - CROMATOGRAMAS TÍPICOS DE GASOLINA NOVA Y DIESEL

FIGURA 3a
GASOLINA NOVA FRESCA

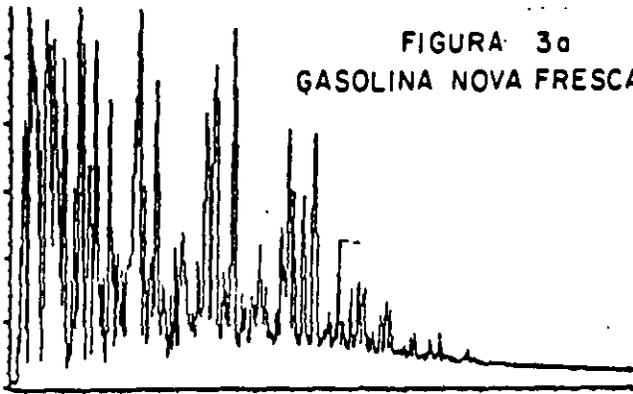


FIGURA 3b
GASOLINA NOVA
INTEMPERIZADA

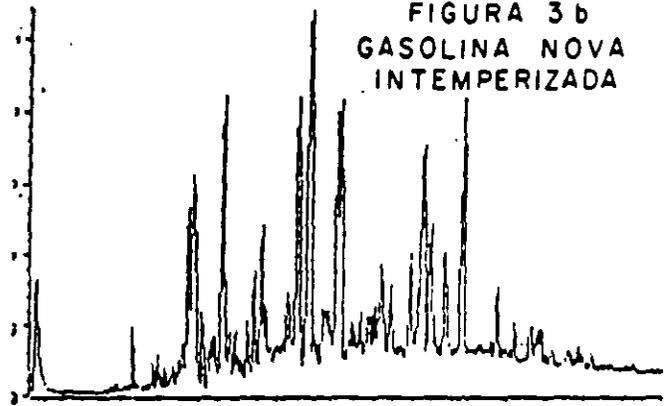


FIGURA 4a
DIESEL FRESCO

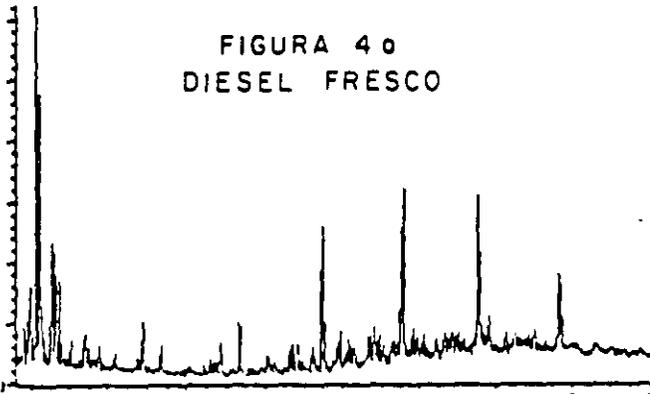


FIGURA 4b
DIESEL INTEMPERIZADO

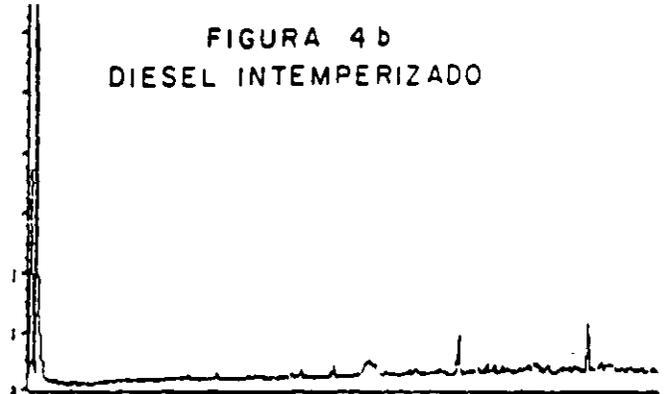


FIGURA 5a
PETROLEO FRESCO

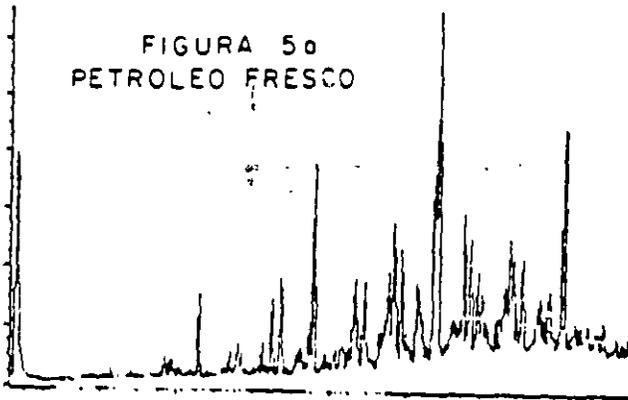
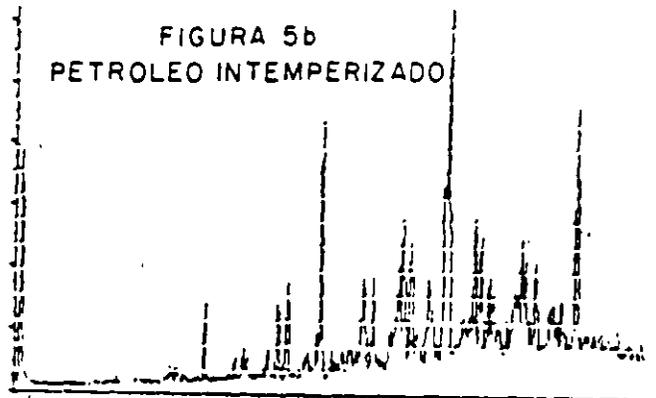


FIGURA 5b
PETROLEO INTEMPERIZADO



COMPORTAMIENTO DE HIDROCARBUROS A LA INTEMPERIE, RESPECTO AL TIEMPO

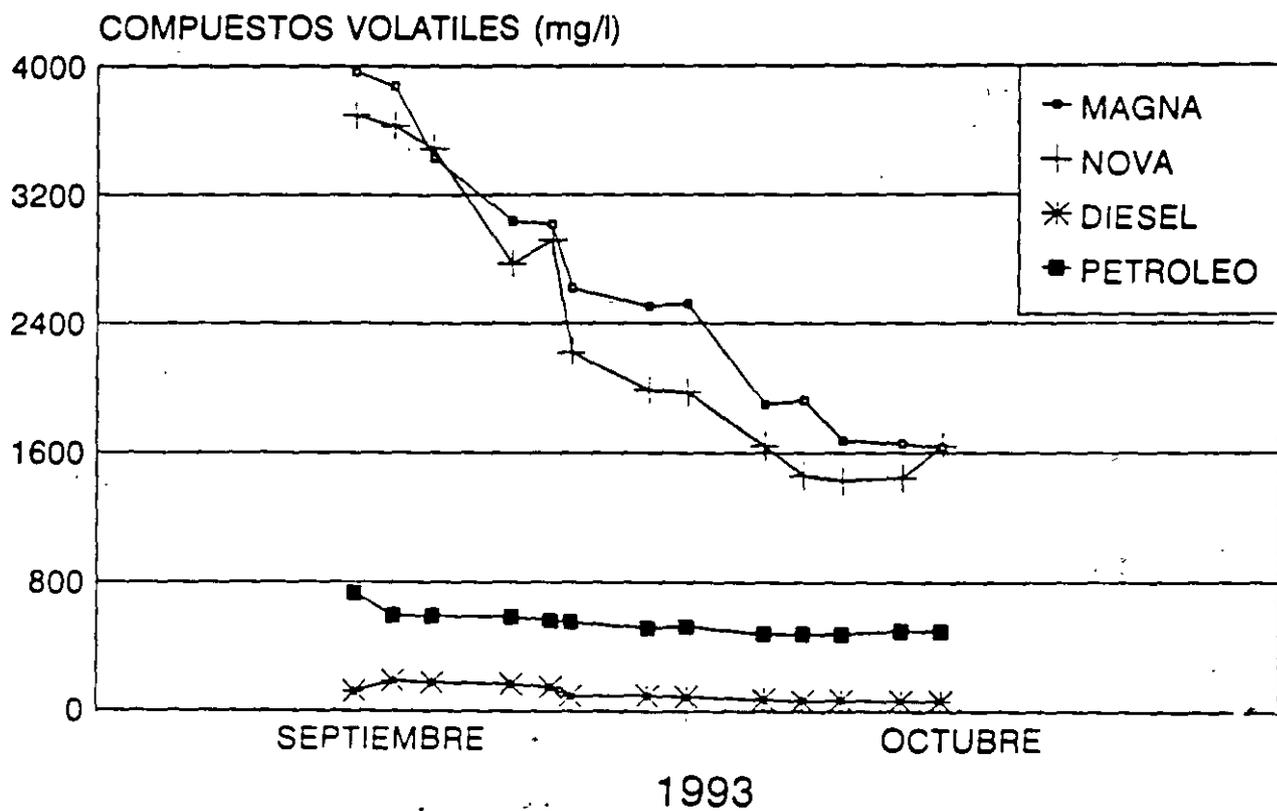


FIGURA 6

SANEAMIENTO DE ACUIFEROS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS

**POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V.
RIO GUADALQUIVIR No. 3
QUERETARO, QRO. 76020
MEXICO**

R E S U M E N

El hidrocarburo (HC) infiltrado al subsuelo puede encontrarse en 4 formas: líquido de menor densidad que el agua y flotando sobre el nivel freático ó estático; volátil en la zona no saturada; disuelto en agua y; líquido de mayor densidad que el agua, el cual puede encontrarse absorbido por el material del medio o sedimentado en la base del acuífero. Los métodos apropiados para el saneamiento del subsuelo contaminado por HC, depende de varios aspectos. Entre ellos, la fase en que el HC se encuentre, su distribución y las características del subsuelo. El saneamiento del subsuelo puede iniciarse con la extracción del HC líquido y el volátil, lo cual permite disminuir el grado de contaminación y de riesgo. Como segundo paso se puede considera la limpieza del suelo y acuífero contaminados, los cuales tienen una mayor complejidad.

Para la extracción inicial de los productos líquido y volátil, el diseño y operación es "relativamente" sencillo. La remediación o saneamiento total del suelo y acuífero incluye técnicas sofisticadas, de alto costo y largo tiempo de ejecución. Existen diversos métodos, destacando entre ellos la extracción del contaminante y la biodegradación. La extracción por bombeo del producto líquido, es común, la cual se extrae junto con agua del acuífero; una vez en la superficie el producto es almacenado en tanques y el agua extraída es tratada a fin de eliminar los volátiles que contenga. El volátil puede extraerse a través de pozos y, una vez

en la superficie, puede ser incorporado a la atmósfera, incinerado o capturado mediante filtros de carbón activado.

ABSTRACT

Infiltrated hydrocarbons (HC) underground are found in 4 phases: (1) Liquid of lower density than water, floating over the water level; (2) volatile in the vadose zone; (3) dissolved in water; (4) liquid of higher density than water, found absorbed by the environment or accumulated at the base of the aquifer. The appropriate methods to clean underground polluted by HC depends of various factors. Some of them are: the phase in which the HC is found, its distribution and soil characteristics. Remediation usually begin with liquid and volatile extraction to reduce the risk. As a second step soil and aquifer cleaning is performed. To start extraction of HC, both liquid and volatile phases, is relatively simple. Total remediation of soil and aquifer includes sophisticated and expensive techniques performed for a long period of time. A common remediation method consists in extraction of liquid product and water by pumping. Once at the surface the product (liquid HC) is stored in tanks and water is treated to eliminate possible volatiles. The volatile phase can be extracted through wells. Once in surface those volatiles can be incorporated to the atmosphere, incinerated or captured by activated carbon filters.

INTRODUCCION

El hidrocarburo (HC) infiltrado al subsuelo puede encontrarse en varias formas tales como: (1) líquido de menor densidad que el agua y flotando sobre el nivel freático ó estático; (2) volátil en la zona no saturada; (3) disuelto en agua y; (4) líquido de mayor densidad que el agua, el cual puede encontrarse absorbido por

las partículas del suelo o sedimentado en la base del acuífero. Una vez conocida su presencia en el subsuelo, (en extensión, concentración, tipo de hidrocarburos y fase en que se encuentra), junto con el conocimiento de la geología y geohidrología del lugar, se pueden establecer las políticas de saneamiento.

El o los métodos más apropiados para el saneamiento de un subsuelo contaminado por HC, depende de varios aspectos. Entre ellos, la fase en que el HC se encuentre, su distribución y las características del subsuelo.

En México, se puede dividir el saneamiento en 2 partes. La primera considera la extracción inicial del HC líquido y volátil, lo cual permite disminuir el grado de contaminación y de riesgo. La segunda parte se puede denominar la "limpieza total", del suelo y acuífero, la cual incluye técnicas sofisticadas de alto costo y largo tiempo de ejecución.

MÉTODOS DE SANEAMIENTO

Los principales métodos para el saneamiento del subsuelo y acuífero por hidrocarburos son: (1) extracción del HC líquido y volátil; (2) biodegradación insitu.

EXTRACCION DE HC LIQUIDO Y VOLATIL

Una vez delimitada la zona invadida por HC y cuantificada su concentración, se procede a extraerlo. El producto líquido es bombeado a través de pozos. Este, puede ser extraído junto con el agua del acuífero y una vez en la superficie, es separado. En otros casos, el HC líquido que se encuentra en una capa flotando sobre el agua, de donde puede ser extraído mediante bombas especiales. Para

acelerar la acumulación del HC en el entorno del pozo, puede bombearse agua y formarse un cono de abatimiento, cuya pendiente facilita el movimiento de la capa de HC que flota sobre el nivel estático, hacia el pozo. El HC y agua extraídos son procesados en la superficie. (Figura 1)

La extracción de volátiles se puede realizar a través de pozos ubicados en la zona vadosa, donde se colocan extractores de aire. Pueden perforarse pozos para inyección de aire, que "empujen al volátil hacia su salida. La remoción de volátiles al inicio de la extracción es alta y va disminuyendo con el tiempo.

BIODEGRADACIÓN INSITU

Un método para el saneamiento de zonas afectadas por hidrocarburos es la biodegradación. Consiste en utilizar las bacterias que existen en todo suelo y que se alimentan de HC y oxígeno, formando bióxido de carbono y agua. Para acelerar este proceso, se pueden añadir nutrientes que aceleren la acción bacteriana, principalmente oxígeno, el cual se inyecta como gas o mediante agua. Debido al proceso de biodegradación mencionado, una zona invadida por hidrocarburos se caracteriza también por ausencia de oxígeno y abundancia de bióxido de carbono, parámetros que pueden monitorearse durante el saneamiento para determinar el grado de limpieza alcanzado.

EQUIPOS USUALES PARA EL SANAMIENTO

Con el objeto de ilustrar tanto la forma en que se encuentra el HC el subsuelo, así como las técnicas más comunes para su extracción o saneamiento, a continuación se describen varios productos comunes en el mercado.

En la figura No. 2 se muestra un equipo Westinghouse para el tratamiento de hidrocarburos y agua subterránea extraídos del subsuelo. En el se observa un tanque separador de agua-hidrocarburos, un tanque para el almacenamiento del producto recuperado, un tanque de aereación, un compresor, un soplador acoplado a una torre desgasificadora y un panel de control.

En la figura No. 3 se incluye el sistema de ORS Environmental Equipment, para la extracción y tratamiento de producto líquido y volátiles. En esta figura, se observa la presencia de un acuífero somero que es contaminado por fugas de un tanque de gasolina. El producto líquido se encuentra flotando sobre el nivel freático. También existen volátiles entre la superficie del terreno y el nivel freático. La extracción del hidrocarburo líquido se realiza mediante un sistema de bombas para la extracción, tanto del producto (HC líquido) como del agua. El producto es almacenado en un tanque y el agua es pasada por una torre desgasificadora. El gas obtenido es tratado por oxidación catalítica o incinerado. En la misma figura, se ilustra la inyección de agua y nutrientes al subsuelo, lo que provoca biodegradación, además de "empujar" al producto hacia el pozo. Cuenta también con un sistema de extracción de volátiles, los que son conducidos a la planta de tratamiento de gases.

En la figura No. 4 se muestra la perforación de pozos direccionales para el saneamiento del subsuelo bajo infraestructura como edificios y tanques de almacenamiento.

En la figura No. 5 se incluye el sistema Environmental Instruments para la extracción y tratamiento del producto líquido y del volátil. Los volátiles son extraídos a través de un pozo y pueden ser conducidos a un filtro de carbón activado o bien a un oxidador catalítico. Un sistema de inyección de aire al subsuelo separa el volátil del agua, para posteriormente ser captado por un pozo. Mediante otro pozo, se extrae agua y producto (HC) líquido. El producto es almacenado en un tanque y el agua es pasada a través de un separador de

agua/producto. Posteriormente el agua pasa a un proceso de aereación, donde el volátil es separado y conducido hacia un filtro de carbón activado o bien a un oxidador catalítico.

En la figura No. 6 se muestra un esquema del sistema SENECA para la extracción y tratamiento del producto líquido y volátil del subsuelo. En dicha figura se ilustran pozos de extracción, tanto de volátiles como de producto líquido. Por lo que respecta al producto líquido, este es extraído por un sistema múltiple de pozos y conducido a un tanque. Posteriormente pasa por un tanque de separación agua/producto. El agua obtenida es conducida a través de un desgasificador, en el que, por medio de un soplador, se produce un burbujeo que permite la separación del volátil del agua.

CONCLUSIONES

El HC en el subsuelo y acuífero puede encontrarse en forma líquida, volátil o disuelta en agua. El saneamiento puede consistir en la extracción del HC (líquido o volátil), la cual puede realizarse a través de pozos. La biodegradación insitu es un método eficaz para la remoción de HC hasta niveles bajos, tanto en suelo como en el acuífero. Los principios en que se basa el saneamiento es aplicado en forma comercial por un gran número de compañías productoras de equipo.

REFERENCIAS

CALABRESE, E.J. AND P.T. Kostecki. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Volume 2. Remediation Techniques Environmental Fate Risk Assessment Analytical Methodologies. Lewis Publishers, Inc. 515 p.

CANTER L.W AND R.C. KNOX. 1985. Ground Water Pollution Control. Lewis Publishers, Inc. 526 P.

HAYES, D., E. C. HERNRY AND S. M. TESTA. 1989. A Practical Approach to Shallow Petroleum Hydrocarbon Recovery.

KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Volume I. Lewis Publishers. 357 p.

KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1991. Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater, Lewis Publishers. 354 p.

KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1992. Contaminated Soils, Diesel Fuel Contamination. Lewis Publishers. 227 p.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1990. Proyecto Experimental para Detección de Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. DDF-DGCOH

LESSER, J. M. 1991. Contaminación de Acuíferos por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. Curso sobre Tecnología de Punta en Contaminación de Acuíferos. Intera-Lesser-CFE.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1992. Detección de Zonas Contaminadas por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas DDF-DGCOH.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1993. Evaluación de Riesgos y Diagnóstico para el Saneamiento de la Colonia Moderna Oriente de Guadalajara, Jal. CNA.

LYMAN, W.S., P.S. REIDY AND B. LEVY. 1992. Mobility and Degradation of Organic Contaminants in Subsurface Environments. C. K. Sholey, Inc. 395 P.

NYER, E. K. 1993. Practical Techniques for Groundwater and Soil Remediation. Lewis Publishers 214 p.

RISER-ROBERTS, E. 1992. Bioremediation of Petroleum Contaminated Sites, C. K. Smoley, Inc. 264 p.

NWWA. 1991. Volatile Organic Compound Cleanups: An Anthology.

NWWA. 1991. Ground Water and Soil Venting.

ROY F. WESTON. INC. 1988. Remedial Technologies for Leaking Underground Storage Tanks. Lewis Publishers. 216 p.

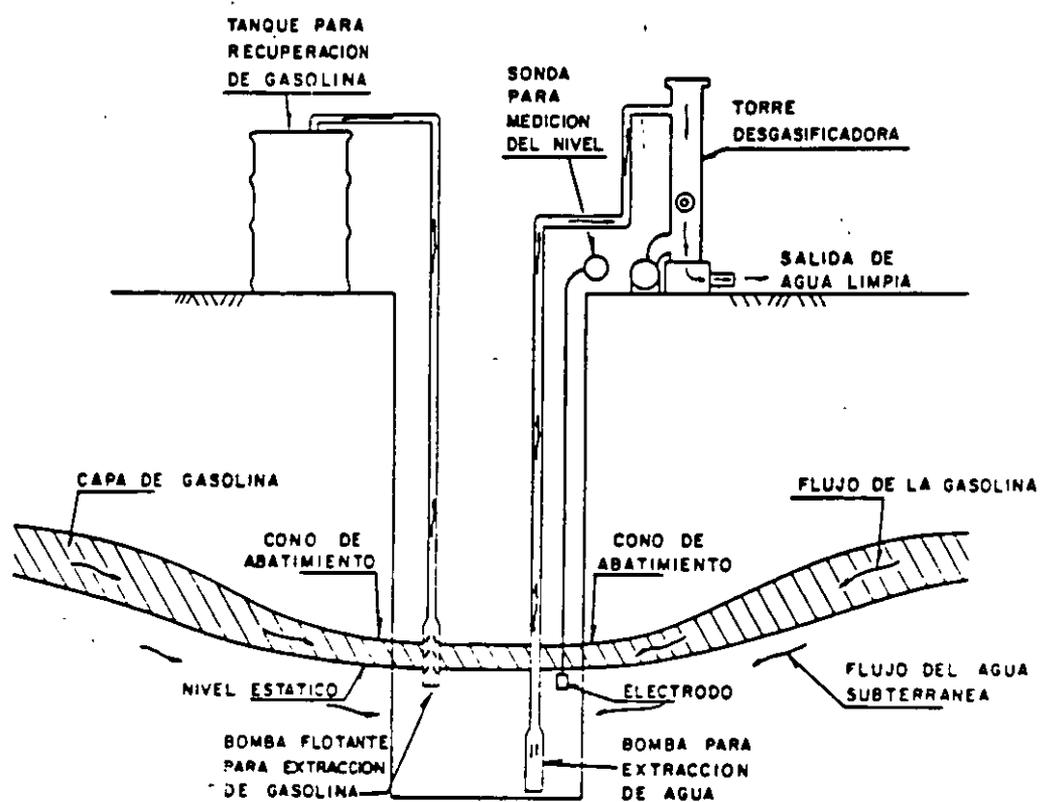


FIGURA 1.- EXTRACCION DE HIDROCARBUROS POR BOMBEO Y TRATAMIENTO EN SUPERFICIE

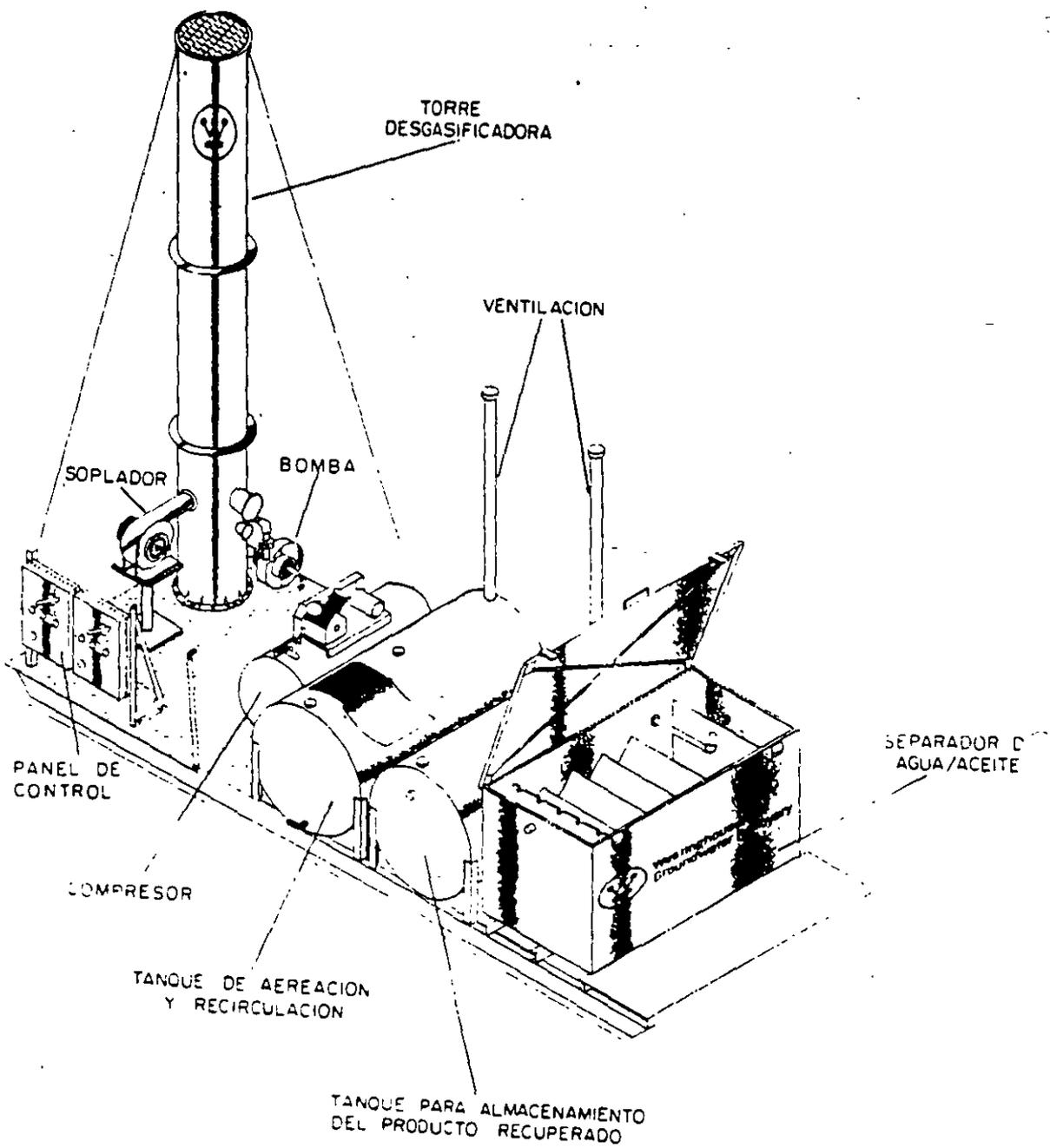
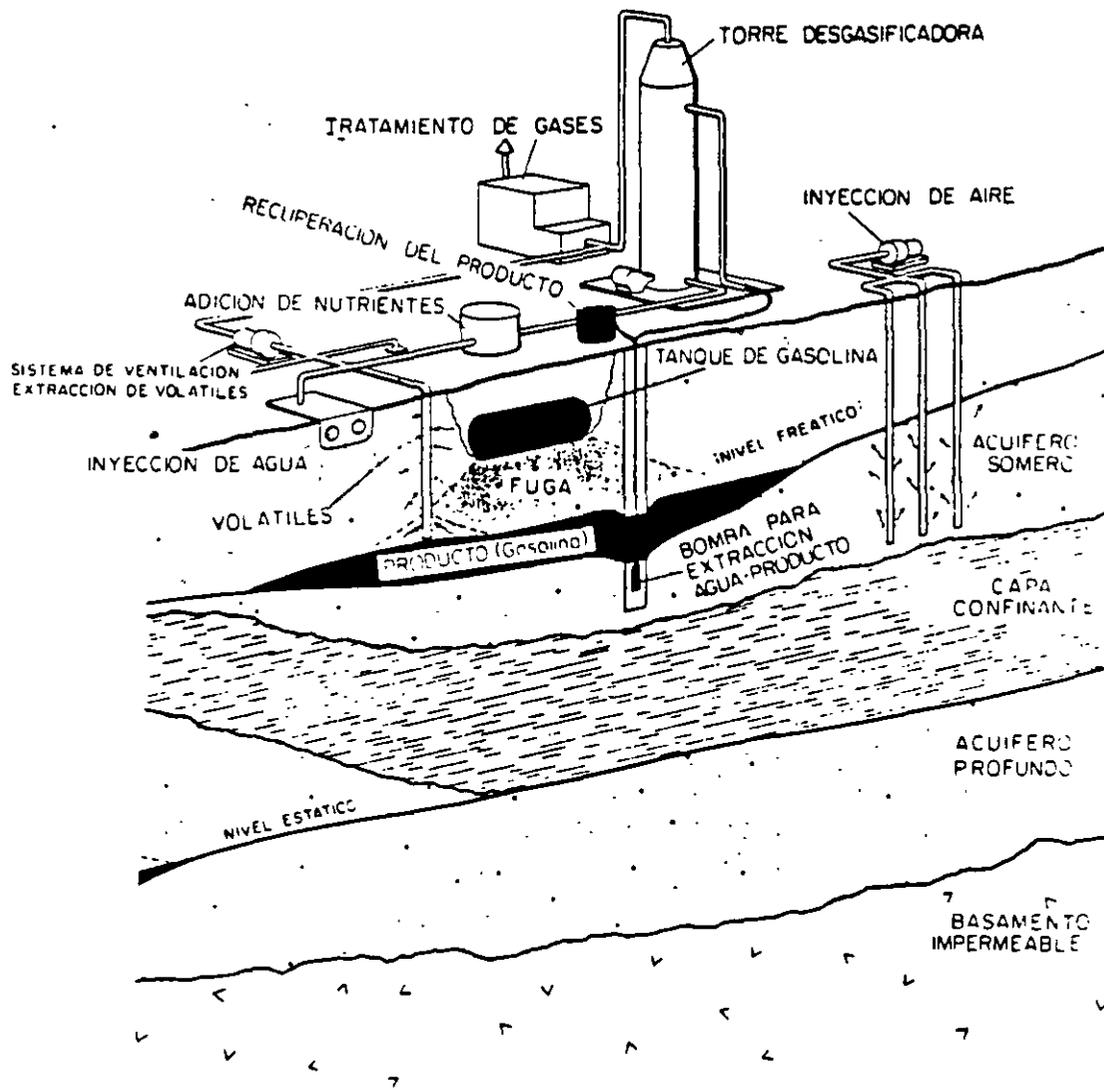


FIGURA 2.- EQUIPO WESTINGHOUSE PARA EL TRATAMIENTO DE
HIDROCARBUROS Y AGUA



DE ORS ENVIRONMENTAL EQUIPMENT CATALOG

FIGURA 3.- SISTEMA ORS/ENVIRONMENTAL EQUIPMENT PARA EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE PRODUCTO LIQUIDO Y VOLATIL

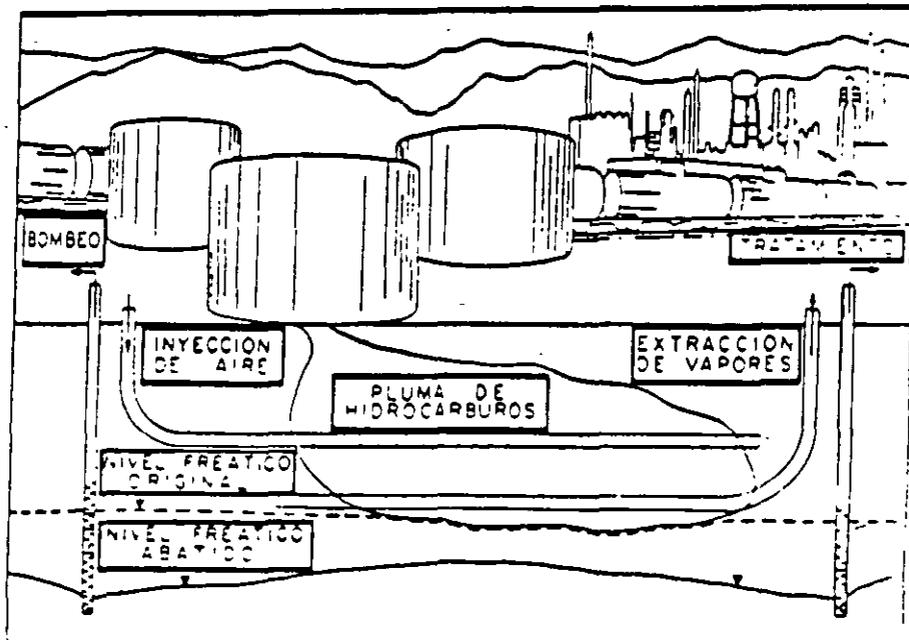


FIGURA 4 SANEAMIENTO DE HIDROCARBUROS DEL SUBSUELO
 MEDIANTE POZOS DIRECCIONALES (DE ENGINEERING-SCIENCE, INC.)

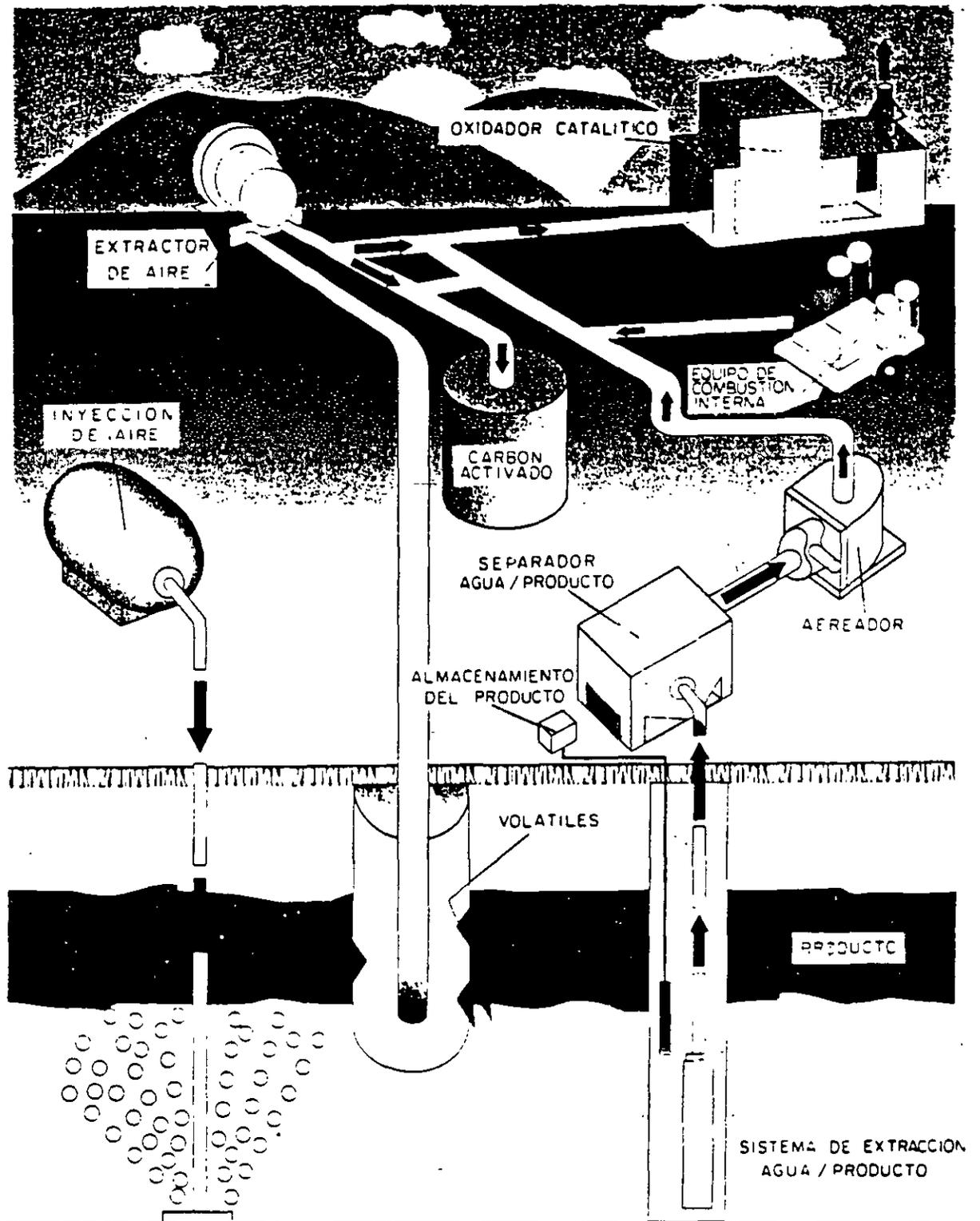
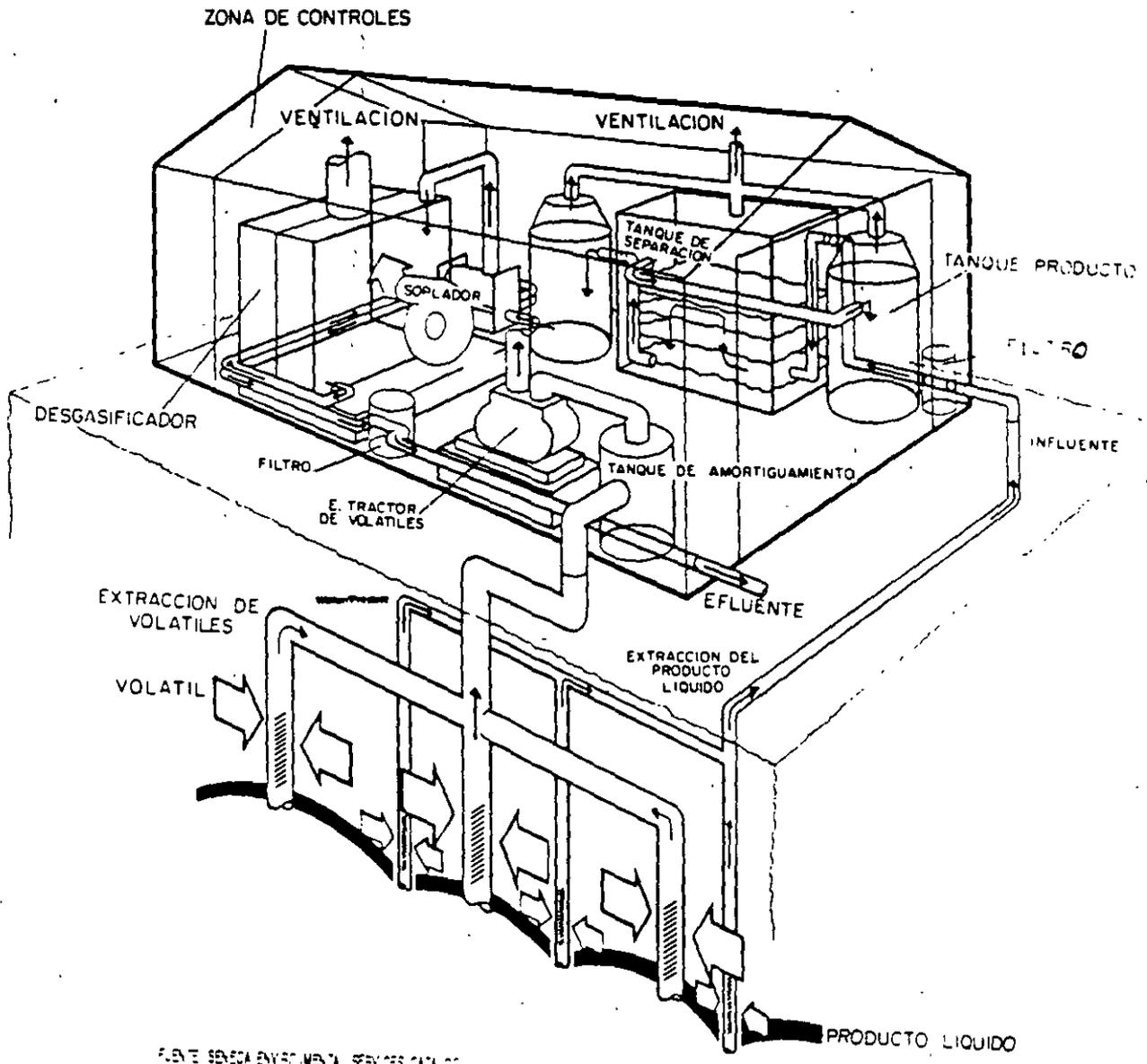


FIGURA 5.- SISTEMA ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS PARA LA EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE PRODUCTO LIQUIDO Y VOLATIL.



FUENTE: SENECA ENVIRONMENTAL SERVICES CATALUÑA

FIGURA 6.- SISTEMA SENECA PARA LA EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE PRODUCTO LIQUIDO Y VOLATIL.

CARACTERIZACIÓN Y COMPORTAMIENTO DE LA CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBUROS EN UN SUELO ARCILLOSO

Juan Manuel Lesser. Lesser y Asociados, S.A. de C.V.
Susana Saval. Instituto de Ingeniería, UNAM

RESUMEN

Sobre la superficie del terreno de una zona industrial, existieron fugas de combustibles cuya magnitud y fechas de derrame se desconocen. El subsuelo del lugar está formado por materiales arcillosos con un espesor de 40 metros, los cuales se encuentran saturados y dan origen a un acuitardo cuyo nivel freático se ubica a alrededor de 2 metros de profundidad. Las arcillas presentan baja permeabilidad, del orden de 1×10^{-9} m/seg, lo cual impide que los hidrocarburos circulen grandes distancias, limitando así la afectación a un área relativamente reducida. La zona de estudio tiene una superficie de aproximadamente 6.5 hectáreas y sobre ellas se realizaron 274 perforaciones someras, en las cuales se efectuaron mediciones de hidrocarburos volátiles, explosividad, profundidad al nivel freático y espesor de producto libre flotando sobre el manto freático. Prácticamente toda la zona se encontró afectada por la presencia de hidrocarburos volátiles, con más de 10000 ppm (1% v/v) medidos por arriba del nivel freático. Se delimitó la mancha de combustibles en fase libre, la cual presentó espesores de entre 10 y 30 centímetros, que en su mayoría corresponde a diesel y en menor proporción a mezclas de diesel con gasolina. Los análisis cromatográficos efectuados a las muestras del producto libre sugieren que en el sitio ocurrieron varios eventos de derrame, seguramente desde que las instalaciones entraron en operación.

Palabras clave: contaminación, hidrocarburos, acuitardo, permeabilidad, compuestos orgánicos volátiles, diesel, cromatografía

INTRODUCCIÓN

El importante manejo de combustibles que se da durante actividades industriales y comerciales ha traído como consecuencia afectaciones al ambiente, entre las cuales aquellas que impactan directamente a suelo y subsuelo han adquirido gran interés en los últimos años en México.

Cuando ocurre un derrame de combustibles en el suelo, inmediatamente tienden a dispersarse hacia donde el medio lo permite. Las características propias de los combustibles como su densidad, viscosidad y solubilidad en el agua, así como las propias del subsuelo, entre las que destaca el tamaño de partícula, su capacidad de adsorción, permeabilidad y profundidad al nivel freático, determinan la acumulación, migración y distribución de éstos en cada sitio en particular.

Los problemas de contaminación de suelo y subsuelo no reconocen fronteras, ni límites de predios, por lo que cobra fundamental importancia dedicar esfuerzos a la realización de estudios de caracterización detallados que permitan conocer el comportamiento de la contaminación del subsuelo, tanto para fincar responsabilidad jurídica durante la evaluación de daños ambientales, como para tomar las acciones de remediación que sean necesarias y adecuadas para cada sitio en particular (Saval, 1998). En experiencias previas se encontró que la acumulación de hidrocarburos es heterogénea y obedece principalmente a la distribución del material geológico (Saval y Lesser, 1998). En este trabajo se presentan los resultados de caracterización y comportamiento de un caso particular de contaminación del subsuelo, dentro de una zona industrial.

DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El sitio de estudio ha servido durante varios años como una estación de almacenamiento y distribución de combustibles para abastecimiento de una zona industrial. El terreno ocupa un área de aproximadamente 6.5 hectáreas, cerca de la puerta de acceso existe un patio de carga y un almacén que también sirve como taller de mantenimiento. Casi al centro se localizan 4 tanques elevados ocupando los patios 2, 3, 6 y 7. Prácticamente toda la superficie está pavimentada y no existen evidencias de fugas recientes, aunque la información que fue proporcionada al inicio de este estudio establece que se registraron derrames cuya magnitud y fechas se desconocen. En el lugar existe una vía de ferrocarril que atraviesa todo el predio de poniente a oriente, aunque en la actualidad no se utiliza.

MARCO HIDROGEOLÓGICO

La zona de estudio corresponde a una extensa planicie caracterizada por incluir una cubierta de materiales arcillosos con un espesor de alrededor de 40 metros. Incluye

algunos horizontes de arena fina con arcilla, así como limos en diferentes proporciones. Pruebas realizadas en campo indicaron que la permeabilidad de los 2 metros superficiales varía entre 10^{-9} y 10^{-10} m/seg. Los materiales finos que constituyen a la planicie se encuentran saturados a partir de los 2 metros de profundidad. Debido a la baja permeabilidad de las arcillas, éstas se comportan como un acuitardo, ya que absorben y almacenan agua, la cual presenta poco movimiento debido a la retención molecular que ejercen las partículas de la arcilla.

El nivel freático presenta fluctuaciones de la temporada de lluvias donde se encuentra más cerca de la superficie, a la temporada de estiaje donde llega a abatirse hasta cerca de 3 metros de profundidad. Al abatirse el nivel, los combustibles se mueven para ocupar el espacio liberado por las aguas freáticas y posteriormente, en la época de lluvias el nivel sube, dejando una parte de los combustibles en fase libre, y la otra parte adsorbidos en la estructura del suelo.

DELIMITACIÓN DE LA ZONA CONTAMINADA

Con el objeto de localizar la zona contaminada en el subsuelo, se perforaron 274 pozos someros de medición que en su mayoría alcanzaron entre 3.00 y 3.30 metros de profundidad. La perforación de los pozos se llevó a cabo mediante el hincado de barras de acero con un diámetro de $\frac{3}{4}$ " y en ellas se realizaron mediciones *in-situ* de hidrocarburos volátiles, explosividad, profundidad al nivel freático y espesor del producto libre que se encontraba flotando sobre el manto freático (Lesser, 1995 a). Para la medición de hidrocarburos volátiles se utilizó un fotoionizador portátil marca Gastech modelo GT202 calibrado para hexano. La explosividad se midió con un explosímetro marca MSA; la profundidad al nivel freático con una sonda eléctrica y; el espesor de producto libre con ayuda de una pipeta de vidrio que se llevó hasta el nivel freático. Se perforaron otros 6 pozos a 10 metros de profundidad de los cuales se obtuvieron muestras continuas de suelo para identificar la litología del material geológico. Durante las perforaciones se obtuvieron muestras de producto libre, a las cuales se les realizaron análisis por cromatografía de gases, para la identificación de los combustibles presentes.

La medición de hidrocarburos volátiles se realizó a 2 profundidades. La primera a 0.90 m y la segunda por arriba del nivel freático. Con los resultados de la medición a 0.90 m, se trazó la configuración que se muestra en la figura 1A, donde se observan varias zonas

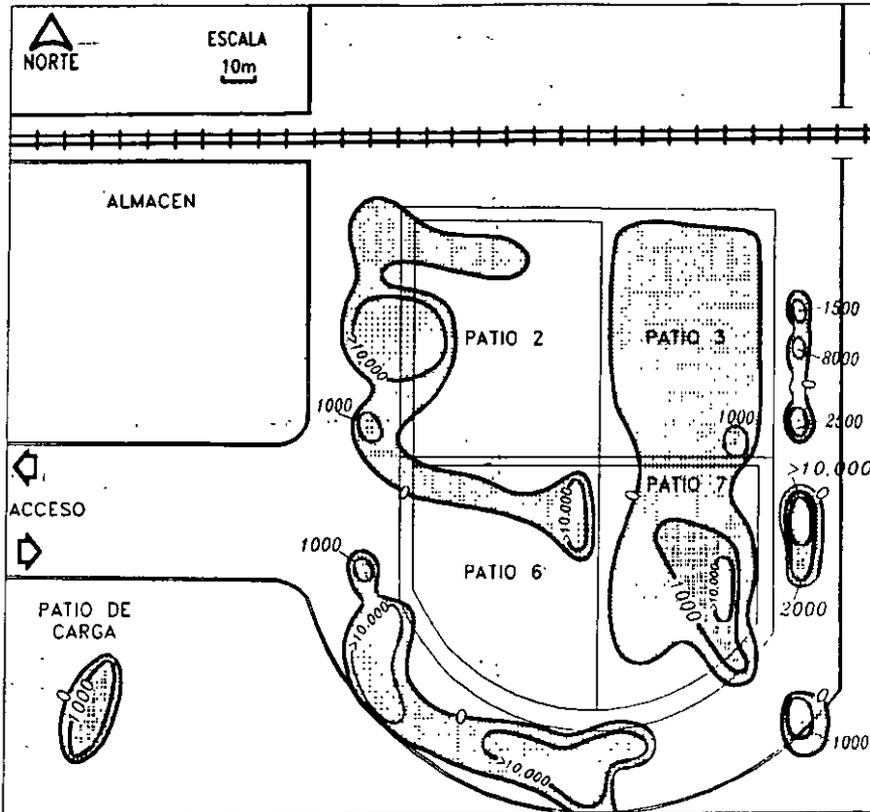


FIGURA 1A.-CONFIGURACION DE HIDROCARBUROS VOLATILES EN ppm A 0.90m DE PROFUNDIDAD

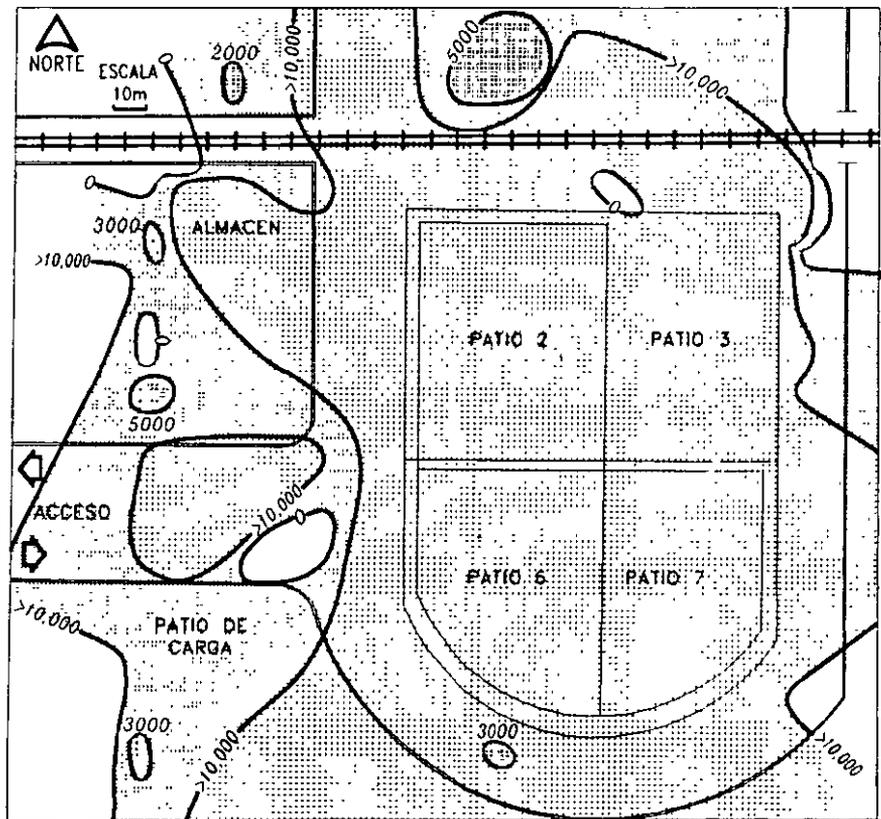


FIGURA 1B.-CONFIGURACION DE HIDROCARBUROS VOLATILES EN ppm MEDIDOS POR ARRIBA DEL NIVEL FREATICO

bien localizadas con concentraciones altas de hidrocarburos volátiles, hasta más de 10,000 ppm (1% v/v). Por lo que se respecta a la medición de hidrocarburos volátiles por arriba del nivel freático, se encontraron valores altos en prácticamente todo el predio (figura 1B).

La distribución del espesor de producto libre que se encontraba flotando sobre el nivel freático se muestra en la figura 2A, donde se observan espesores entre 10 y 30 centímetros, principalmente hacia la porción central de la zona de estudio.

Las muestras de producto libre presentaron diferentes coloraciones, desde el amarillo claro hasta un café verdoso muy oscuro. Inicialmente se consideró que el color tenía una relación directa con el tipo de combustible, pero después de los análisis se asumió que era una consecuencia del tiempo que los combustibles habían permanecido en el subsuelo y de los pigmentos naturales que se liberan por la presencia de los combustibles. De esta forma, los combustibles más frescos corresponden a las muestras de color más claro, mientras que los más antiguos al color más oscuro. Sin embargo, hubo casos en los que se encontraron gasolinas de color oscuro, con un alto contenido de los hidrocarburos más volátiles, seguramente debido a que la baja permeabilidad del suelo evitó su volatilización.

IDENTIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES CONTAMINANTES

Mediante análisis por cromatografía de gases de acuerdo al método EPA 8015 B (EPA, 1996), se identificó el tipo de combustibles presentes en el subsuelo, que en su mayoría fue diesel y en otros casos mezclas de diesel con gasolina. Por comparación de los perfiles cromatográficos obtenidos con mezclas de gasolina y diesel los cuales se usaron como estándar, se estimó la proporción de los combustibles presentes en las muestras extraídas del subsuelo. Los resultados se muestran en la figura 2B.

MOVIMIENTO DE LAS AGUAS FREÁTICAS

Se realizó una nivelación diferencial de la superficie del terreno, a la cual se le restó la profundidad al nivel del agua subterránea, obteniéndose de esta manera la elevación del nivel freático respecto al nivel del mar. Con los datos generados se construyó la

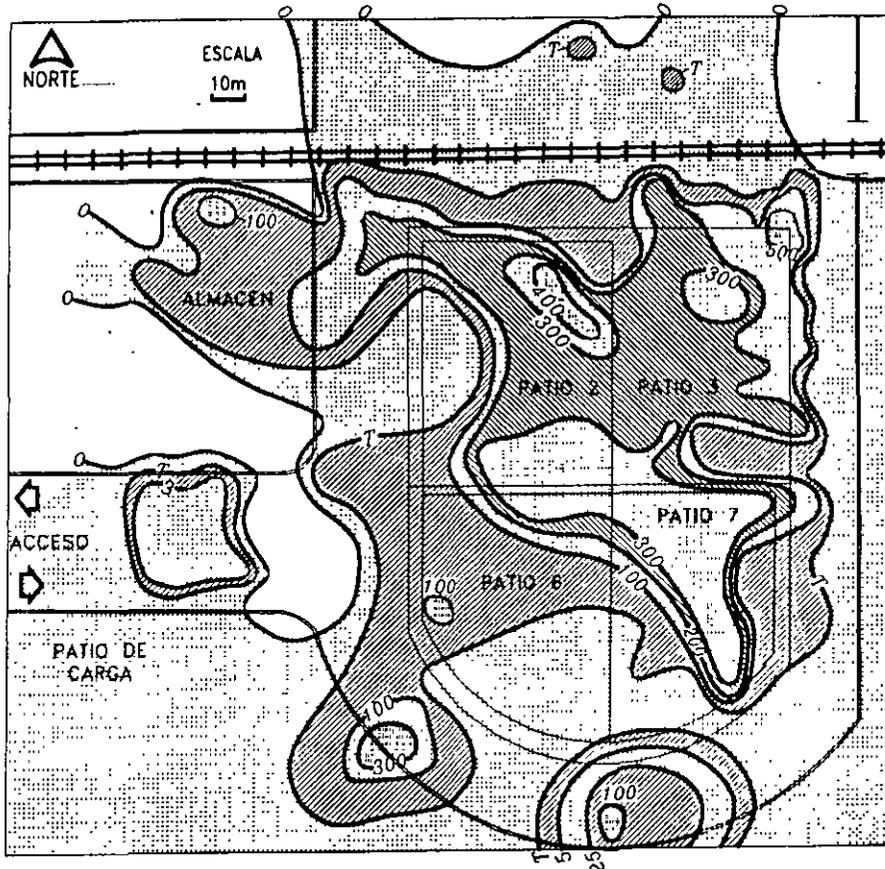


FIGURA 2A.- CONFIGURACION DEL ESPESOR DE PRODUCTO LIBRE EN mm; T=TRAZAS

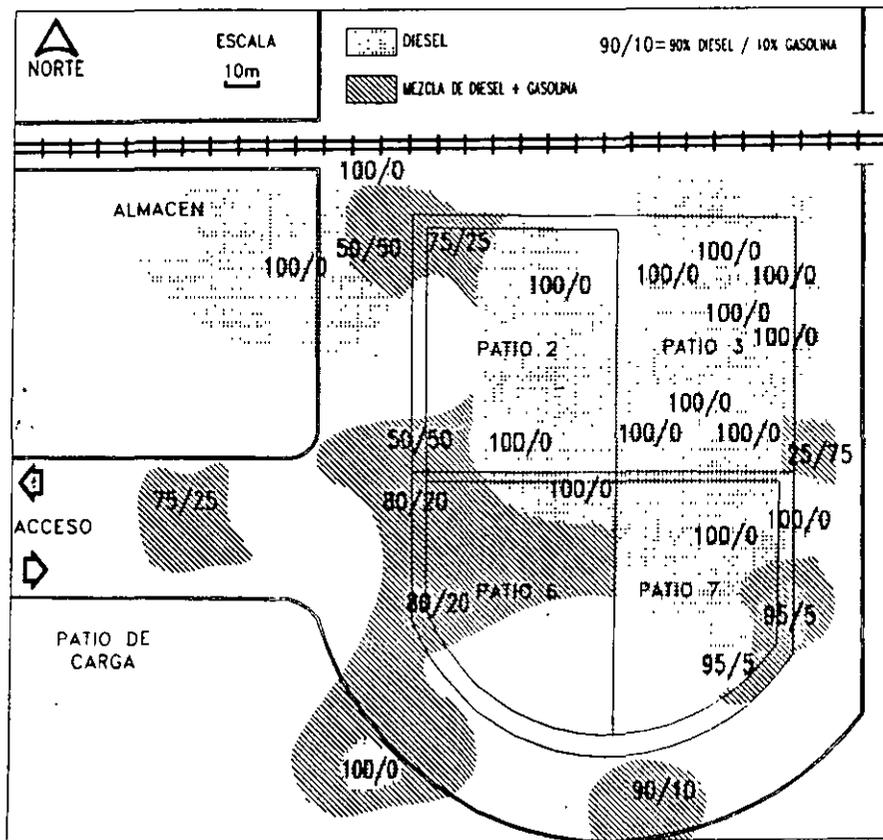


FIGURA 2B.- DISTRIBUCION DE GASOLINA Y DIESEL EN EL SUBSUELO

configuración que se muestra en la figura 3, donde se observan valores máximos en el patio 3, a partir de donde se forma una distribución radial la cual permite inferir la dirección de circulación de las aguas freáticas.

LITOLOGÍA DEL SUBSUELO

Para conocer la litología del subsuelo, se obtuvieron muestras continuas en 43 puntos distribuidos en todo el predio; el muestreo se realizó con cartuchos de acetato de 46.5 centímetros de longitud y 2.5 centímetros de diámetro, lo que permite la obtención de muestras de suelo inalteradas. En cada uno de los sondeos se obtuvieron de 3 a 4 núcleos, con los cuales se interpretó la litología. La profundidad de los pozos varió de 2.50 a 3.30 metros. Con los datos obtenidos se formó la sección geológica que se muestra en la figura 4A, donde se observa en la porción superficial, por debajo de la losa de concreto, una capa de arcilla y arena con espesor de aproximadamente 30 centímetros. A mayor profundidad se encontraron horizontes de materiales predominantemente arcillosos.

En la figura 4B correspondiente a la misma sección, se marcó la profundidad al nivel freático, la cual fluctúa alrededor de los 2 metros. Se hace notar que el nivel freático presenta ondulaciones, lo cual es un reflejo de la baja permeabilidad de las arcillas. En la misma figura 4B se marcó el espesor de producto libre flotando sobre el nivel freático, así como la zona donde fue evidente la presencia de hidrocarburos adsorbidos por las arcillas. Lo anterior demuestra que la heterogeneidad del subsuelo, da como resultado la existencia de zonas de mayor acumulación las cuales pueden estar muy cercanas a otras donde no existen rastros de contaminación.

Para conocer la permeabilidad del subsuelo se realizaron pruebas de tipo Lefranc de carga constante, de 0 a 1 metro y de 1 a 2 metros de profundidad. Los resultados obtenidos indicaron que la permeabilidad es reducida, del orden de 10^{-9} y 10^{-10} m/seg, lo cual confirmó que se trata de un material arcilloso, donde difícilmente puede circular un fluido. Este tipo de materiales presentan la propiedad de adsorber agua y no cederla, situación que también ocurre con los combustibles, donde las arcillas impiden que los contaminantes migren grandes distancias. Por la característica del suelo eminentemente arcilloso y de muy baja permeabilidad, el acuífero subterráneo que se encuentra a aproximadamente a 50 m de profundidad, se podría clasificar geohidrológicamente como poco vulnerable y de bajo riesgo de contaminación.

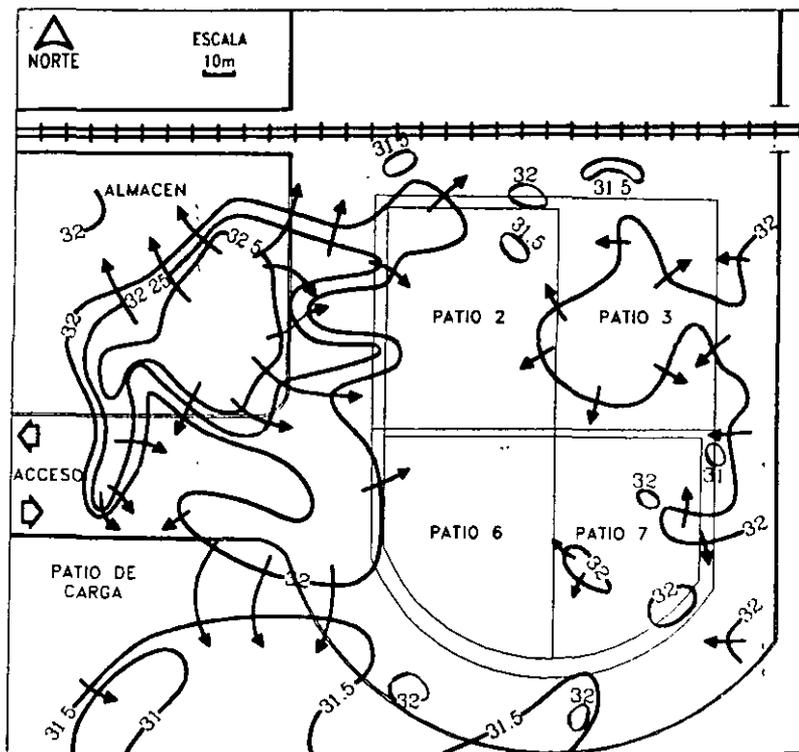


FIGURA 3.- CONFIGURACION DE LA ELEVACION DEL NIVEL FREATICO. → INDICA DIRECCION DEL FLUJO DE AGUAS FREATICAS; COTAS +2200 msnm.

DISCUSIÓN

La baja permeabilidad de las arcillas podría considerarse una ventaja, ya que impide que los hidrocarburos en el subsuelo circulen grandes distancias, sin embargo, esta misma baja permeabilidad es una limitante que ofrece grandes dificultades para la remediación del subsuelo (Lesser, 1995b).

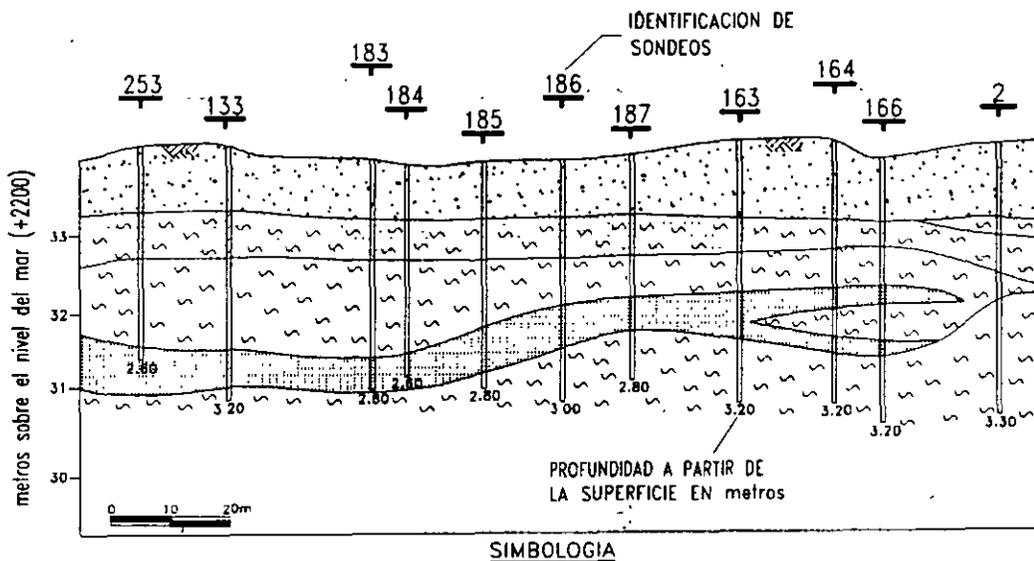
En casos de contaminación similares al presentado aquí, el saneamiento debe iniciar con una remediación física enfocada básicamente a la extracción de los combustibles en fase libre mediante pozos someros con caudales reducidos (Dragun, 1989). Posteriormente, se podría continuar con un lavado de suelo conocido como "flushing", el cual podría incluso aplicarse de manera simultánea a una biorremediación, para lo cual se podría analizar la capacidad degradadora de las bacterias nativas. Para este último caso, será también importante considerar las limitaciones que ofrece un suelo arcilloso, durante el suministro del oxígeno necesario para satisfacer los requerimientos metabólicos de las bacterias encargadas de la degradación de los hidrocarburos.

Experiencias bien documentadas, pero pocas de ellas publicadas, indican que para sitios de características similares al presentado serán necesarios de 5 a 10 años para demostrar evidencias firmes que aseguren el saneamiento del sitio (NGWA, 1998).

CONCLUSIONES

A través de la estrategia de prospección utilizada fue posible delimitar la zona de afectación en el subsuelo del sitio de estudio, debida a la presencia de hidrocarburos en fase libre, así como su influencia hacia los alrededores medida en forma de hidrocarburos volátiles y de explosividad. A pesar de que algunos de los derrames parecen haber ocurrido hace varios años, dicha afectación permanece "confinada" dentro de los límites del predio gracias al reducido movimiento de las aguas freáticas que es una consecuencia de la baja permeabilidad del material arcilloso.

El principal combustible contaminante en el subsuelo resultó ser diesel, aunque también se encontraron mezclas de diesel con gasolina. Su distribución es una función directa del tipo de producto derramado, aunque también tiene una importante influencia el



UBICACION: SECCION ESTE-OESTE AL CENTRO DEL PREDIO

FIGURA 4A.- SECCION MOSTRANDO EL TIPO Y DISTRIBUCION DE MATERIALES GEOLOGICOS QUE CONSTITUYEN EL SUBSUELO

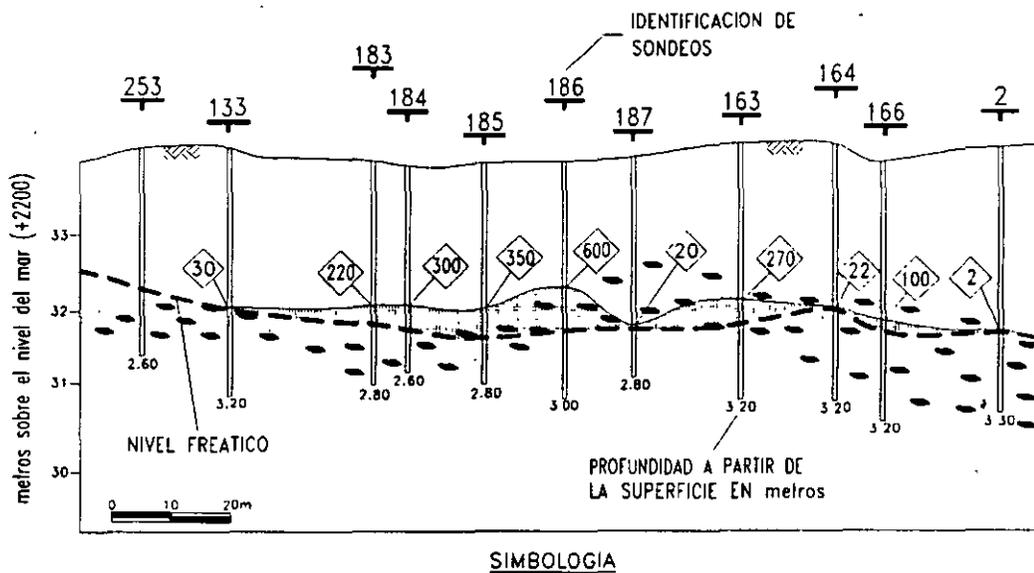


FIGURA 4B.- SECCION MOSTRANDO EL ESPESOR DE PRODUCTO LIBRE FLOTANDO SOBRE EL NIVEL FREATICO Y HORIZONTE CON HIDROCARBUROS ADSORBIDOS EN EL SUELO

movimiento vertical del nivel freático que se da entre las temporadas de lluvia y estiaje, así como la litología del subsuelo.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue patrocinado por la Gerencia de Protección Ambiental y Seguridad Industrial de Pemex Refinación. Los autores agradecen el apoyo de los Ings. Florentino Montiel y Roberto Martínez durante la ejecución de los trabajos en campo.

REFERENCIAS

- Dragun J., (1989). *Recovery Techniques and Treatment Technologies for Petroleum and Petroleum Products in Soil and Groundwater*. En *Petroleum Contaminated Soils Volume I*, Calabrese E.J. and Kostecki P.T. Eds., Lewis Publishers, Boca Raton, USA., 211- 217.
- Environmental Protection Agency (EPA), (1996). *Method 8015 B, Nonhalogenated organics using GC/FID*.
- Lesser J. M., (1995a). *Prospección de Contaminación por Hidrocarburos*. Revista del Colegio de Ingenieros Geólogos de México. Vol. 1, Núm. 6: pp 5-8.
- Lesser J. M., (1995b). *Saneamiento de Acuíferos Contaminados por Hidrocarburos*. Calidad Ambiental, Vol. II, Núm.5: pp 6-8.
- National Ground Water Association (NGWA), (1998). *Proceedings of the 1998 Petroleum hydrocarbons and organic chemicals in ground water: prevention, detection and remediation*.
- Saval S., (1998). *La reparación del daño. Aspectos técnicos: Remediación y Restauración*. En: *La responsabilidad jurídica en el daño ambiental*. UNAM-Petróleos Mexicanos, México, pp 209-235.
- Saval S., and Lesser J.M., (1998). *Behavior of Diesel Contamination in an Unconsolidated Clayey Soil*. Proceedings of 4th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development. Boston, MA, USA.

Abstract

On the subsurface of an industrial field, petroleum hydrocarbon spills were detected. The volumes and dates of the spills were unknown. The subsurface at this site is comprised of clay, functioning as an aquitard, with a thickness of 40 meters. The clay is saturated with a phreatic level 2 meters below ground surface. The clay has a very low hydraulic conductivity (10^{-9} m/sec) preventing migration of the hydrocarbons over large distances, affecting a relatively small area. The studied site has an area of approximately 6.5 hectares, where 274 shallow temporary monitoring perforations were completed. At these locations volatile hydrocarbons, explosivity, depth to phreatic level and the thickness of the free phase product floating on the phreatic level were measured. Practically all the zone showed more than 10 000 ppm (1% v/v) of volatile hydrocarbons above the phreatic level. The free phase product zone was delimited, having a thickness of 10 to 30 cm. Most of the free phase product was identified as diesel, and less frequently as a mix of diesel with gasoline. Chromatographic analyses of the free phase suggest that several spills have occurred at the site, possibly since it has been in operation.

Keywords: contamination, hydrocarbons, acuitard, permeability, volatile organic compounds, diesel, chromatography

Dirección institucional de los autores:

Juan Manuel Lesser Illades
Lesser y Asociados, S. A. de C.V.
Río Guadalquivir No. 3, Col. Pathé
Querétaro 76020, Qro., México
Tel. (4) 2231515
Fax (4) 2233361
Email: lesserjuanm@infosel.net.mx

Susana Saval Bohorquez
Instituto de Ingeniería, UNAM
Apartado Postal 70472
Ciudad Universitaria,
México, D.F. 04510
Tel. 5622-3324
Email: ssb@pumas.iingen.unam.mx

IDENTIFICACIÓN DE HIDROCARBUROS DERRAMADOS AL SUBSUELO Y ESTUDIO DE RIESGO EN UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL

Susana Saval, Instituto de Ingeniería, UNAM

Juan Manuel Lesser, Lesser y Asociados, S.A.

RESUMEN

Con la finalidad de identificar el tipo y concentración de los hidrocarburos derramados en el subsuelo de una instalación industrial, se realizaron análisis por cromatografía de gases a muestras de suelo, combustibles en fase libre y aguas freáticas. En la mayoría de las muestras de producto libre se encontró diesel y en algunas más, mezclas de diesel con gasolina. En las muestras de suelo provenientes de diferentes profundidades hasta 10 m, se encontró acumulación de hidrocarburos contaminantes en varios estratos, que podrían ser el resultado de diferentes eventos de derrame, del tipo de material geológico, o bien, de las fluctuaciones del nivel freático. En algunos puntos la concentración de diesel fue cercana a los 20000 mg/kg, mientras que la gasolina se encontró en concentraciones menores a 1000 mg/kg. También se detectó metilterbutiléter (MTBE) como parámetro indicador de la presencia de gasolinas oxigenadas, así como plomo orgánico, que es un constituyente de gasolinas antiguas. Respecto a los hidrocarburos monoaromáticos volátiles (BTEX), los xilenos se detectaron con mayor frecuencia, además de los hidrocarburos poliaromáticos cuya presencia se hizo evidente en casi todos los casos. A pesar de que el sitio está muy afectado, el hecho de que el principal combustible contaminante sea diesel y que este se encuentra "confinado" en el acuitardo por debajo de la losa de concreto, reduce los riesgos toxicológico, geohidrológico y de explosividad bajo las condiciones actuales del sitio.

Palabras clave: acuífero, acuitardo, análisis de contaminantes, diesel, hidrocarburos poliaromáticos, hidrocarburos monoaromáticos volátiles, riesgo.

INTRODUCCIÓN

Las instalaciones destinadas al almacenamiento y distribución de combustibles destilados están constantemente expuestas a derrames, los cuales pueden suceder accidentalmente o por malas prácticas de operación. La infiltración de los combustibles al subsuelo, así como su distribución en los diferentes estratos y su destino, están función de las condiciones del sitio y de las características propias del subsuelo, entre las cuales, el tipo de material geológico, la presencia de un nivel de agua y el comportamiento del contaminante juegan un papel fundamental. Los hidrocarburos por su baja densidad tienden a flotar en el agua, por lo que cuando se encuentran en fase libre forman una capa cuyo movimiento depende del movimiento del agua. Su interacción con las partículas de suelo se da por afinidad, en los estratos donde hay un mayor contenido de materia orgánica y un mayor tiempo de contacto se favorece más la adsorción, lo cual se traduce en una mayor concentración de contaminante en el suelo. Para entender este comportamiento, se requieren varios análisis los cuales a su vez deben aportar información relacionada con el tipo de combustible, la localización de la fuente, el tiempo que ha transcurrido desde el derrame, la presencia de sustancias potencialmente peligrosas, así como su efecto en el ambiente. Todos estos aspectos conforman un esquema completo de caracterización, sobre el cual se establece la responsabilidad jurídica y el grado de contaminación del suelo, y también sirve como base en la toma las decisiones para su remediación (Saval, 1998).

En este trabajo se presentan los resultados de análisis y la distribución de hidrocarburos en el subsuelo de un sitio contaminado, se discute su comportamiento en función de las características del subsuelo y se analiza el riesgo de la contaminación con tres enfoques diferentes: toxicológico, geohidrológico y de explosividad.

DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El sitio de estudio es una estación de almacenamiento de combustibles para abastecimiento de una zona industrial. El terreno ocupa un área de aproximadamente 6.5 hectáreas, donde se localizan tanques elevados distribuidos en 4 patios cuya superficie está pavimentada, y aunque no existen evidencias de derrames, en estudios previos se encontró presencia de hidrocarburos en

fase libre flotando sobre el nivel freático, que ocasionan lecturas de hidrocarburos volátiles superiores a 10000 ppm (1% v/v) en prácticamente todo el predio. La zona corresponde a una extensa planicie caracterizada por incluir una cubierta de materiales arcillosos con un espesor de alrededor de 40 metros. Existen horizontes de arena fina con arcilla, así como limos en diferentes proporciones, los cuales se encuentran saturados a partir de los 2 metros de profundidad, a la cual se detectó la presencia de producto en fase libre. Las pruebas realizadas en campo indicaron que la permeabilidad en los 2 m superficiales varía entre 10^{-9} y 10^{-10} m/seg, por lo que las arcillas se comportan como un acuitardo que absorbe y almacena agua, pero presenta poco movimiento (Lesser y Saval, 1999).

POZOS DE MUESTREO

Se perforaron pozos entre 3 y 10 metros de profundidad con ayuda de un rotomartillo que introduce cilindros muestreadores, los cuales llevan acoplados cartuchos de acetato de 46.5 cm de longitud y 2.5 cm de diámetro, esto permitió la obtención de muestras continuas e inalteradas de suelo para los diferentes análisis. Durante las perforaciones se obtuvieron también muestras de aguas freáticas y de producto en fase libre. Estas últimas fueron previamente seleccionadas en función de su localización dentro de la zona afectada y su contraste de color, que varió del amarillo al café verdoso muy oscuro.

ANÁLISIS DE CONTAMINANTES

Las muestras inalteradas de suelo, aguas freáticas y combustibles en fase libre se analizaron mediante métodos específicos para identificar el tipo y concentración de los contaminantes como sigue: gasolina y diesel (USEPA, 1996), hidrocarburos monoaromáticos volátiles y metilterbutiléter (USEPA, 1986a), hidrocarburos poliaromáticos (USEPA, 1986b) y plomo orgánico (USEPA, 1993).

IDENTIFICACIÓN DE COMBUSTIBLES EN FASE LIBRE

Se obtuvo el perfil cromatográfico típico para gasolina y diesel puros, cada perfil se considera como una "huella digital" que permite identificar la presencia de los combustibles (Baugh y Lovegreen, 1993; Potter, 1993). Se incluyeron también mezclas de gasolina y diesel en proporciones de 25:75, 50:50 y 75:25, cuyos perfiles sirvieron como referencia para establecer una proporción aproximada de los combustibles en las muestras de producto libre. En la figura 1 se presentan los 5 perfiles de referencia.

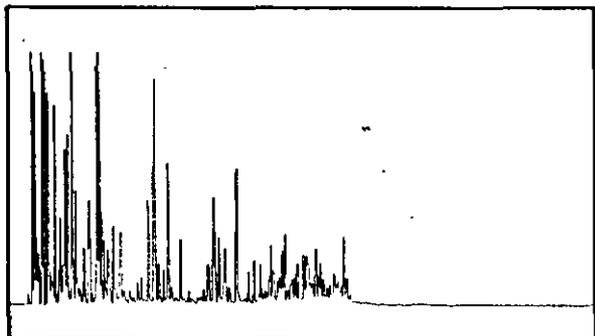
El perfil típico de gasolina presenta picos con tiempos de retención del orden de segundos hasta aproximadamente 15 minutos, mientras que el perfil típico de diesel se aprecia entre los 11 y 23 minutos. Los perfiles de las mezclas de gasolina y diesel presentan un gran número de picos que dan continuidad desde el inicio hasta los 23 minutos, pero se puede apreciar claramente la densidad de los picos que corresponden a la gasolina y al diesel. Por tratarse de una gasolina fresca en todos los casos están presentes los hidrocarburos volátiles de bajo peso molecular, que son los picos que sobresalen a tiempos de retención cortos; la presencia de éstos se detecta a pesar de que la proporción de gasolina en la mezcla sea baja.

En la figura 2 se ilustra la localización las muestras de producto libre y el perfil cromatográfico correspondiente. En el caso de gasolinas, se estimó el grado de intemperismo o antigüedad (indicado con la letra i) por comparación con los perfiles estándar de la figura 1. La presencia de picos con tiempo de retención corto indicó una gasolina ligeramente intemperizada (i*), mientras que la ausencia de picos indicó alto grado de intemperismo o antigüedad (i***).

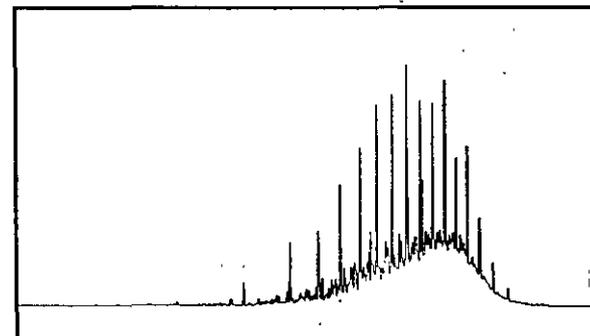
HIDROCARBUROS Y PLOMO ORGÁNICO EN SUELO

Las muestras de suelo fueron seleccionadas por su localización con respecto a la mancha de producto libre. La profundidad analizada se determinó previamente en función de su cercanía al nivel freático. Uno de los sondeos que se localizó fuera de la zona contaminada, se eligió como un punto blanco. Las muestras de los pozos 153 y 187, se analizaron desde la superficie hasta 3 m de profundidad, con el fin de conocer la distribución de los contaminantes adsorbidos. Las concentraciones fueron expresadas en mg/kg base seca.

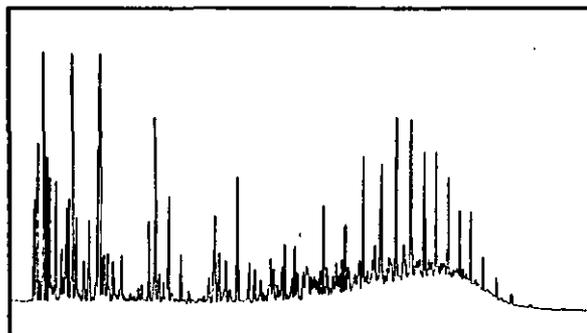
100% Gasolina



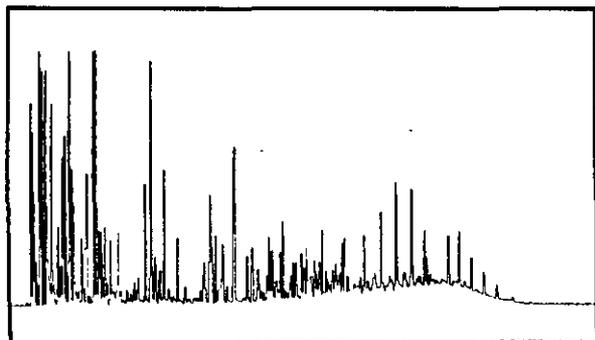
100% Diesel



50% Gasolina+ 50% Diesel



75% Gasolina + 25% Diesel



25% Gasolina + 75% Diesel

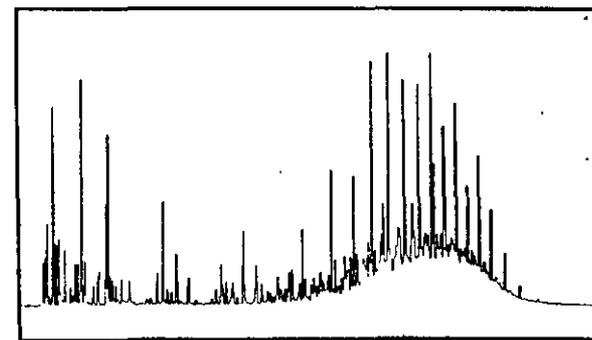


FIGURA 1. PERFILES CROMATOGRAFICOS DE GASOLINA, DIESEL Y MEZCLAS DE ESTOS.

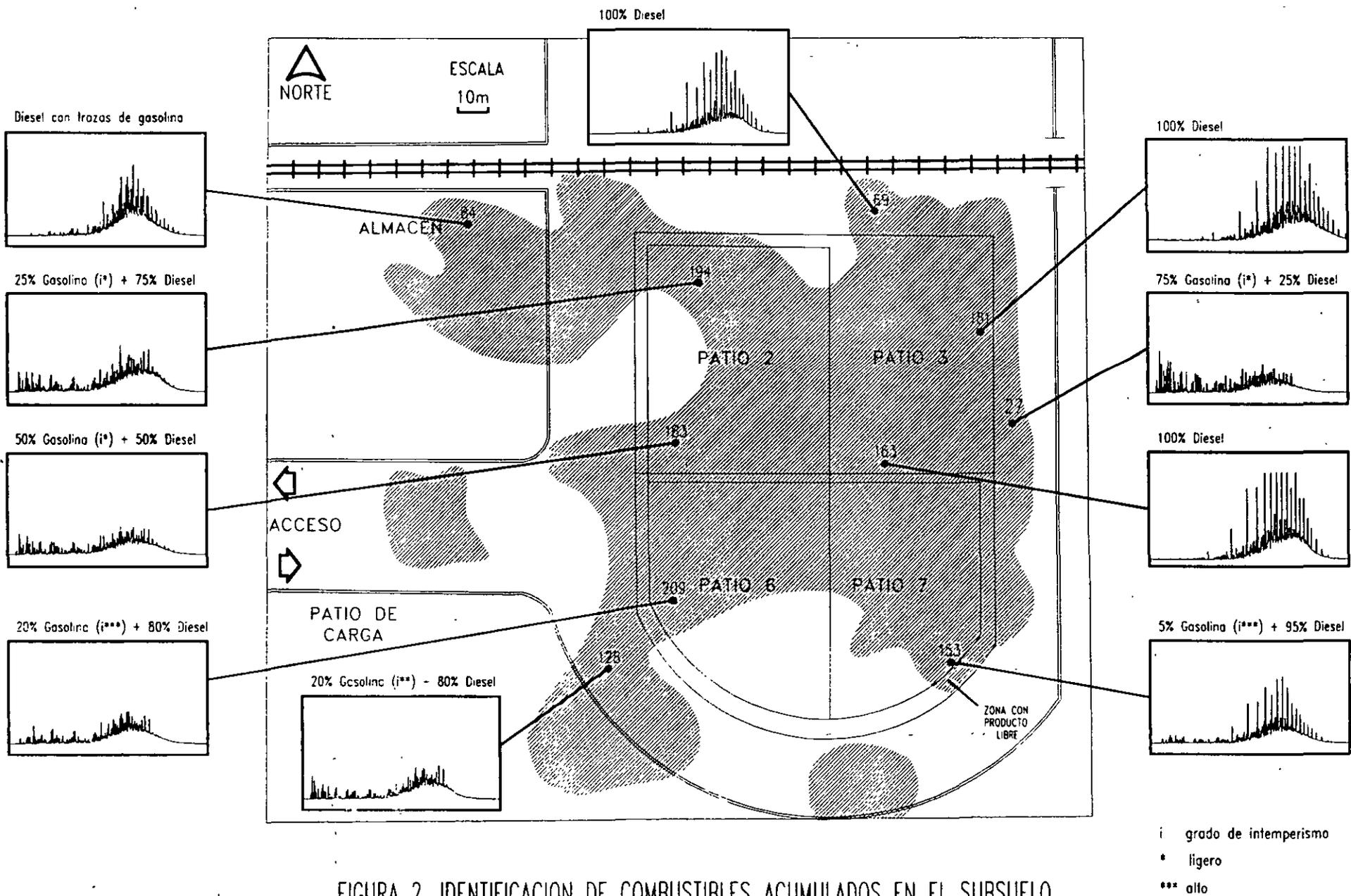


FIGURA 2. IDENTIFICACION DE COMBUSTIBLES ACUMULADOS EN EL SUBSUELO.

En la figura 3 se presentan las concentraciones de gasolina, diesel y plomo orgánico obtenidas en muestras cercanas al nivel freático. Las concentraciones más altas que se encontraron corresponden a diesel, especialmente en el punto 250 con 9579 mg/kg, en ese punto también se encontró la más alta concentración de plomo orgánico, de 1512 mg/kg. El perfil de diesel obtenido en el pozo 153 indica que la más alta concentración de diesel se alcanzó a los 2 m, mientras que para el pozo 187 fue a 1.40 m. El plomo orgánico mostró una distribución irregular en los dos sondeos.

En la figura 4 se presentan los resultados de análisis de hidrocarburos monoaromáticos volátiles (BTEX) y metilterbutiléter (MTBE). La presencia de benceno, tolueno y etilbenceno (BTE) en su mayoría fue no detectable, con excepción de los puntos 187 y 269 que sí estuvieron presentes aunque en bajas concentraciones. Los xilenos fueron los que se presentaron con mayor frecuencia, la más alta concentración se encontró en el pozo 269 con 25.678 mg/kg. Estos resultados son típicos cuando el contaminante es diesel. En varios puntos se detectó la presencia de MTBE, un componente típico de las gasolinas oxigenadas que se caracteriza por su alta solubilidad en agua.

La concentración de hidrocarburos poliaromáticos (HPAs) se presenta en la figura 5. Una mayor variedad de éstos se encontró en el pozo 175, donde incluso se detectó la presencia de benzo(a)antraceno a una concentración de 0.284 mg/kg. El perfil del pozo 153 indica una mayor acumulación de fenantreno y naftaleno a 1.60 m de profundidad, mientras que para el pozo 187, la acumulación parece estar por debajo del nivel freático a 2.50 m de profundidad.

Por lo que respecta a los muestreos profundos, los resultados que se presentan en la figura 6, indican que los estratos más contaminados se encontraron entre los 6 y 10 m de profundidad, donde las concentraciones de diesel fueron superiores a los 6000 mg/kg. Conviene mencionar aquí, que en algunos casos las características del subsuelo dificultan la obtención de muestras verdaderamente representativas debido a dos razones principales, la primera es que es necesario cruzar la capa de producto libre, y la segunda que en estratos con mayor contenido de arenas, los

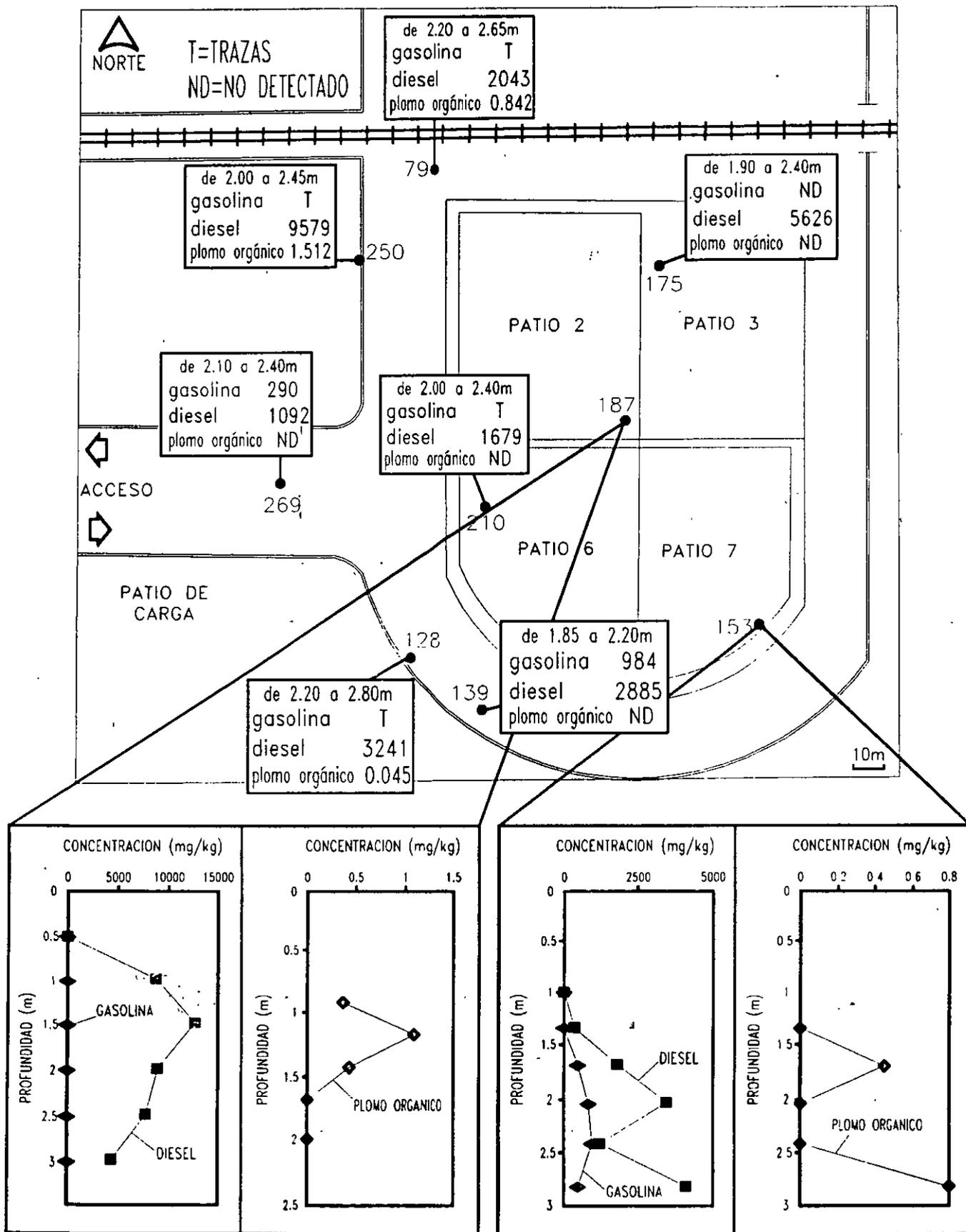


FIGURA 3.-GASOLINA, DIESEL y PLOMO ORGANICO EN MUESTRAS DE SUELO mg/kg, BASE SECA

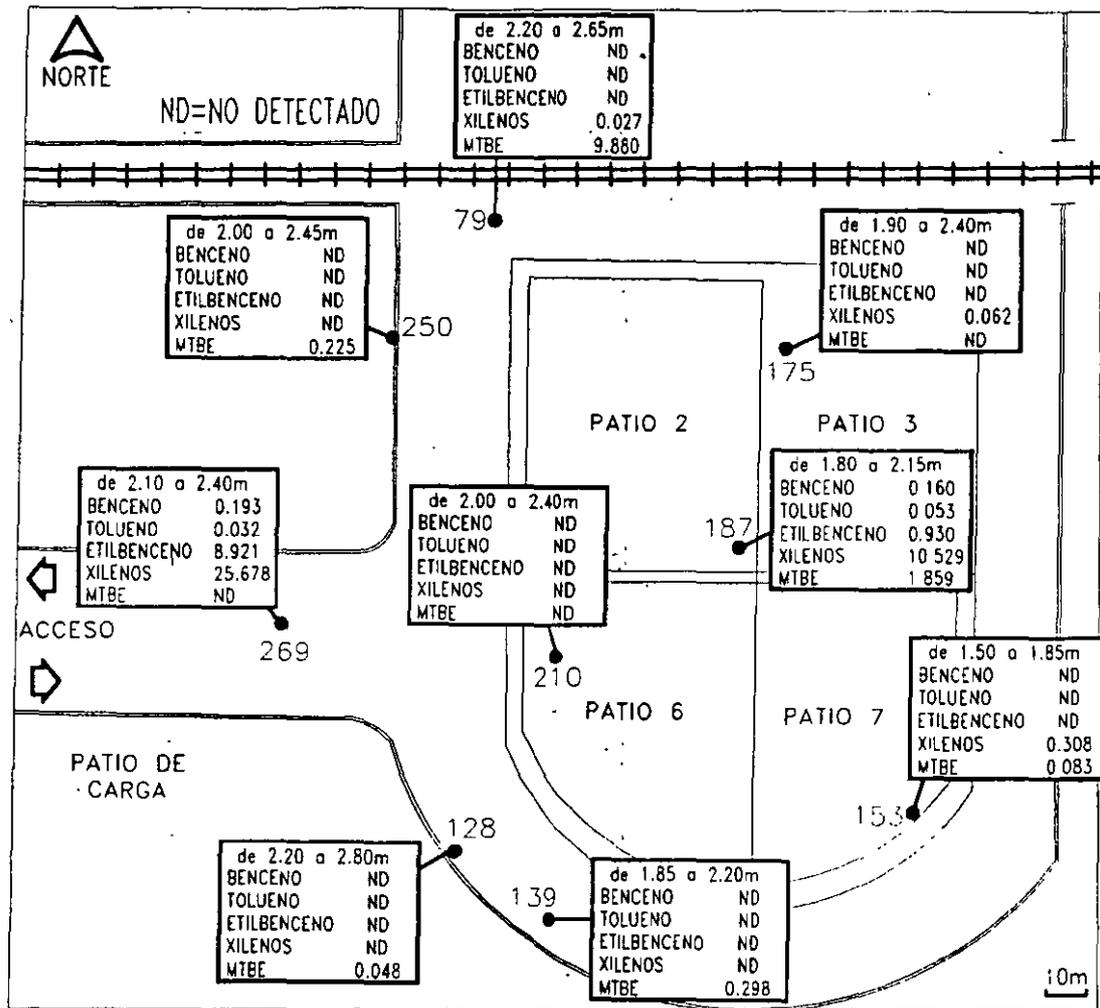


FIGURA 4.-HIDROCARBUROS MONOAROMATICOS VOLÁTILES (BTEX) Y METILTERBUTILETER (MTBE) EN MUESTRAS DE SUELO mg/kg, BASE SECA

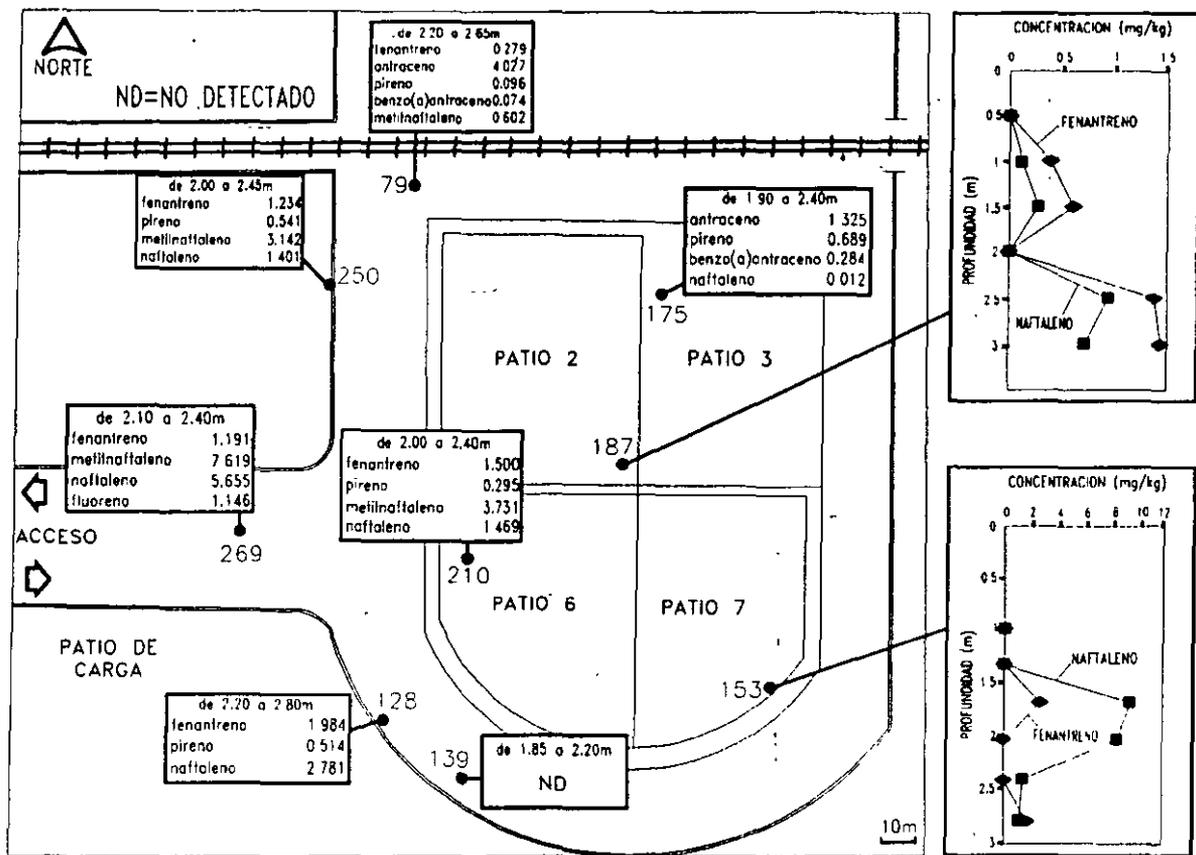


FIGURA 5.-HIDROCARBUROS POLIAROMATICOS (HPAs) EN MUESTRAS DE SUELO mg/kg. BASE SECA

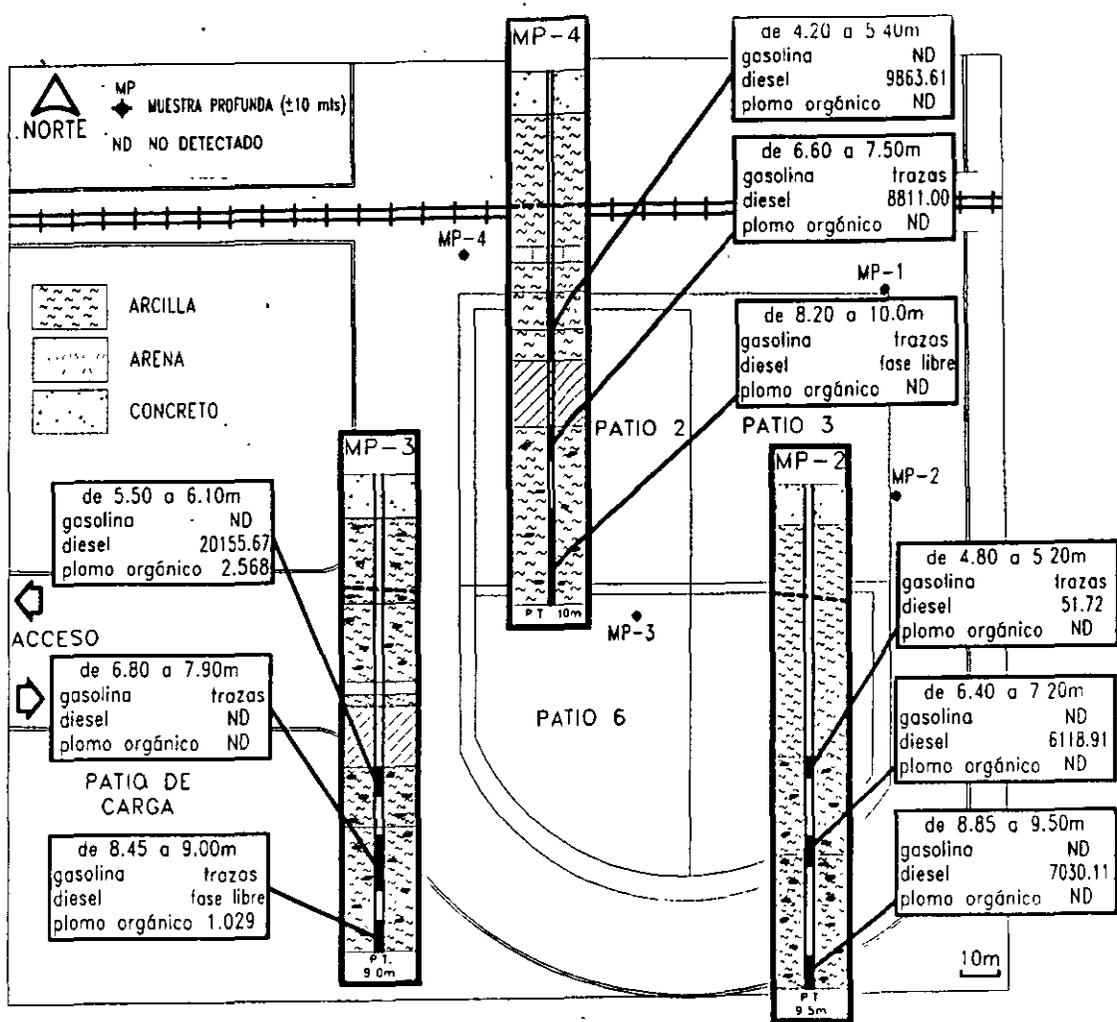


FIGURA 6.- GASOLINA, DIESEL Y PLOMO ORGANICO EN MUESTRAS PROFUNDAS DE SUELO mg/kg, BASE SECA

hidrocarburos se desorben fácilmente y pareciera que están en fase libre, aunque en el sitio mismo no ocurra así.

HIDROCARBUROS EN AGUAS FREÁTICAS

Las muestras de aguas freáticas se obtuvieron de 3 pozos localizados fuera de la mancha de producto libre, pero muy cerca de los límites de ésta. Los resultados indicaron concentraciones no detectables de BTEX y de MTBE, lo cual confirma que los hidrocarburos prácticamente no se mueven debido a la baja permeabilidad de las arcillas que conforman el subsuelo.

EVALUACIÓN DE RIESGO

Una vez que se obtuvo la distribución de los hidrocarburos se realizó la evaluación de riesgo, con tres enfoques diferentes: toxicológico, geohidrológico y de explosividad.

El riesgo toxicológico determina los posibles efectos adversos a la salud humana que puedan resultar como consecuencia de un derrame de contaminantes. En el estudio se identifican sustancias que por su naturaleza representan algún riesgo a la salud, así también, se determinan los diversos mecanismos naturales de transporte por los que pueden migrar. También, es posible definir el grado de peligrosidad de la contaminación, estimar los límites máximos permisibles para sustancias específicas y determinar las acciones correctivas, a fin de disminuir o eliminar los efectos potenciales al ambiente y a la población circundante.

La metodología utilizada en este estudio se fundamentó en los estándares de la USEPA (1989), así como en la metodología establecida por la ASTM (1995) y en las concentraciones de riesgo referidas por la USEPA (1999). Como punto de partida se utilizaron los resultados de análisis presentados anteriormente y junto con la información toxicológica de cada contaminante, se identificaron las sustancias de preocupación potencial (SPP). Entre ellas, el benceno que es carcinogénico a humanos por lo que pertenece a la clase A, así como el benzo(a)antraceno que es presumiblemente carcinogénico, con una categoría B2. El metilterbutiléter (MTBE) no tiene categoría carcinogénica, ya que es un compuesto novedoso que ha sido utilizado únicamente

como trazador. El antraceno no presenta movilidad, ni lixiviación, ni evaporación, se puede presumir que se queda estático en el suelo. En los casos donde la concentración de una sustancia se reportó como no detectable (ND), se consideró la mitad del límite de detección en los cálculos.

Para el estudio se establecieron 3 rutas de exposición: ingestión, contacto dérmico e inhalación de vapores por trabajadores y por residentes. A partir de la información generada se estableció que el sitio por sus características presentó un factor general de riesgo de cáncer de 3.17×10^{-3} , es decir, que uno de cada 317 residentes podría ser afectado por cáncer. El índice de riesgo por toxicidad, fue de 12.06, este valor corresponde al número de veces que está por encima de la dosis segura de exposición a los hidrocarburos analizados. Respecto a los límites permisibles, únicamente el metilnaftaleno resultó estar en una concentración más alta que la estimada a partir de los valores de referencia (USEPA, 1999).

El límite máximo permisible para gasolina y diesel en suelo, está considerado en los Criterios Interinos de Limpieza establecidos por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Cancino y col., 1998). En suelos de uso industrial, las concentraciones máximas deberán ser: gasolina 500 mg/kg, diesel 2000 mg/kg, benceno 50 mg/kg, xilenos 100 mg/kg y benzo(a)antraceno 8 mg/kg.

Para evaluar el riesgo geohidrológico o vulnerabilidad del acuífero profundo, se revisaron las características del subsuelo, como son: la profundidad al nivel estático, la recarga neta, el tipo de roca, el tipo de suelo, la pendiente del terreno, el material de la zona vadosa y su permeabilidad. De acuerdo con el programa DRASTIC, desarrollado por la USEPA, a cada una de las características anteriores se le da un número y un peso específico, al final se conjunta la información y se obtiene un valor que sirve como criterio para estimar el riesgo (Herr, 1987).

El sitio referido en este estudio se caracteriza por haber sido parte de antiguos lagos, consisten en arcillas desarrolladas a partir de tobas y cenizas volcánicas con espesor de 40 m que forman un acuitardo, o sea, un material que permite la entrada de agua, pero que la libera muy lentamente. Bajo las arcillas lacustres se encuentran depósitos aluviales con un espesor aproximado de 200 metros, donde se aloja el acuífero de la región. El nivel estático se encuentra a más de 45 m de

profundidad, la recarga neta es de 25 mm, prácticamente no hay pendiente y la permeabilidad es muy baja. Lo anterior, permite establecer que el sitio presenta un bajo riesgo geohidrológico.

Para analizar el riesgo de explosividad, se tomaron como referencia las lecturas de hidrocarburos volátiles superiores a 10 000 ppm (1% v/v) y de explosividad del 100 % LEL (Lower Explosion Limit) obtenidas en un estudio previo (Lesser y Saval, 1999). De acuerdo a la NFPA (1999) el diesel registra los siguientes índices: $NFPA_{Health}=1$; $NFPA_{Flammability}=2$ y $NFPA_{Reactivity}=0$, su temperatura de inflamación es de 52°C a 1 atm de presión y su volatilidad es baja. A partir de esta información se puede establecer que el riesgo de explosividad en el sitio es reducido, si se toma en cuenta que el problema de contaminación se encuentra “confinado” en el nivel freático y aislado del ambiente por una losa de concreto.

CONCLUSIONES

Los análisis realizados revelaron la acumulación de contaminantes en varios estratos del subsuelo, que podrían corresponder a diferentes eventos de derrame, a los diferentes tipos de material geológico o al movimiento vertical del nivel freático. Este último aspecto es importante, ya que representa un comportamiento cíclico, esto es, cuando el nivel freático se eleva durante la temporada de lluvias, la mayor parte de los hidrocarburos permanece en fase libre y sube junto con el nivel, mientras que otra parte se queda adsorbida en el suelo; posteriormente, cuando el nivel freático baja en la temporada de estiaje, los hidrocarburos ocupan el espacio liberado por el agua, permitiendo así su adsorción en el suelo. A diferencia del proceso anterior que es dinámico, la baja permeabilidad de las arcillas ha limitado el movimiento horizontal de los hidrocarburos en fase libre, por lo que éstos aún se encuentran dentro del predio.

El metilterbutiléter (MTBE) que es un parámetro indicador de la presencia de gasolinas oxigenadas, se detectó en la mayoría de las muestras analizadas, mientras que el plomo orgánico que es un constituyente de gasolinas tipo Nova, se detectó en muy pocos puntos. Lo anterior podría sugerir que el mayor volumen de gasolina derramada ha ocurrido dentro de los diez últimos años, a partir de la comercialización de la gasolina Magna. La presencia de xilenos,

además de los hidrocarburos poliaromáticos, es consecuencia de una mayor presencia de diesel, en proporción a la gasolina.

El principal problema de contaminación se refiere básicamente a la presencia de producto libre que flota sobre el manto freático y debajo de losas de concreto, por lo tanto no está expuesto a los trabajadores y mucho menos a los residentes. Los análisis químicos demostraron que la concentración de volátiles es reducida por lo que la emisión de vapores hacia los alrededores también es mínima.

A pesar de que los análisis toxicológico, geohidrológico y de explosividad obtenidos para este sitio en particular sugieren un bajo riesgo bajo las condiciones actuales, eso no significa que no deban tomarse medidas para remediar el sitio. La presencia de hidrocarburos en fase libre obliga en principio a una remediación física a través de alguna técnica de extracción, ya que de ocurrir una desestabilización del subsuelo por eventos naturales, como fracturas, o bien, por la ejecución de alguna obra civil en los alrededores, se podrían abrir caminos para facilitar la migración del producto libre hacia mayores profundidades. Si los hidrocarburos alcanzaran el acuífero, el riesgo geohidrológico aumentaría y esto a su vez se traduciría en un riesgo toxicológico, considerando que el agua del acuífero podría utilizarse para consumo humano.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue patrocinado por la Gerencia de Protección Ambiental y Seguridad Industrial de Pemex Refinación. Los autores agradecen el apoyo de los Ings. Florentino Montiel y Roberto Martínez durante la ejecución de los trabajos en campo, a los Ings. Miguel Angel Juárez y Eleazar Rojas durante los análisis de laboratorio y al Ing. Héctor Zegarra durante la realización de los estudios de riesgo.

REFERENCIAS

American Society for Testing and Materials (ASTM), 1995. *Standard Guide for risk-based corrective action applied at petroleum release sites*. Designation: E 1789-5, 51 pp.

- Baugh A.L. and Lovegreen J.R., 1993. Differentiation of Crude Oil and Refined Petroleum Products in Soil. En *Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*. Calabrese E.J. and Kostecki P.T. Eds., Lewis Publishers, Boca Raton, USA., 25-47.
- Cancino M.A., Rodriguera J.D. y Muñoz J.M., 1998. Restauración de sitios contaminados, el papel de la autoridad. *Teorema*, septiembre: 73-75.
- Herr R. S., 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. *Environmental Research Laboratory. National Ground Water Association*. Publisher Ada, Okla.
- Lesser J.M. y Saval S., 1999. Caracterización y comportamiento de la contaminación con hidrocarburos en un suelo arcilloso. Sometido para su publicación a la Revista de Ingeniería Hidráulica en México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- National Fire Protection Association (NFPA), 1999. Chemical Hazard Labels, <http://www.orebs.msu.edu/chemical>.
- Potter T.L., 1993. Analysis of Petroleum Contaminated Soil and Water. En *Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*. Calabrese E.J. and Kostecki P.T. Eds., Lewis Publishers, Boca Raton, USA., 1-14.
- Saval S., 1998. La reparación del daño. Aspectos técnicos: Remediación y Restauración. *La responsabilidad jurídica en el daño ambiental*. UNAM-Petróleos Mexicanos, México, pp 209-235.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1986a. *Method 8240*, Gas Chromatography / Mass Spectrometry for Volatile Organics.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1986b. *Method 8100*, Polynuclear Aromatic Hydrocarbons.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1989. Risk Assessment Guidance for Superfund Vol. I *Human Health Evaluation Manual* (Part A). US Department of Commerce, Washington.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1993. *Method 7240*, Flame Atomic Adsorption: Organic Lead.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1996. *Method 8015*, Nonhalogenated Organics using GC/FID.

REMEDIACIÓN *IN SITU* DE UN SUELO ARCILLOSO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS EN FASE LÍQUIDA Y ADSORBIDOS

Juan Manuel Lesser. Lesser y Asociados, S.A. de C.V.
Río Guadalquivir 3 Col. Pathé, Querétaro 76020, Qro. México
lesserjuanm@infosel.net.mx

Susana Saval*. Instituto de Ingeniería, UNAM
Apdo. Postal 70472 Cd. Universitaria 04510, D.F. México
ssb@pumas.iingen.unam.mx

RESUMEN

El subsuelo del sitio de estudio, que corresponde a un terreno industrial, está constituido por materiales arcillosos que se encuentran saturados y dan origen a un acuífero cuyo nivel freático se ubica a alrededor de 2 metros de profundidad. Como producto de derrames accidentales que ocurrieron en el pasado, se acumularon hidrocarburos en fase líquida con un espesor entre 10 y 30 cm. La baja permeabilidad de las arcillas, del orden de 1×10^{-9} m/seg, ha impedido que los hidrocarburos circulen grandes distancias, limitando el área de afectación a una zona relativamente reducida. Los hidrocarburos en su mayoría corresponden a diesel y en otros casos a mezclas de diesel con gasolina. Se inició la **remediación física** que consistió en la extracción del producto libre, del que se recuperaron 13,000 litros en 4 meses. Después de realizar varias pruebas en el laboratorio, se aplicó una **remediación química *in situ***, mediante la inyección de agentes tensoactivos en solución y la extracción del licor de tratamiento, es decir, la mezcla de agua subterránea, hidrocarburos disueltos y agentes tensoactivos. El suelo de la zona tratada mostró una reducción importante en la concentración de diesel y gasolina. Finalmente, el licor de tratamiento se sometió a una **biorremediación** en reactores a nivel piloto en superficie, donde se abatió la concentración de gasolina y la concentración de diesel se redujo de más de 17000 mg/l a menos de 350 mg/l.

Palabras clave: agentes tensoactivos, desorción, remediación física, remediación química, biorremediación

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

El sitio de estudio es una estación de almacenamiento de combustibles para abastecimiento de una zona industrial, cuya superficie de aproximadamente 6.5 hectáreas, está pavimentada. En estudios previos se encontró presencia de hidrocarburos en fase libre flotando sobre el nivel freático, que ocasionan lecturas de hidrocarburos volátiles superiores a 10000 ppm (1% v/v) en prácticamente todo el predio. La zona corresponde a una extensa planicie caracterizada por una cubierta de materiales arcillosos con un espesor de alrededor de 40 metros. Existen horizontes de arena fina con arcilla, así como limos en diferentes proporciones, los cuales se encuentran saturados a partir de los 2 metros de profundidad, a la cual se detectó la presencia de producto en fase libre en espesores entre 10 y 30 cm de espesor. Las pruebas realizadas en campo indicaron que la permeabilidad en los 2

m superficiales varía entre 10^{-9} y 10^{-10} m/seg, por lo que las arcillas se comportan como un acuífero que absorbe y almacena agua, pero presenta poco movimiento (Lesser y Saval, 1999). De los resultados de análisis se obtuvo la distribución de hidrocarburos en el subsuelo, se encontró que en su mayoría fue diesel en concentraciones tan altas como 20000 mg/kg, mientras que la gasolina se encontró en concentraciones menores a 1000 mg/kg. Se detectó la presencia de plomo orgánico y de metilterbutiléter lo cual indicó que se trata de gasolinas antiguas y oxigenadas, algunas de ellas con bajo grado de volatilización por estar confinadas en el subsuelo. Prácticamente no se detectaron benceno, tolueno y etilbenceno, pero si estuvieron presentes los xilenos, así como hidrocarburos poliaromáticos constituyentes típicos del diesel. A pesar de la presencia de producto libre en el subsuelo el riesgo a la salud y el riesgo geohidrológico resultaron ser bajos (Saval y Lesser, 1999).

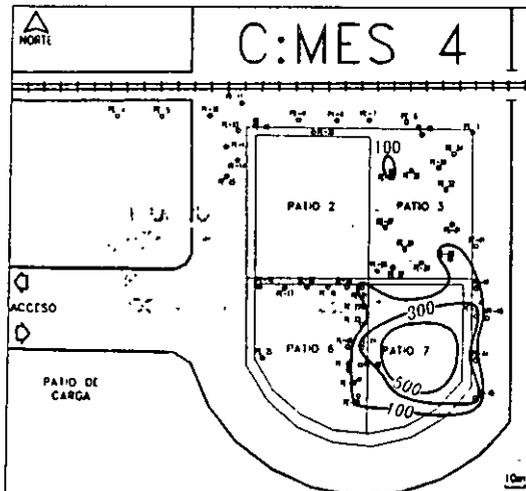
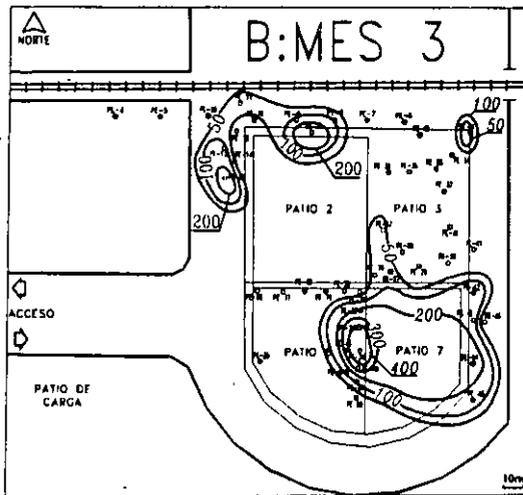
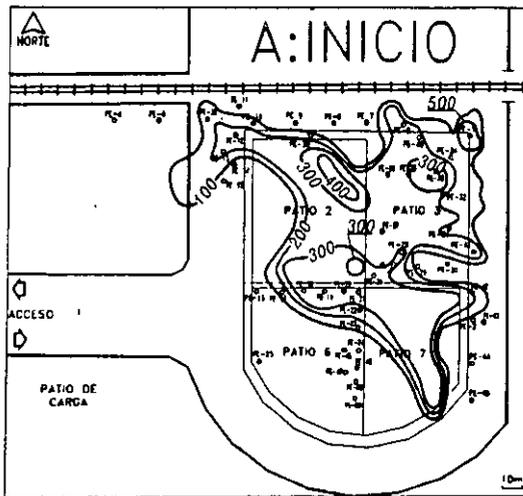


FIGURA 1.-CONFIGURACION Y EVOLUCION DE LA MANCHA DE PRODUCTO LIBRE
PE=POZO DE EXTRACCION

REMEDIACIÓN FÍSICA

La mancha de hidrocarburos en el subsuelo se delimitó mediante 274 perforaciones someras en las cuales se midió el espesor de producto libre durante la caracterización del sitio (Lesser y Saval, 1999). La configuración resultante se presenta en la Fig. 1A, en la que se observan espesores promedio entre 10 y 30 cm hacia la porción central del predio. También se presentaron algunas zonas con espesores de hasta 50 cm.

Para la remediación física se tomó como base la técnica de bombeo - tratamiento - inyección (Mackay and Cherry, 1989; Suthersan, 1997). Los componentes del sistema de remediación incluyeron: pozos de extracción, bomba, caja separadora y pozos de inyección. La bomba y la caja separadora se colocaron en un módulo metálico, que tiene ruedas giratorias para facilitar su movimiento aún en zonas de difícil acceso (figura 2).

Se perforaron 50 pozos de extracción con diámetro de 8.9 cm y 4 m de profundidad. En su interior se colocó tubería de PVC hidráulico de 6.35 cm de diámetro, liso de 0 a 1.80 m y con ranurado de 1.80 a 4.00 m. En la boca de los pozos se colocó un tapón de rosca y brocal de concreto. Se calculó el radio de influencia del bombeo en los pozos, considerando una transmisibilidad media de $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$ y un coeficiente de almacenamiento de 0.05, con ello se obtuvo un radio de 4 metros. Los pozos de extracción se localizaron en puntos donde se permitió el acceso tratando de mantener la equidistancia entre pozos en no más de 8 metros. También se tomó en cuenta la dirección del flujo de las aguas freáticas que previamente se determinó (Lesser y Saval, 1999).

Una bomba a prueba de explosión para la extracción de producto libre, se conectó a una tubería plástica de 2.54 cm de diámetro con 5 derivaciones de 0.64 cm de diámetro interior; con lo cual se realizó el bombeo simultáneo de 5 pozos. Al reducir el caudal se evitó el agotamiento de los pozos y se logró extraer preferentemente el producto líquido localizado en la parte superficial. La mezcla agua / combustible extraída del subsuelo se envió a una caja separadora, diseñada y construida *ad hoc* donde, después de un tiempo de reposo, se permitió la separación de fases por la diferencia de densidades con lo cual se recuperaron agua y combustibles por salidas independientes. El

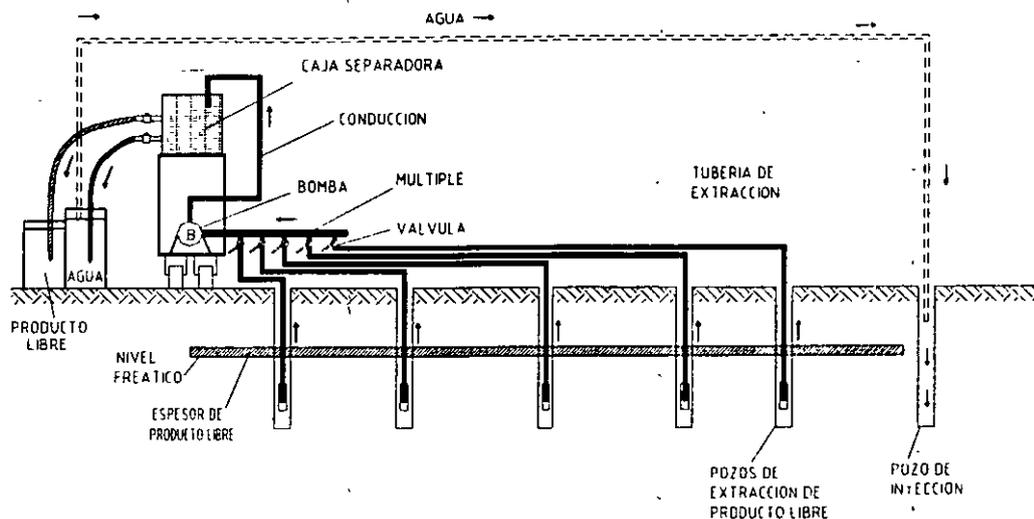


FIGURA 2.-SISTEMA DE EXTRACCION DE PRODUCTO LIBRE

agua libre de combustibles se devolvió al subsuelo inyectándola por gravedad en pozos localizados topográficamente más arriba.

Durante los trabajos de extracción se notó una mayor acumulación de producto libre hacia el patio 6, donde se localizaron un importante número de pozos, esto se tradujo en un mayor volumen de extracción en esa zona. La acumulación de producto se vió favorecida por el movimiento natural de las aguas freáticas que se dió en esa dirección. Después de 3 meses de extracción constante, la mancha de producto libre se redujo de manera importante, de tal forma que en el patio 3 prácticamente desapareció y solo se detectaban trazas, como se presenta en la figura 1B. En los patios 2 y 7, no fue posible perforar pozos de extracción debido a las actividades que ahí se realizaban, por lo que el patio 7 se convirtió en el centro de la mancha de producto libre. Esto último se confirmó en la configuración obtenida a los 4 meses (figura 1C).

El espesor de producto libre mostró una notable disminución, como ejemplo se presentan los valores obtenidos para los pozos PE-27 y PE-50. Cabe hacer notar que para estas mediciones

los pozos se dejaron reposar 3 días, con el fin de asegurar la confiabilidad de las lecturas.

Los dos primeros meses de operación fueron realmente de prueba y perforación de nuevos pozos de extracción en el patio 6, por lo que el volumen de producto libre extraído fue bajo. Entre los meses 3 y 4 la extracción aumentó notablemente. El volumen total de agua subterránea extraída, libre de combustible, fue de 332000 litros, los cuales se inyectaron al subsuelo por gravedad. En la figura 4A se presentan las cifras diarias de agua y producto libre que se extrajeron del subsuelo, aquí se puede apreciar que el ritmo de extracción se mantuvo prácticamente constante. Este comportamiento se reflejó también en la figura 4B, donde se graficaron los volúmenes acumulados y se observa una tendencia al aumento. En las dos gráficas se utilizó una escala logarítmica para facilitar la presentación de los resultados. La elevación del nivel freático, que fue también monitoreada periódicamente, mostró fluctuaciones de hasta 50 cm entre la época de lluvias y de estiaje (fig. 5). Esta situación es importante, ya que al bajar el nivel, los espacios porosos son ocupados por el producto libre y al subir nuevamente el nivel una

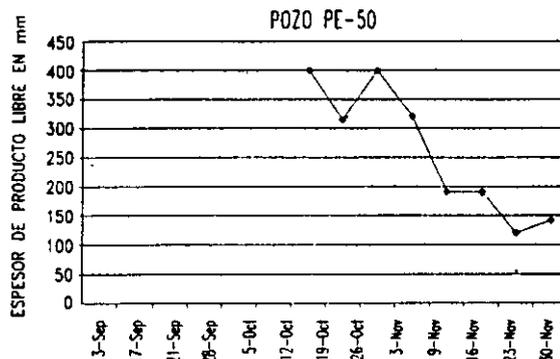
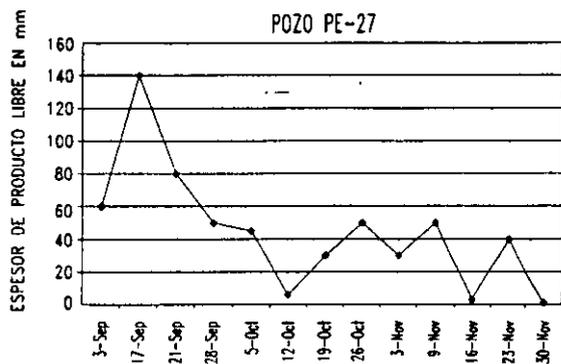


FIGURA 3.-EVOLUCION DEL ESPESOR DE PRODUCTO LIBRE EN POZOS DE EXTRACCION

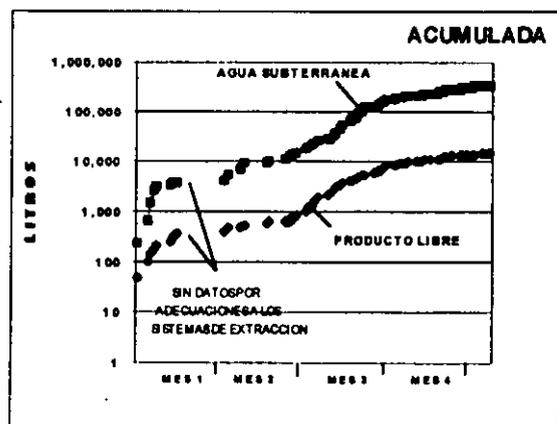
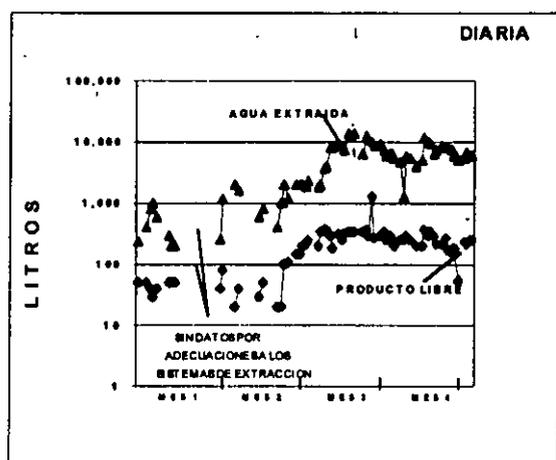


FIGURA 4.- VOLUMEN DE EXTRACCION DE PRODUCTO LIBRE Y AGUA SUBTERRANEA

parte del combustible queda adsorbido por la estructura del suelo y otra queda libre flotando sobre el nivel.

REMEDIACIÓN QUÍMICA *IN SITU*

La remediación química que se aplicó fue un lavado con agentes tensoactivos, que comúnmente se conoce como "flushing". Consiste en desorber los hidrocarburos que están adheridos al material geológico y combinarlos con en el agua para facilitar su extracción (Abdul *et al.*, 1990; Fortin and Anderson, 1997; Liu *et al.*, 1991; Wilson and Wyatt, 1989).

Previamente se realizaron pruebas de tratabilidad química en el laboratorio utilizando columnas de vidrio de 3 cm de diámetro y 40 cm de longitud, empacadas con suelo contaminado extraído del lugar. Las pruebas consistieron en aplicar 4 diferentes formulaciones de agentes tensoactivos, las cuales se eligieron de acuerdo a su facilidad de disolución en grandes volúmenes de agua, su biodegradabilidad, su disponibilidad en el mercado, su seguridad en el manejo y su costo. La efectividad del tratamiento en las columnas se pudo observar a simple vista, ya que la solución de tensoactivos al 5% en agua que generalmente fue incolora, cambió a un color oscuro a la salida de la columna. Esto se interpretó como una desorción de los hidrocarburos, mientras el agente tensoactivo fluye a través del suelo contaminado. Este fluido de color oscuro, que se denominó licor de tratamiento, es una sola fase que toma la coloración de los combustibles presentes. La efectividad de cada formulación se verificó al cuantificar la concentración de hidrocarburos en

el licor de tratamiento. El producto que dió los mejores resultados en columnas se utilizó para la prueba de demostración en campo.

Esta técnica de remediación química es efectiva únicamente si se mantiene una constante dinámica en el subsuelo, la cual se logró a través de la extracción e inyección de acuerdo al sentido del flujo subterráneo, con ello se promovió la movilización de los hidrocarburos que están adsorbidos en el material geológico.

Durante la remediación química se inyectaron agentes tensoactivos en pozos localizados en el patio 3, en los que ya no se detectó la presencia de producto en fase libre. Cada volumen de aplicación fue de 500 litros, se dejó fluir por gravedad y enseguida se inyectaron por lo menos 3000 litros de agua proveniente del sistema de separación, antes de una nueva inyección de tensoactivos. Se dió seguimiento al movimiento de los tensoactivos en el subsuelo, los cuales incluso sirvieron como trazadores por el color y apariencia del licor de tratamiento.

Después de un mes de haber aplicado los agentes tensoactivos se realizó un muestreo

continuo en el punto identificado como 356, el cual se localizó dentro del patio 3 muy cerca del pozo donde se inyectaron tensoactivos y en dirección a donde corre el agua subterránea (figura 6). Los resultados se presentan en forma de perfil en la misma figura, el cual se comparó con el del sondeo 187, localizado dentro del patio 2 que meses atrás se localizaba dentro de la mancha central de producto libre y contenía diesel en concentración superior a 12000 mg/kg. Como consecuencia de las acciones de remediación, la concentración de diesel se redujo a menos de 3000 mg/kg.

BIORREMEDIACIÓN

El licor de tratamiento fue sometido a pruebas piloto de biorremediación, utilizando cultivos de bacterias degradadoras de diesel y gasolina que se desarrollaron en el laboratorio. La biorremediación consistió en promover la actividad de las bacterias degradadoras por adición de sales minerales en forma de fertilizantes y suministro de oxígeno. Se llevó un registro del pH como una medida indirecta de la actividad microbiana y al final de cada lote que

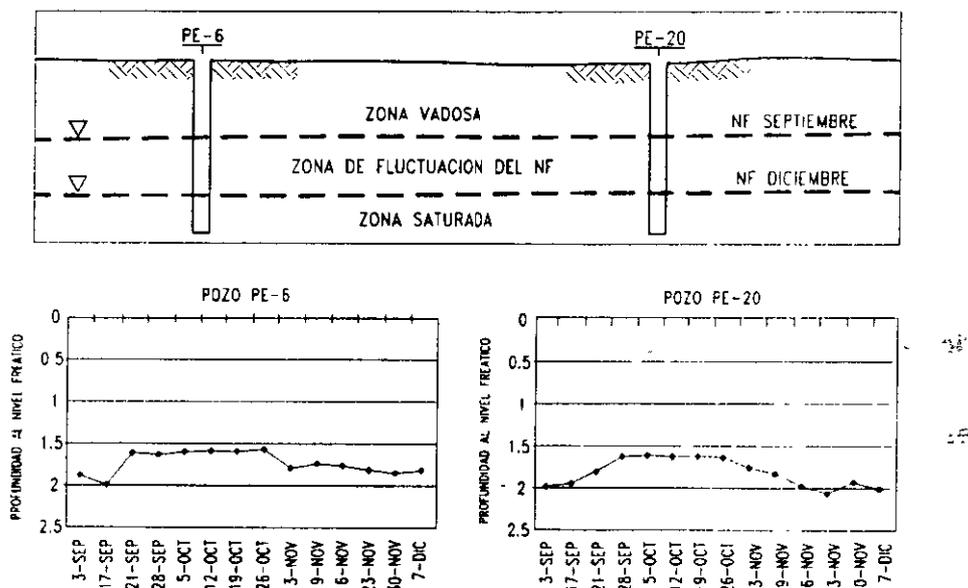


FIGURA 5.-VARIACION DE LA PROFUNDIDAD AL NIVEL FREATICO (NF) EN POZOS DE EXTRACCION

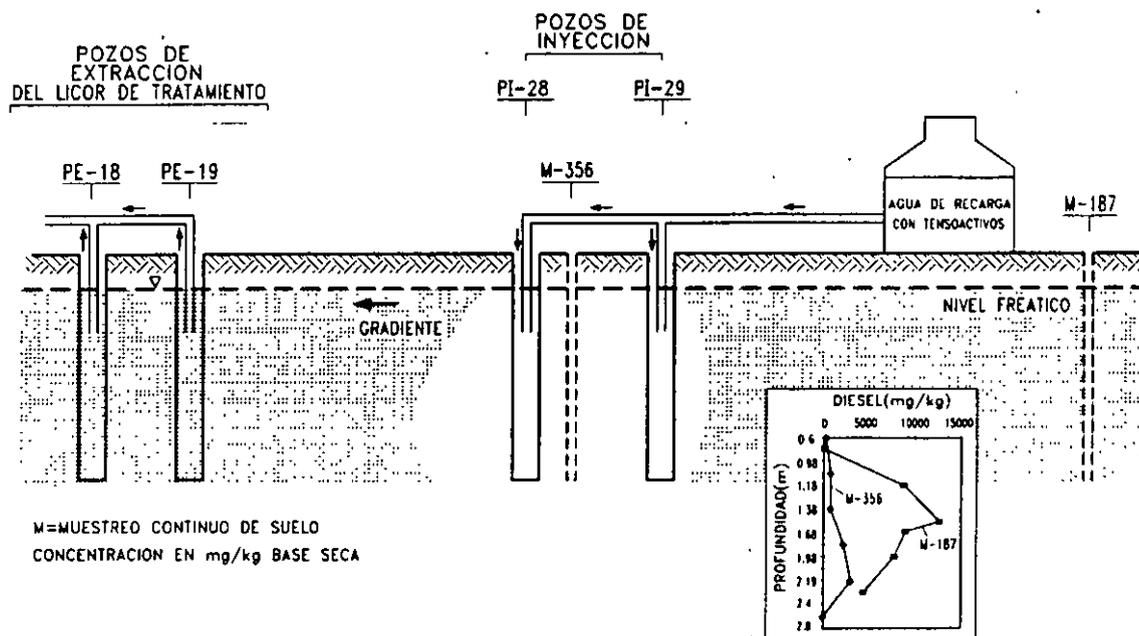


FIGURA 6.-REMEDIACION QUIMICA IN-SITU: DESORCION DE HIDROCARBUROS CON AGENTES TENSOACTIVOS

duró en promedio 8 días se cuantificó la concentración de combustibles residuales y se confirmó la presencia de bacterias degradadoras. En todas las pruebas se redujo notablemente el contenido de combustibles de 20000 mg/l a menos de 300 mg/l para diesel y el contenido de gasolina fue no detectable. Sin embargo, se hicieron evidentes el largo tiempo requerido para reducir la concentración de combustibles por esta vía, así como los altos requerimientos de oxígeno.

Los resultados de las pruebas son una evidencia de que la biorremediación del agua subterránea puede realizarse con éxito, siempre y cuando esté acoplada a la remediación química con agentes tensoactivos y a la extracción/inyección de agua subterránea.

DISCUSION

La remediación de suelos contaminados es un tema de actualidad a nivel mundial, pero pocos estudios de casos específicos en México han sido publicados. Lo presentado aquí constituye una experiencia en campo donde se acoplaron tres técnicas de remediación cuya base de funcionamiento es diferente, que visto de otra forma constituyen un tren de tratamiento en el siguiente orden: una remediación física, seguida

de una remediación química y finalmente una biorremediación.

De hecho, la remediación de suelos debe enfocarse de esa manera, dado que una sola técnica no es suficiente para remover los contaminantes de un suelo afectado.

El aspecto más importante del estudio realizado, es que se trata de un suelo arcilloso, cuya característica impermeable hace más difícil la aplicación de cualquier técnica de remediación. Por ejemplo, en la etapa inicial de extracción del producto libre, se probaron diferentes estrategias de bombeo, que no funcionaron adecuadamente debido a que el propio suelo impone un caudal de extracción bajo. Esto último se traduce en tiempos muy largos y costos muy elevados para la remediación, que se deben reducir. En el caso específico de este estudio se decidió perforar un importante número de pozos cuyo radio de influencia pudiera cubrir el área de mayor afectación, además de atender la extracción de manera simultánea en cinco pozos diferentes con cada unidad de bombeo y la inyección de agua libre de hidrocarburos en pozos aguas arriba. Con estas tres acciones se aumentó el volumen de extracción y se logró mantener a un ritmo constante.

Por lo que respecta a la remediación química, su aplicación en las zonas donde se abatió el producto en fase libre, logró desorber los hidrocarburos que se habían quedado en el material geológico. Aunque los resultados fueron evidentes a simple vista, los análisis realizados a muestras de suelo a 3 m de profundidad, comprobaron la eficiencia del tratamiento. Dos elementos fueron importantes en este caso, la elección de los agentes tensoactivos a partir de las pruebas de tratabilidad en el laboratorio y la constante inyección de agua al subsuelo después de cada aplicación. Aquí conviene mencionar, que el hecho de devolver al subsuelo el agua extraída con la finalidad de acelerar el flujo subterráneo trae una ventaja adicional, ya que si se dejara en superficie sería necesario darle algún tratamiento antes de su disposición final.

En lo que toca a la biorremediación del agua subterránea, técnicamente funcionó bastante bien, ya que se redujo de manera importante la concentración de combustibles. Sin embargo, los altos requerimientos de oxígeno hacen muy costoso el tratamiento, por lo que todavía se requiere de más trabajo para facilitar su aplicación en mayor escala.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una estrategia adecuada para la extracción de hidrocarburos en fase libre acumulados en el subsuelo de tipo arcilloso, con lo cual se avanzó de manera importante en la remediación física.

Se demostró la efectividad de la remediación química *in-situ* mediante la inyección al subsuelo de agentes tensoactivos disueltos en agua, los cuales lograron remover los hidrocarburos adsorbidos al material geológico.

La biorremediación en superficie del agua subterránea fue una técnica efectiva para la degradación de los combustibles presentes, sin embargo, aún no representa una alternativa económica para su aplicación en escala real.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue patrocinado por la Gerencia de Protección Ambiental y Salud Ocupacional de Pemex Refinación. Los autores agradecen la participación de Florentino Montiel, Roberto Martínez, Francisco Ordoñez, Héctor Zegarra,

Norma Pérez y Alma Guzmán durante la ejecución de los trabajos en campo y en el laboratorio.

REFERENCIAS

Abdul A.S., Gibson T.L., and Rai D.N., 1990. Selection of surfactants for the removal of petroleum products from shallow sandy aquifers. *Ground Water* 28: 920-926.

Fortin W.A. and Anderson M.A., 1997. Enhanced removal of trapped non-aqueous phase liquids from saturated soil using surfactant solutions. *J. Contam. Hydrol.* 24: 247-268.

Lesser J.M. y Saval S., 1999. Caracterización y comportamiento de la contaminación con hidrocarburos en un suelo arcilloso. Sometido para su publicación a la *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Liu Z., Laha S. and Luthy R.G., 1991. Surfactant solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in soil - water suspensions. *Wat. Sci. Tech.* 23: 475-485.

Mackay D.M. and Cherry J.A., 1989. Groundwater contamination: pump - and - treat remediation. *Environ. Sci. Technol.* 23(6): 630-636.

Saval S., 1998. Biorremediación: alternativa para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados con hidrocarburos. *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Año 10 No. 34, enero-febrero: 6-9.

Saval S. y Lesser J.M., 1999. Identificación de hidrocarburos derramados al subsuelo y estudio de riesgo en una instalación industrial. Sometido para su publicación a *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Revista de la Federación Mexicana de Ingeniería y Ciencias Ambientales, A.C.

Suthersan S.S., 1997. Remediation Engineering Design Concepts. Ed. CRC Lewis Publishers. Boca Raton.

Wilson D.J. and Wyatt J.H., 1989. Soil clean-up by *in situ* surfactant flushing. Theory of micellar solubilization separation. *Sci. Technol.* 24: 905.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

TEMA :

CONTAMINACIÓN POR ACUÍFEROS Y RELLENOS SANITARIOS

**ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE – OCTUBRE 1999**

GASOLINERA

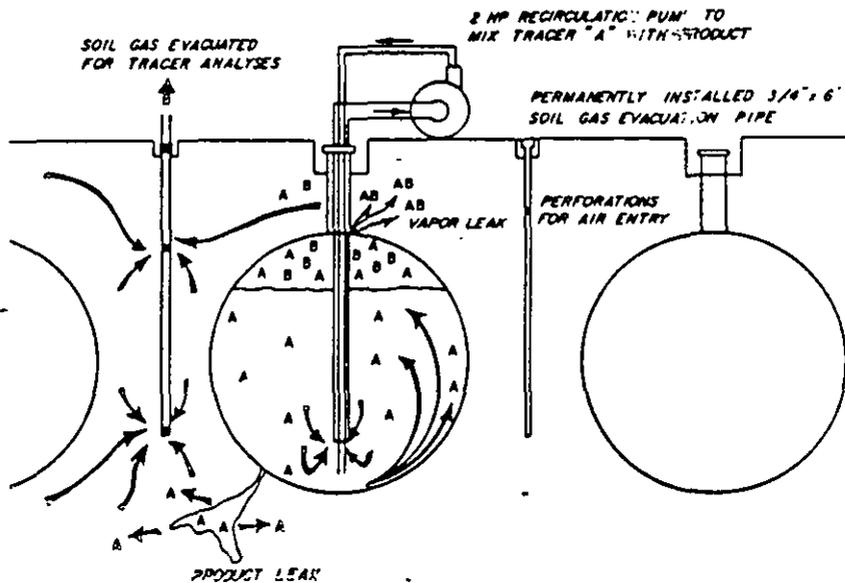
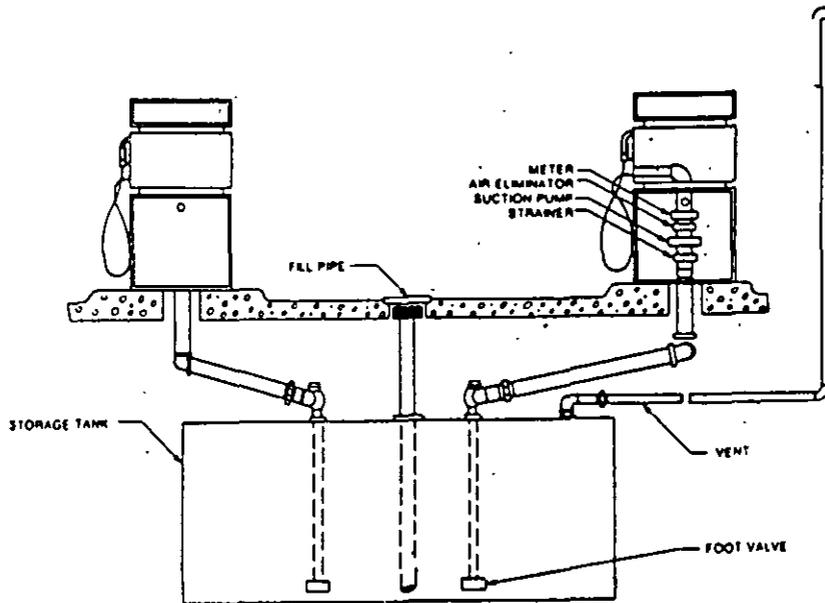
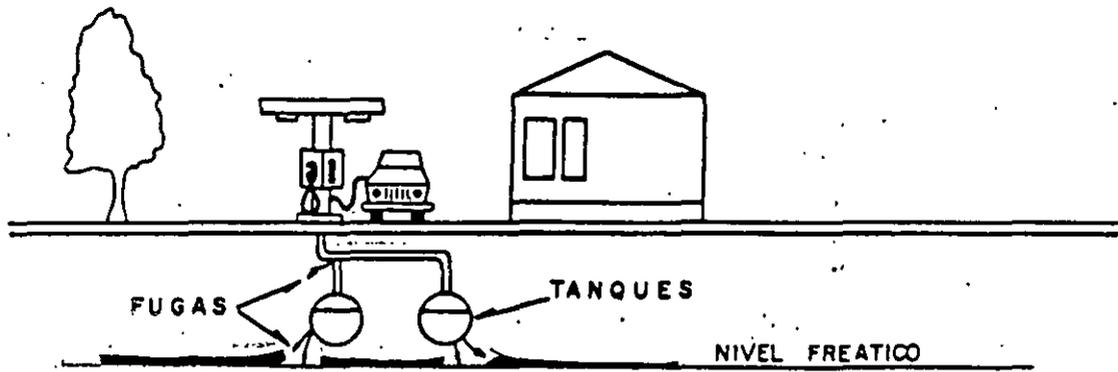
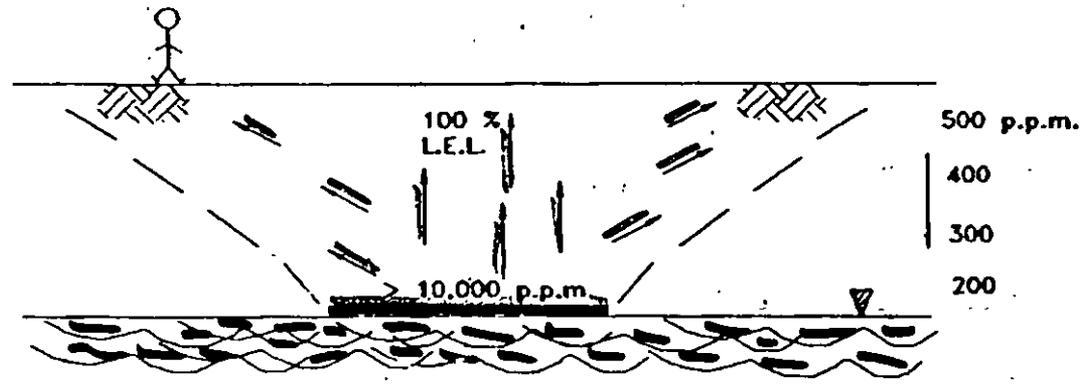
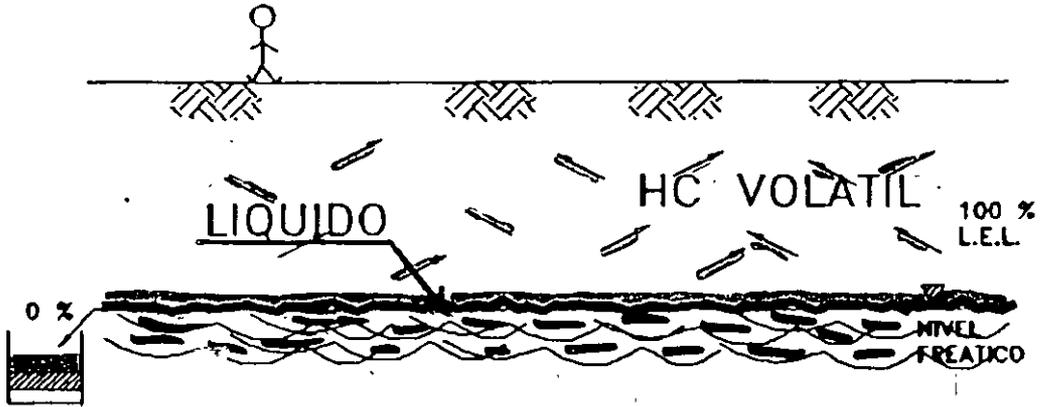


Figure 10. Dual-tracer leak detection method. (Source: Thompson, 1955, 17)



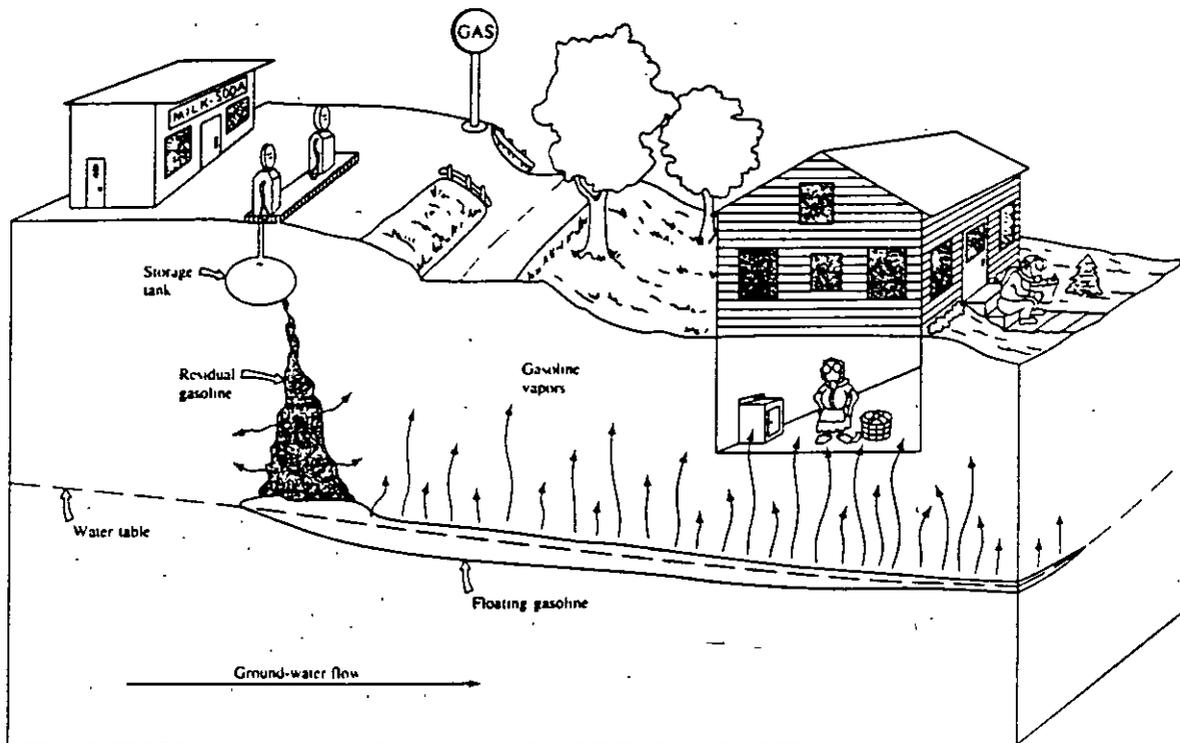


FIGURE 9.25 Release of organic vapors in vadose zone from residual saturation and floating product.

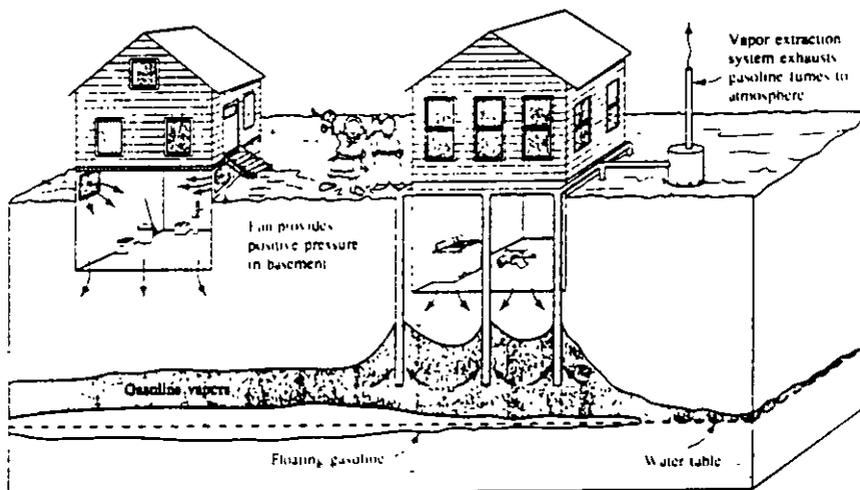
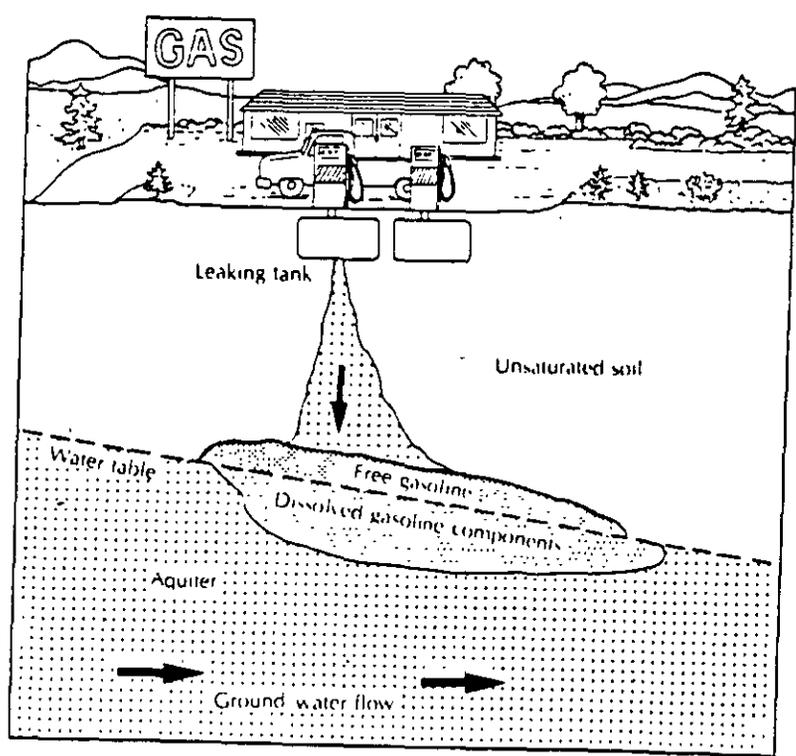
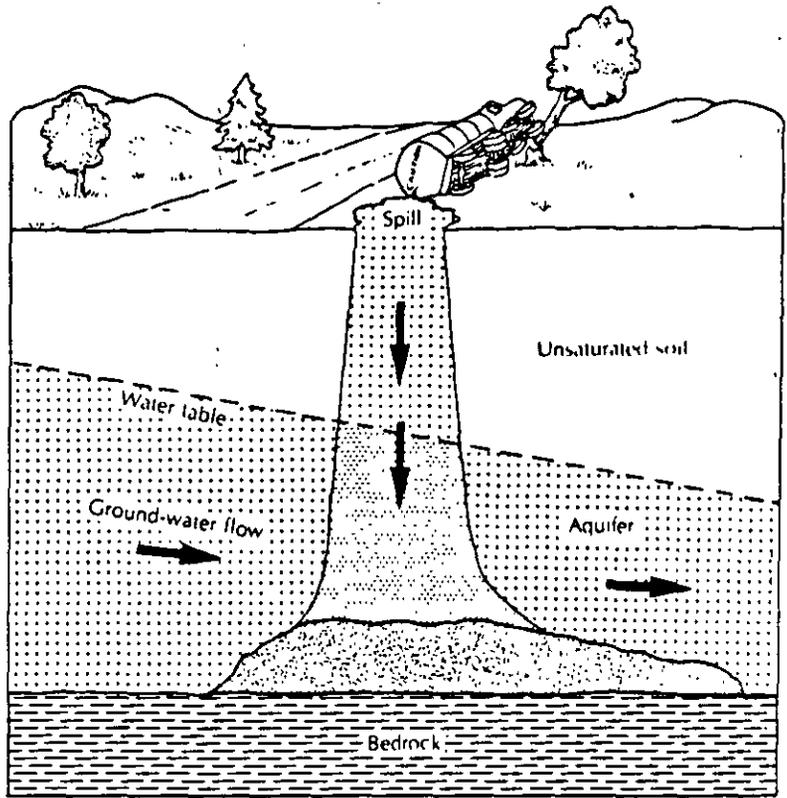
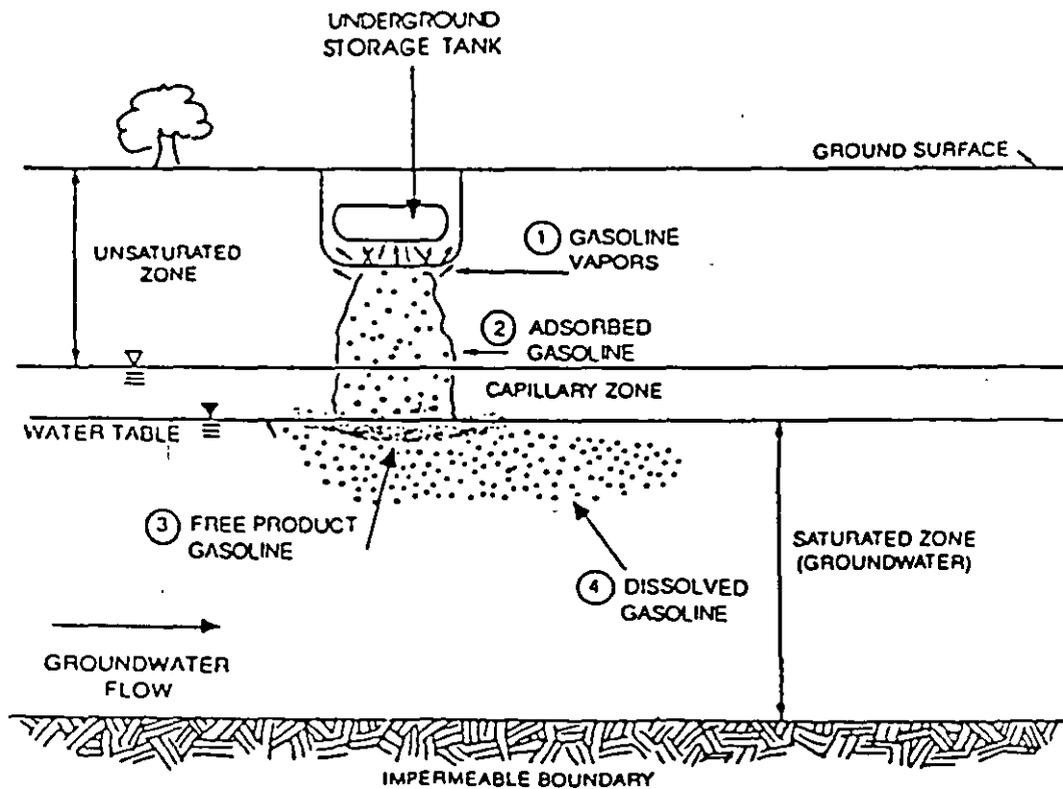
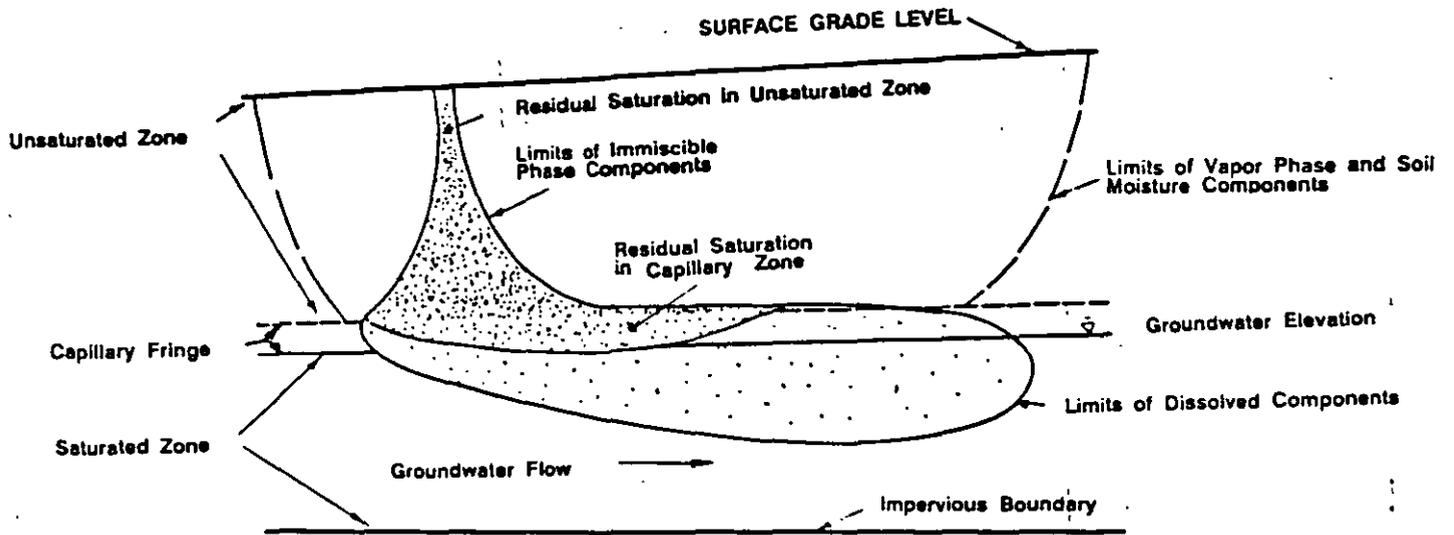


FIGURE 9.26 Control of organic vapors in the vadose zone. Source: Modified from M. J. O'Conner, J. G. Agar and R. D. King, *Proceedings of Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection and Restoration*, 1984, pp. 519-33 National Water Well Association. Used with permission.





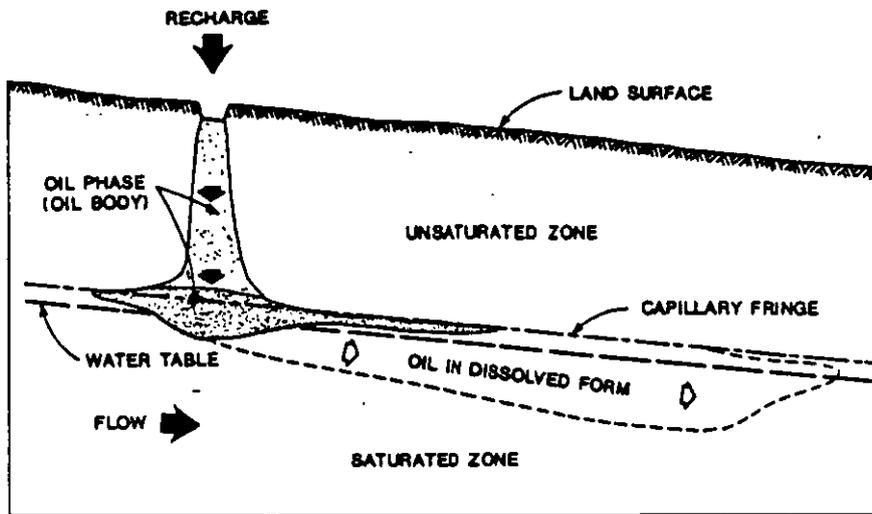


Figure 3-35. Example of multiphase flow in the subsurface (adapted from Schwille, 1975).

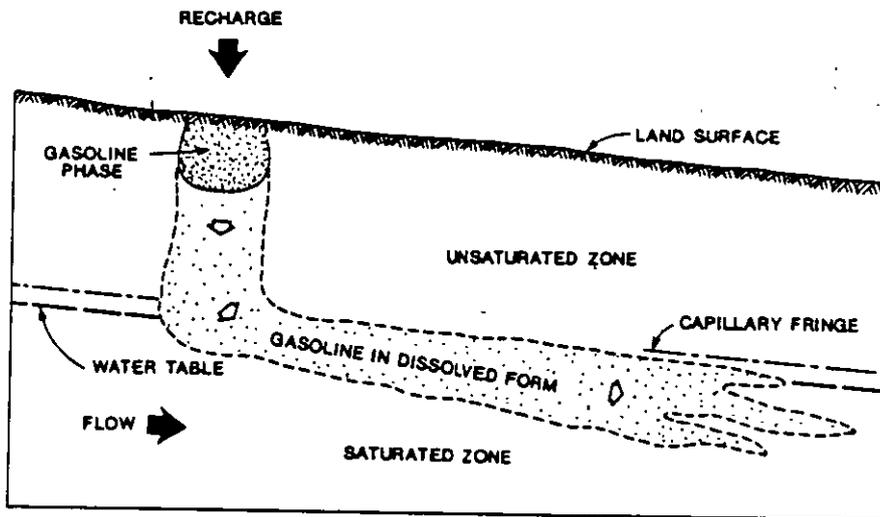


Figure 3-34. Movement of gasoline in the subsurface (adapted from Schwille, 1975).

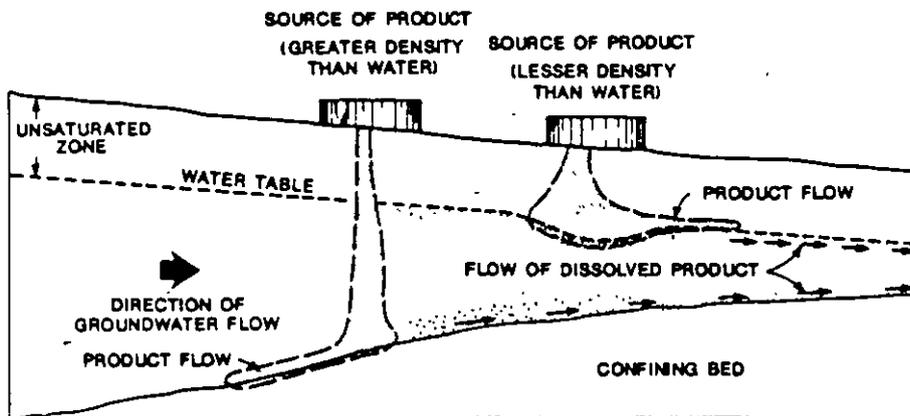
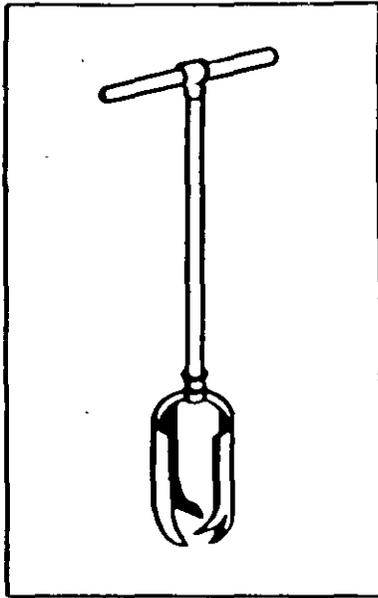
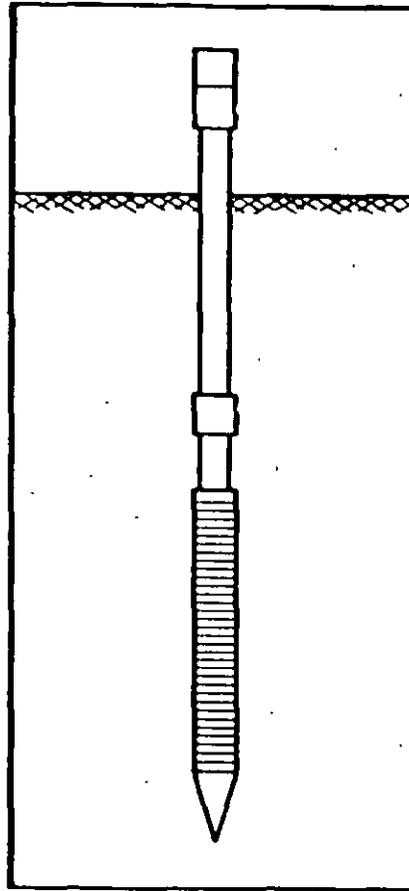


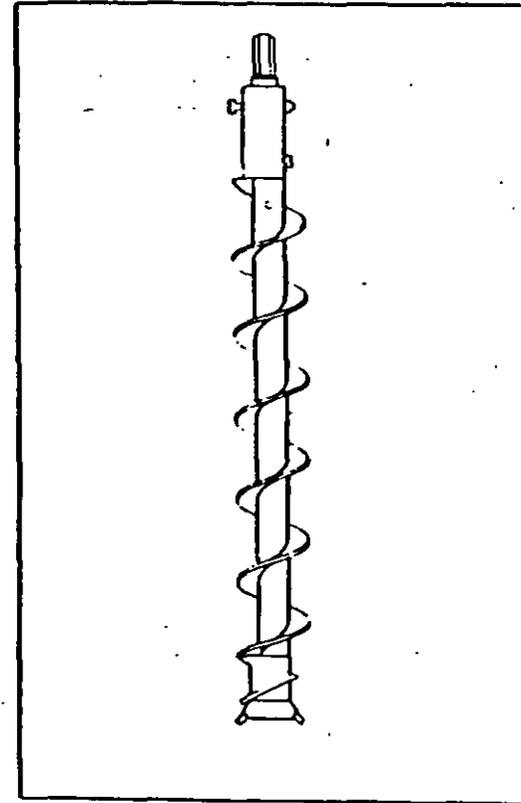
Figure 3-36. Example of the subsurface movement of fluids with densities greater than, and less than, that of water.



MUESTREADOR MANUAL



MUESTREADOR MEDIANTE
INCADO DE TUBERIA



MUESTREADOR DE MAQUINA ROTARIA

FUENTE: NWWA, 1989, HANDBOOK OF SEGGESTED

FIGURA 3.

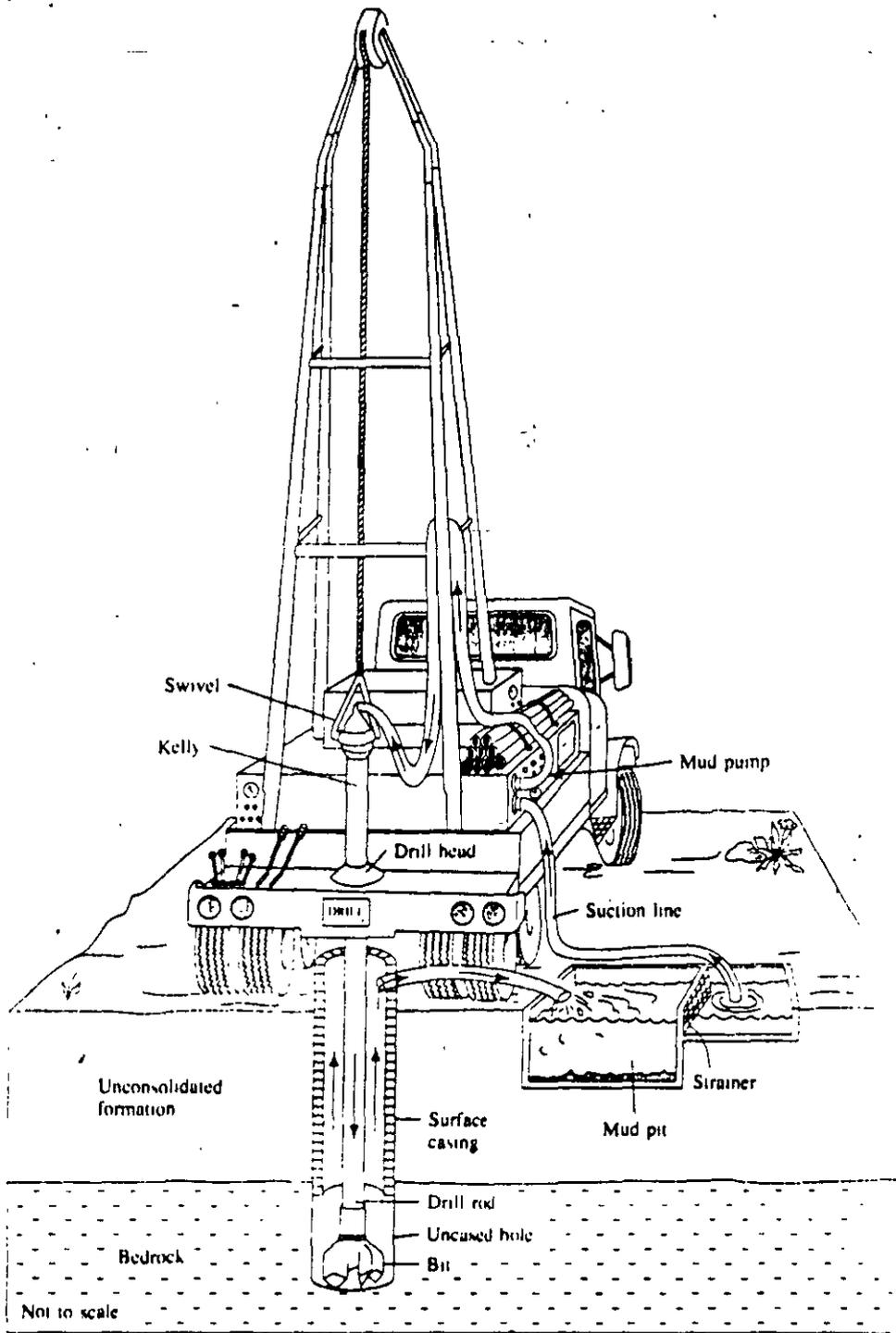


FIGURE 8.11 Circulation of drilling fluid in mud-rotary drilling.

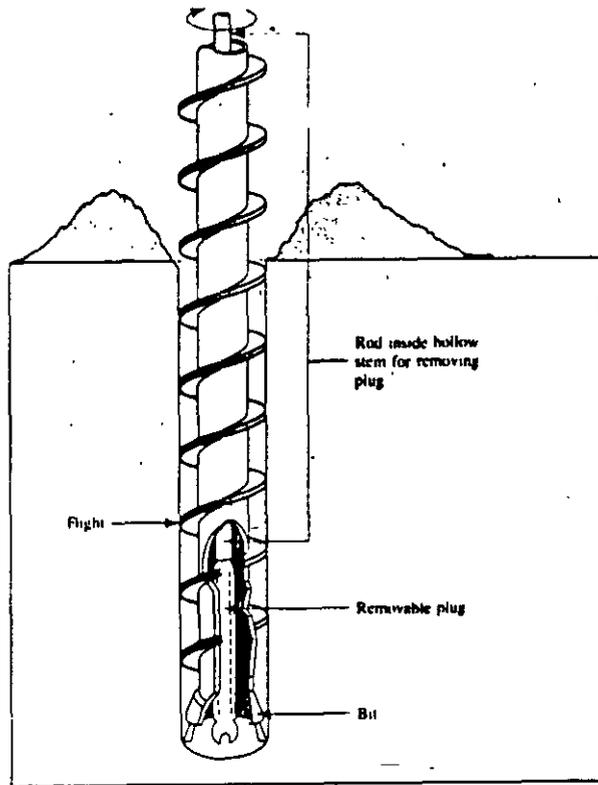


FIGURE 8.9 Hollow-stem auger drill rod and bit. Source: M. L. Scaff et al. *Manual of Ground Water Sampling Procedures*, 1981. National Water Well Association. Used with permission

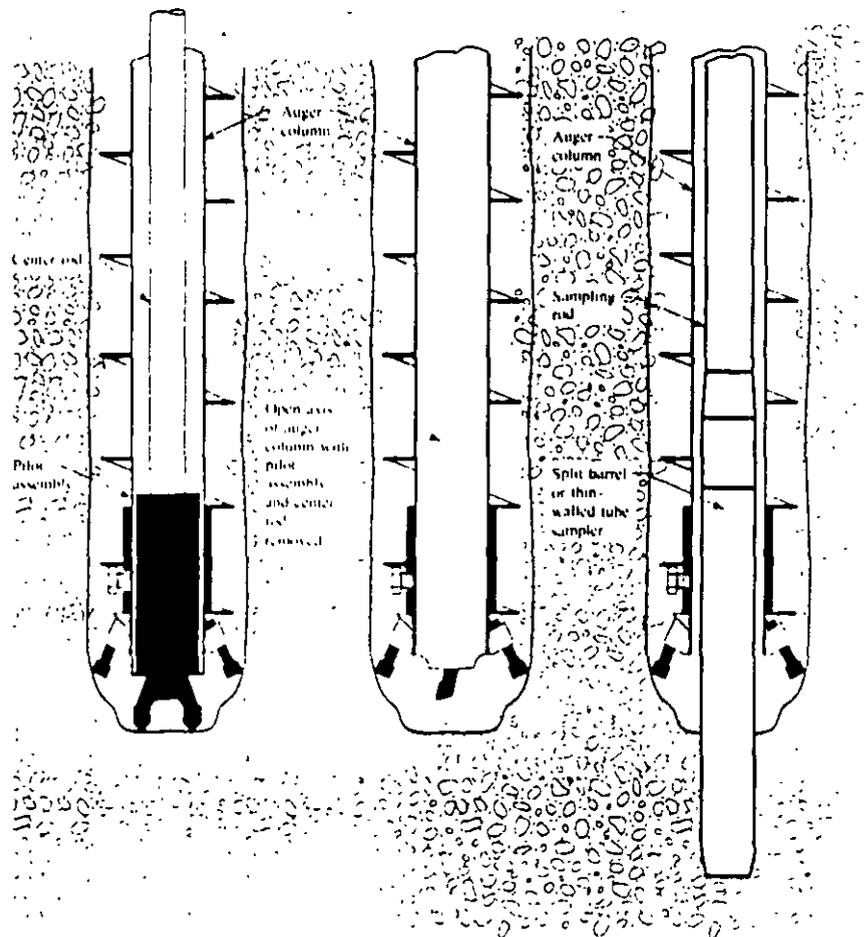


FIGURE 8.13 Sequential steps for the collection of a core sample through a hollow-stem auger. Source: Glen Macsett. *Ground Water Monitoring Review* 7, no. 4 (1987): 51-62. Used with permission. Copyright © 1987 Water Well Journal Publishing Co.

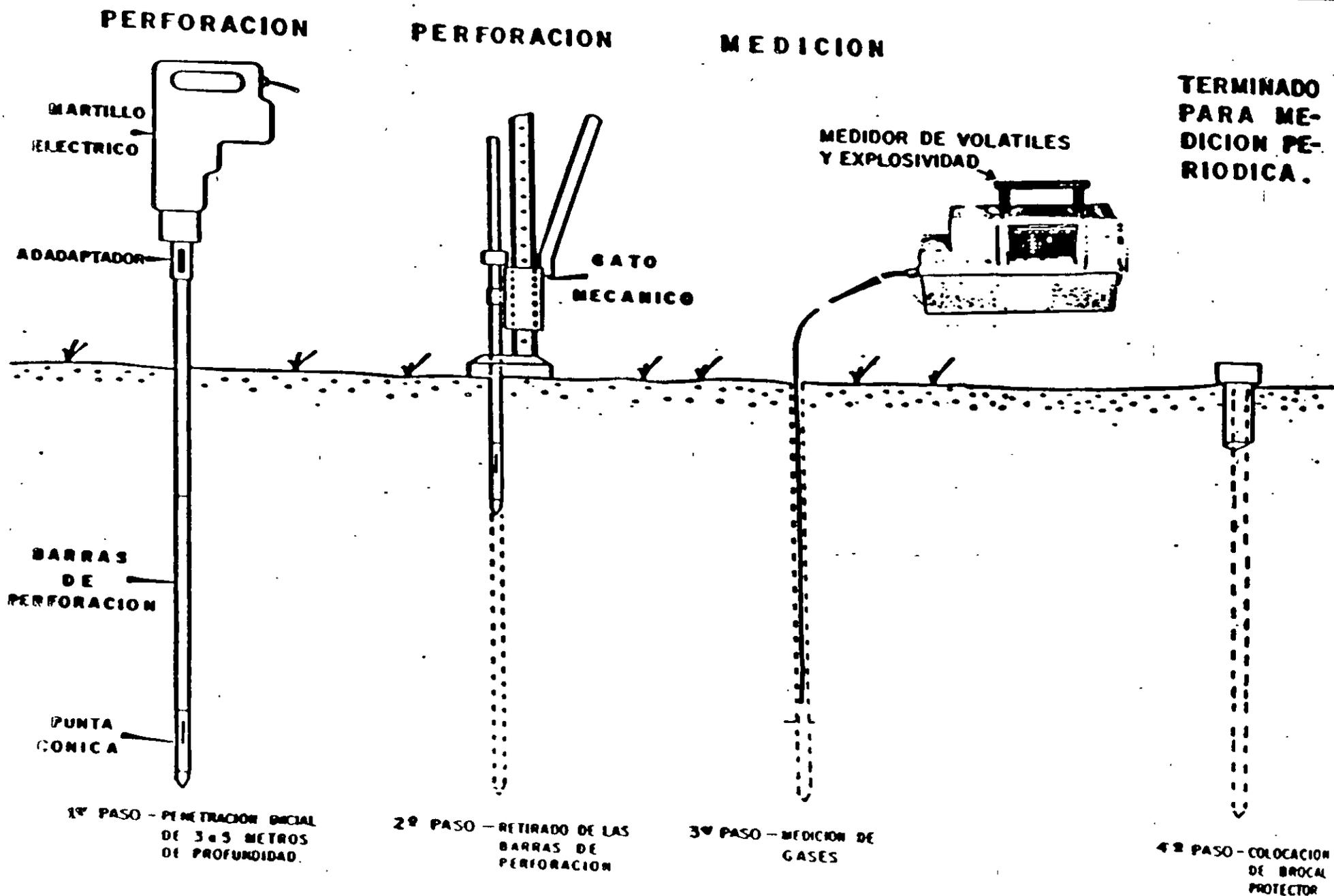
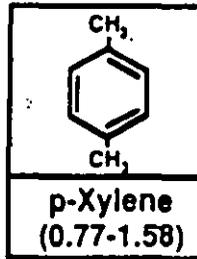
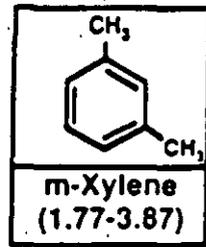
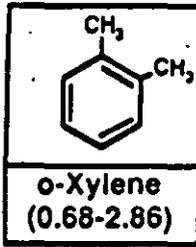
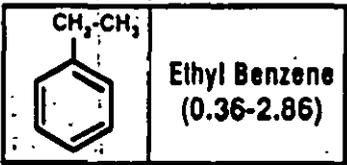
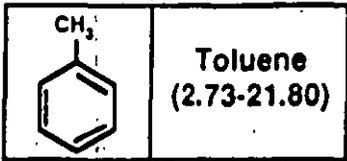
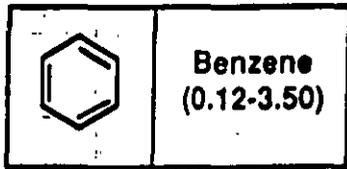


FIGURA 3.1 INSTALACION DE PUNTOS DE OBSERVACION PARA DETECCION DE VOLATILES



Lesser y Asoc. S.A. de C.V.

**B
T
E
X**

BIOTREATMENT SYSTEM SCHEMATIC

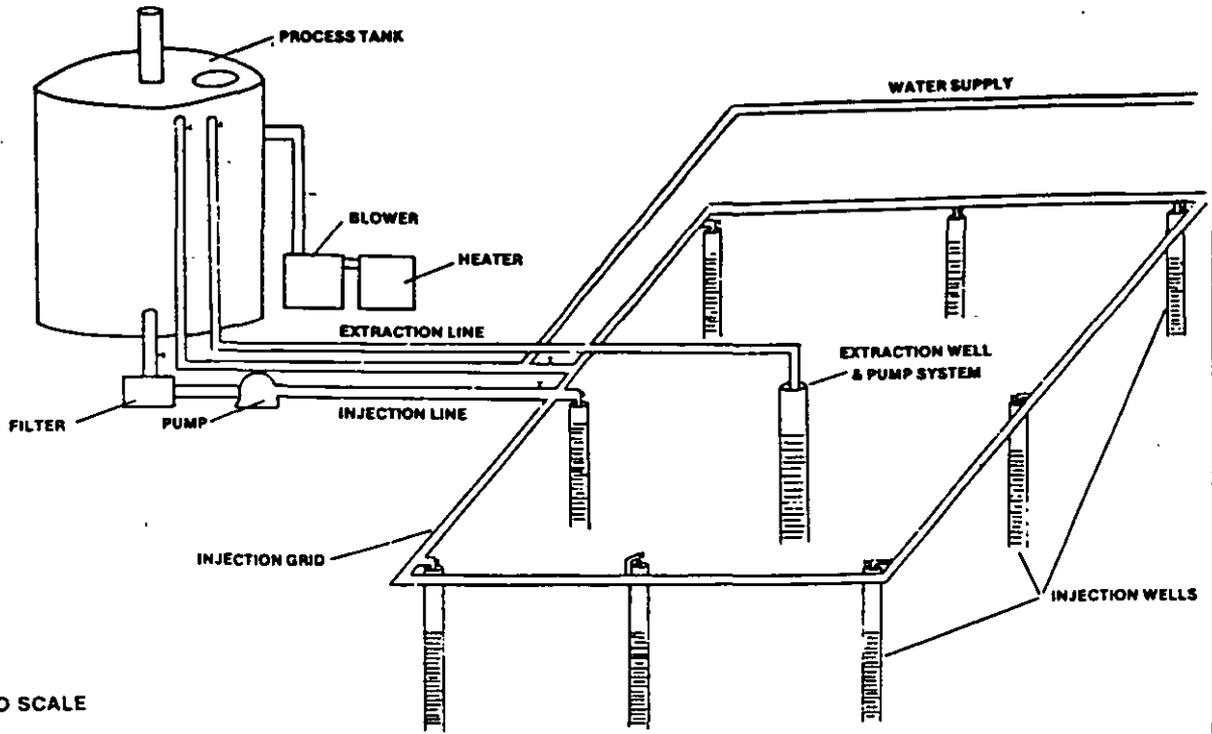
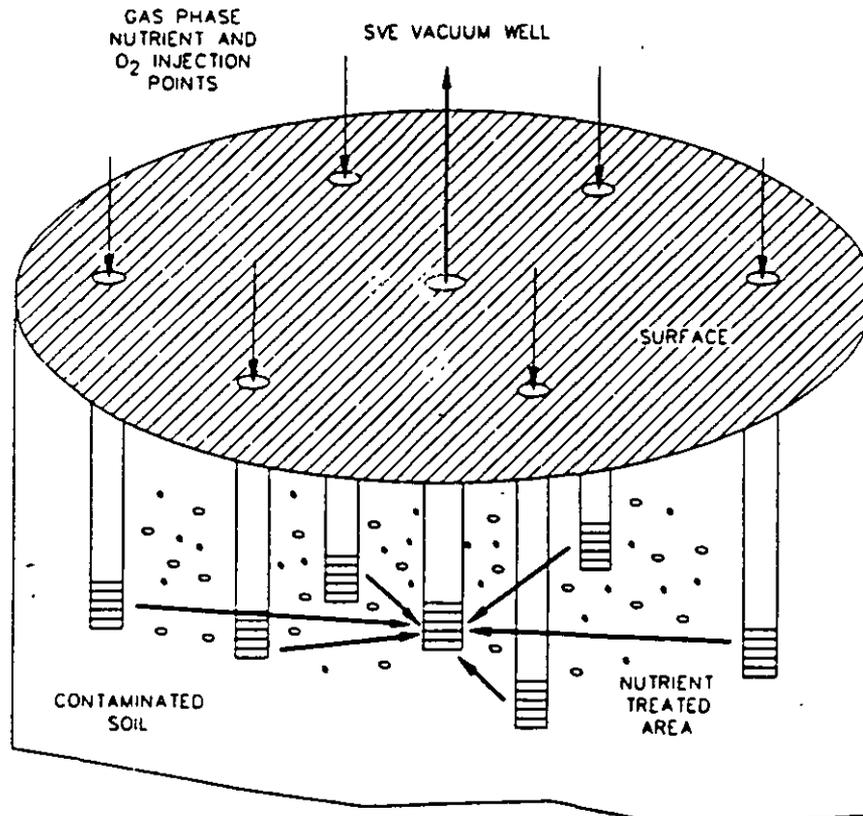
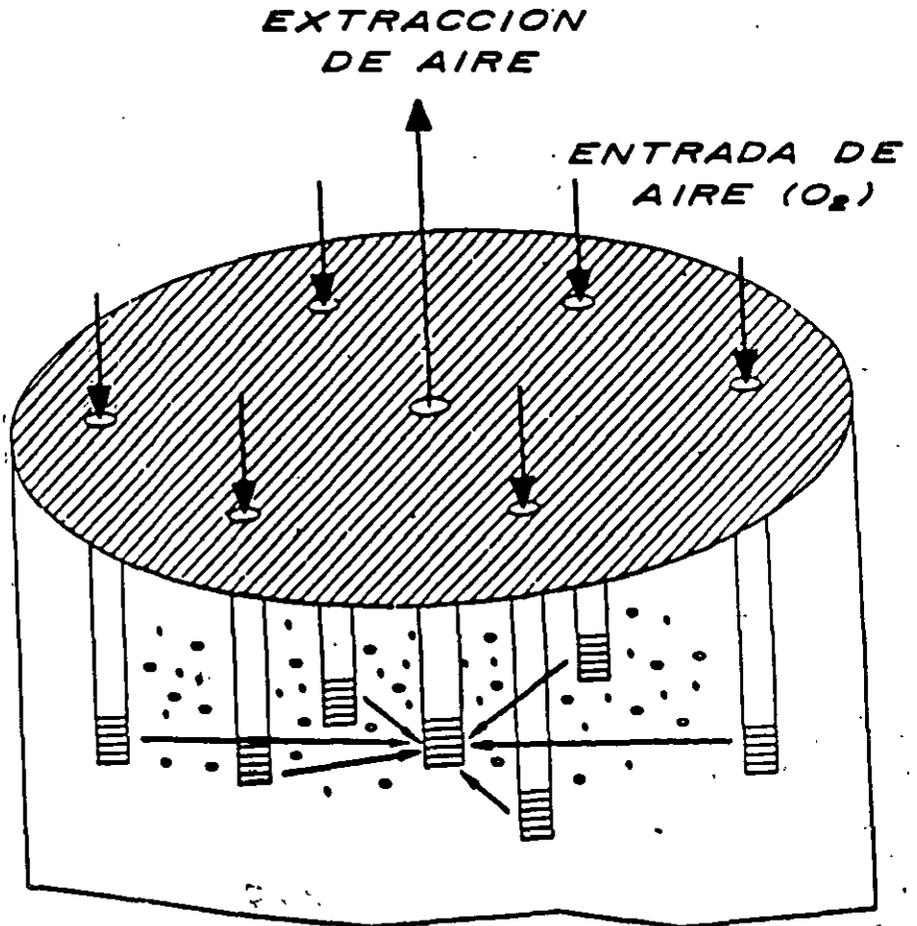


Figure 1. Continuous recirculation.



SANEAMIENTO

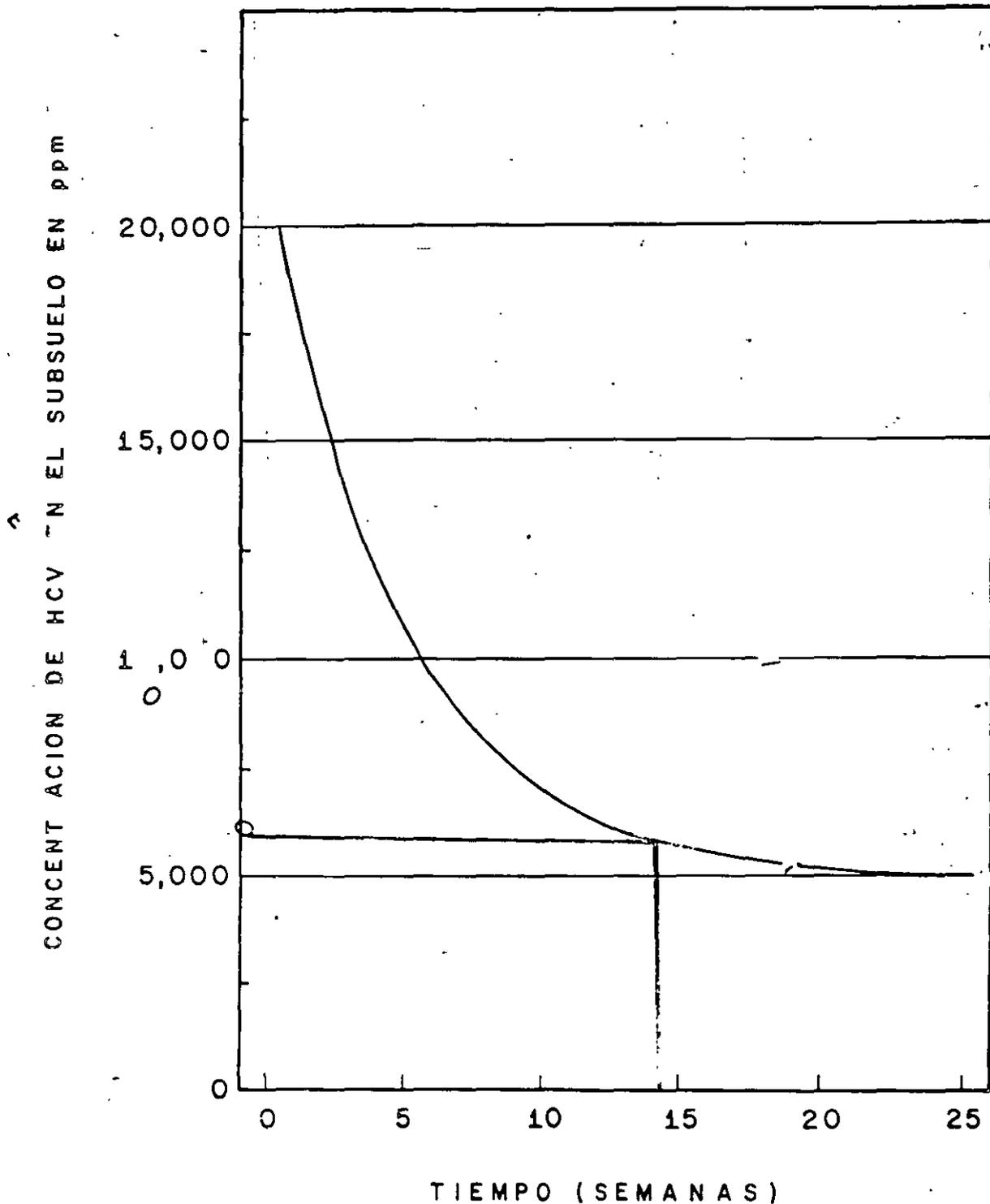
EXTRACCION DE VOLATILES

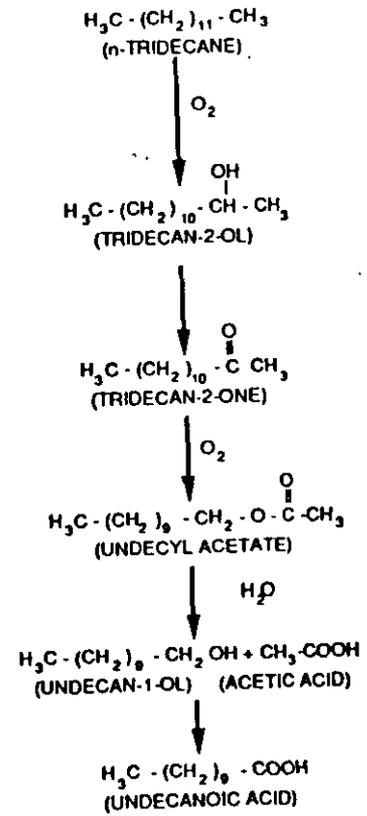
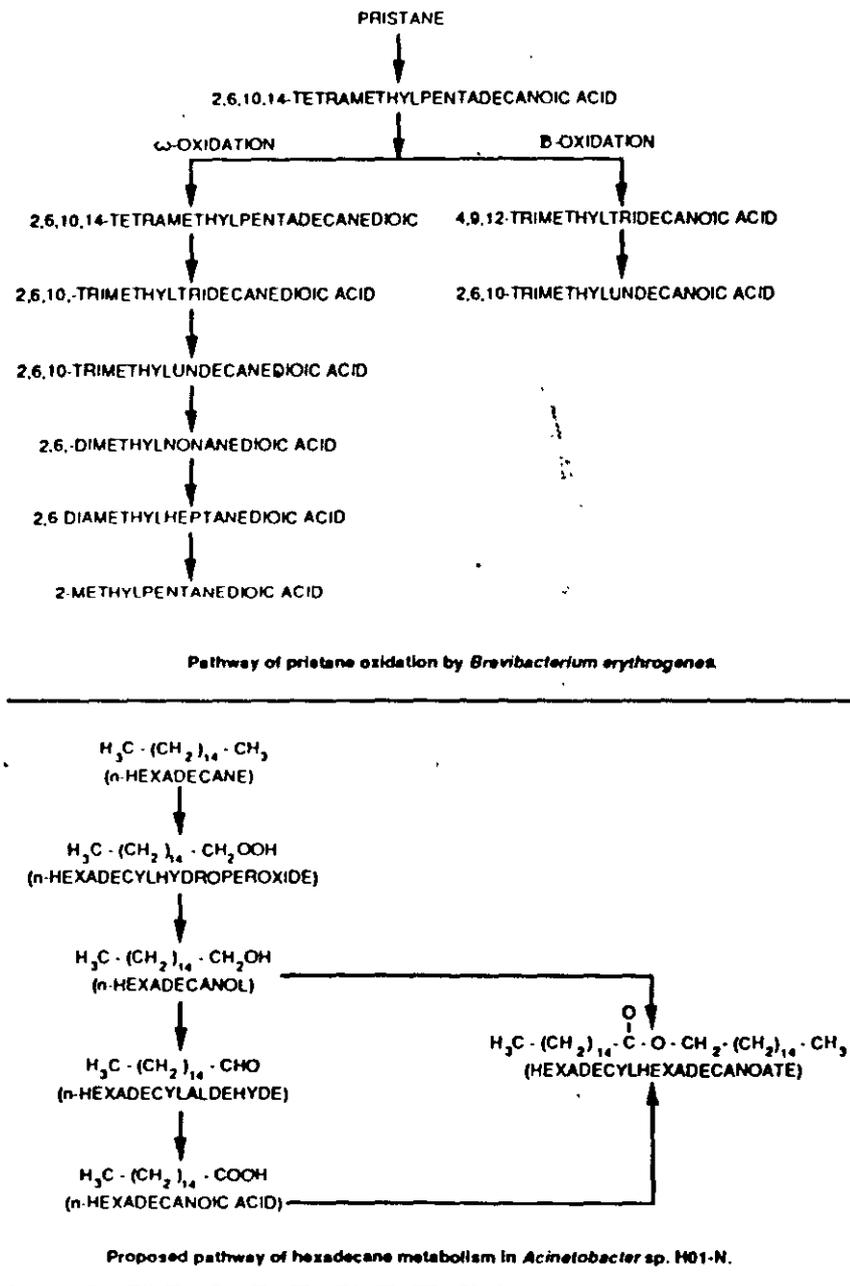


SE PRODUCE BIODEGRADACION
DEL 50 % DE LOS VOLATILES,
SE EXTRAHE EL 50 % RESTANTE

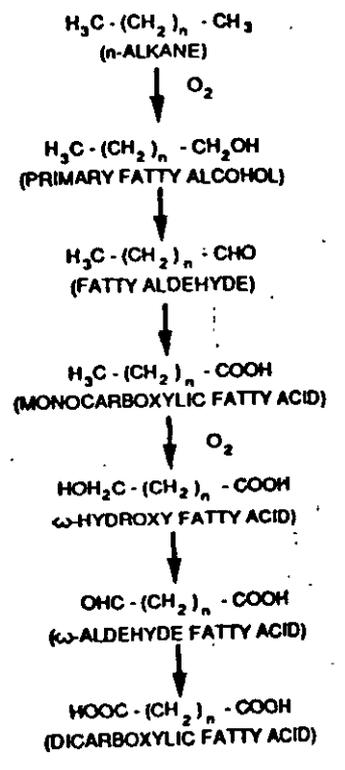


RELACION TIPICA DE VOLUMEN DE REMOSION
DE HCV RESPECTO AL TIEMPO





Pathway of Subterminal Alkane Oxidation in *Pseudomonas*.



Pathway of Diterminal Alkane Oxidation.

Figure 11-4. (continued).

$$\mu = \frac{\mu_{max}C}{(K_s + C)} \tag{11.3}$$

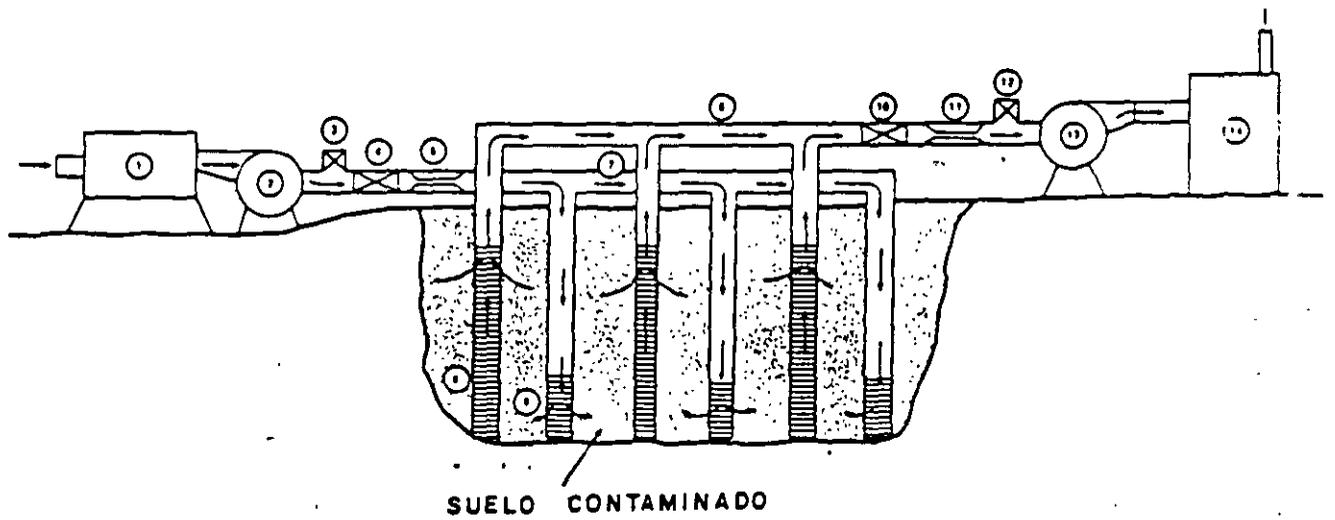
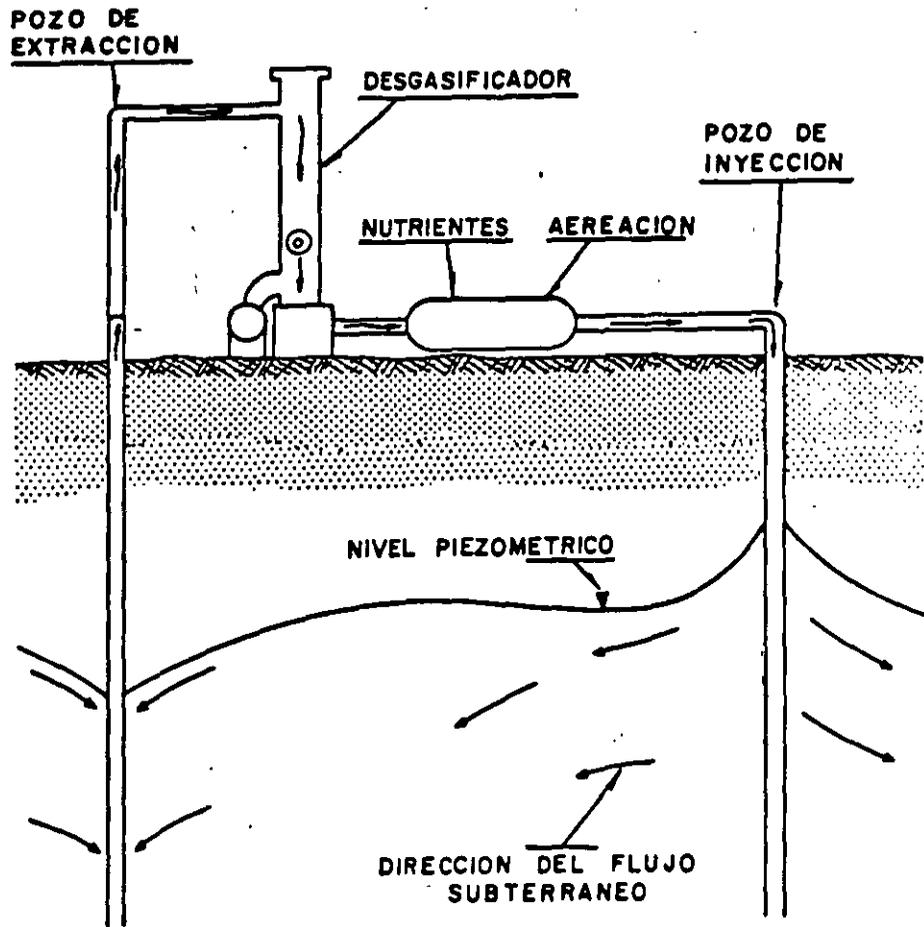
where $\mu = dB/dt (1/B) =$ specific growth rate (day^{-1})

$B =$ microbial population density ($\frac{\text{bacteria cell count}}{\text{g soil}}$)

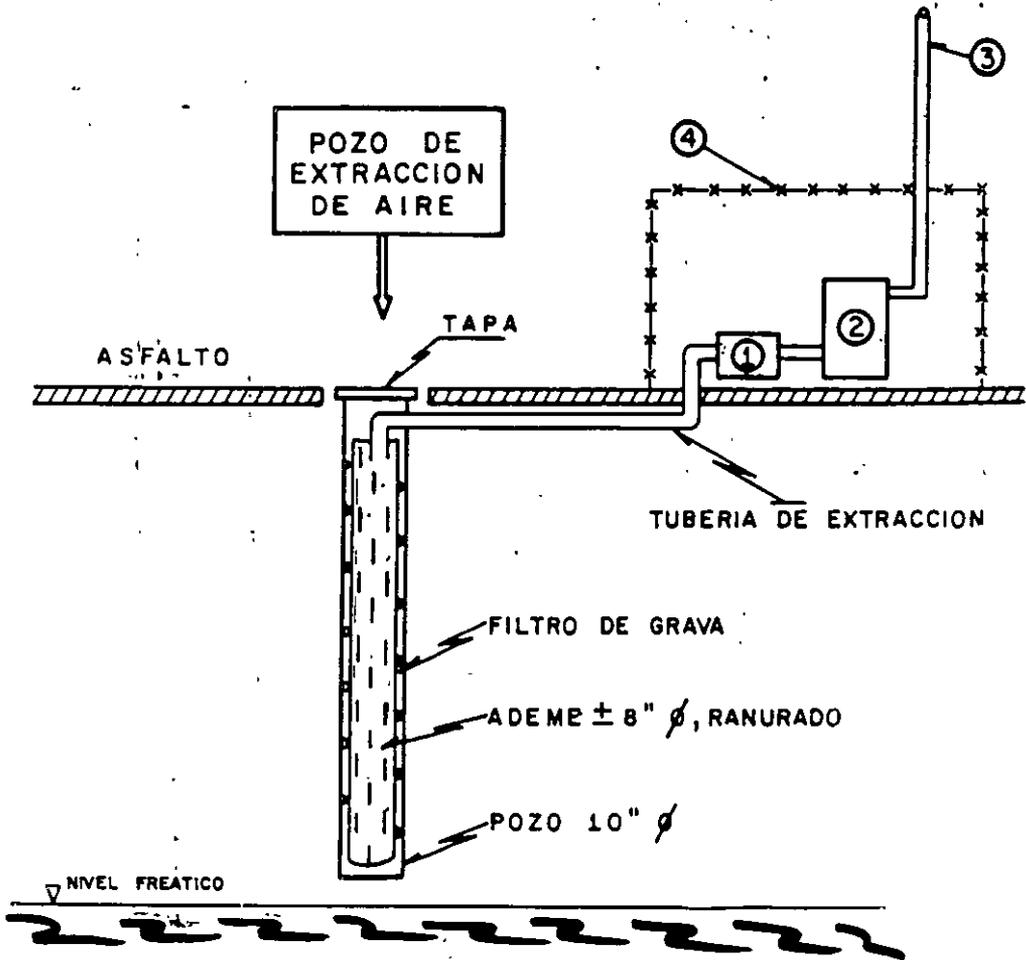
$\mu_{max} =$ maximum specific growth rate (day^{-1})

$C =$ substrate concentration ($\frac{\text{g hydrocarbon}}{\text{g soil}}$)

Figure 11-4. Pathways of biodegradation for several hydrocarbons. Source: Adapted from Singer and Finnerty, 1984



MÉTODO DE EXTRACCION DE VOLATILES DEL SUBSUELO



- ① EXTRACCION DE AIRE
- ② TRATAMIENTO DEL VOLATIL
- ③ CHIMENEA
- ④ CERCADO (MALLA O SIMILAR)

FIGURA 13.2

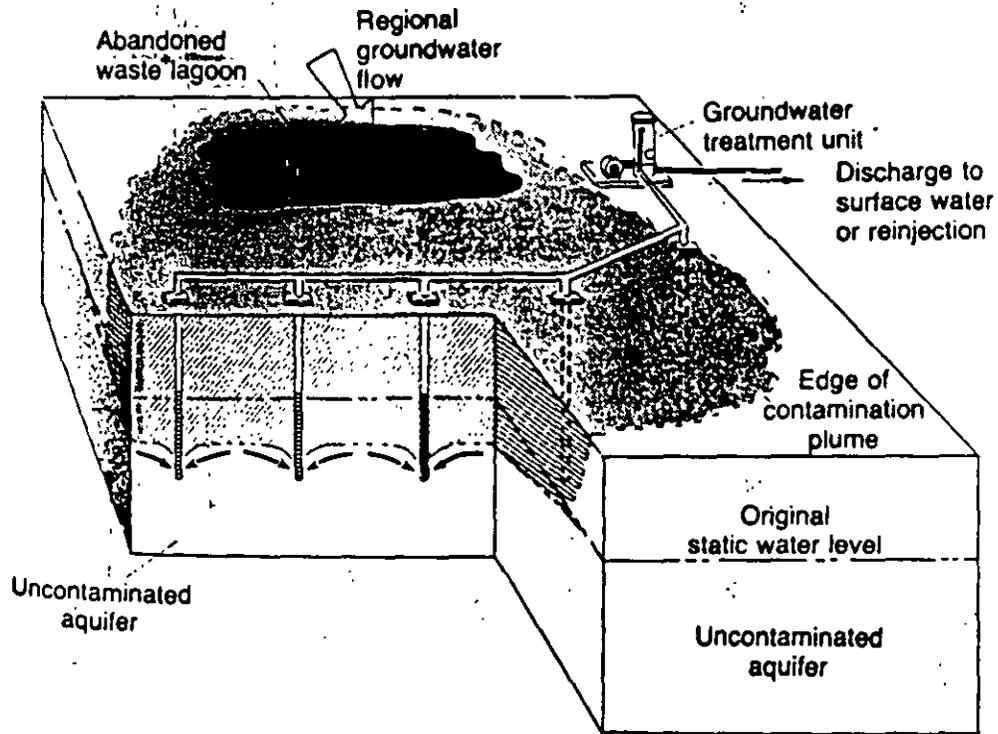


Fig. 19.1 Typical well recovery system.

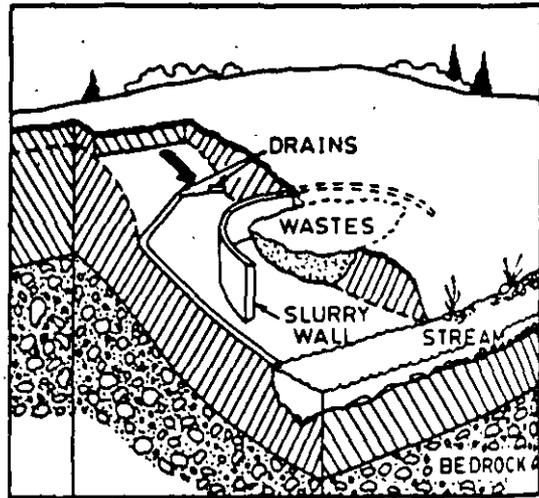
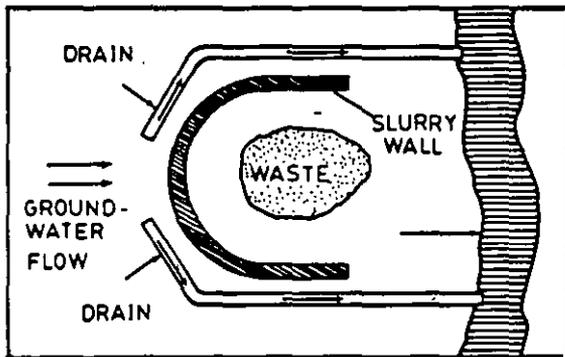


Figure 9-6. Combination of drains and slurry wall used to prevent leaching of contaminants into groundwater and a surface stream.

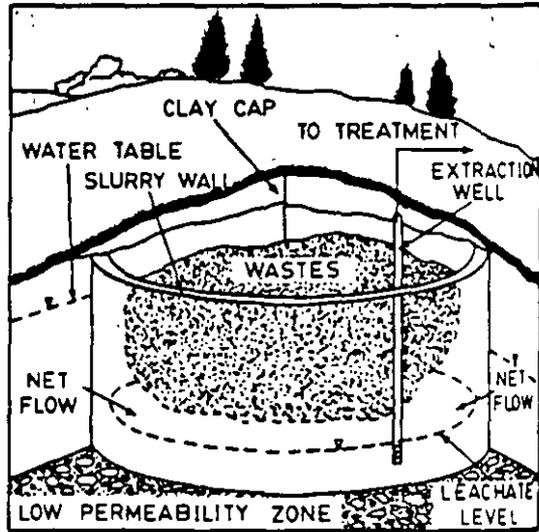
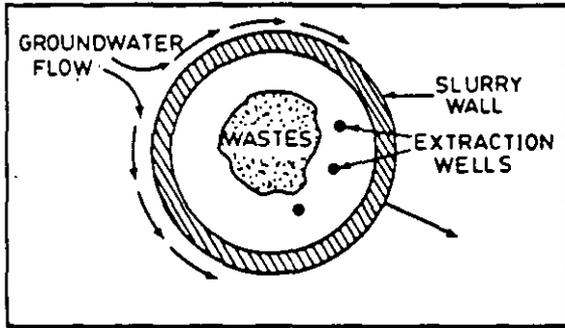


Figure 9-7. Circular slurry wall and groundwater extraction combined to prevent groundwater contamination.

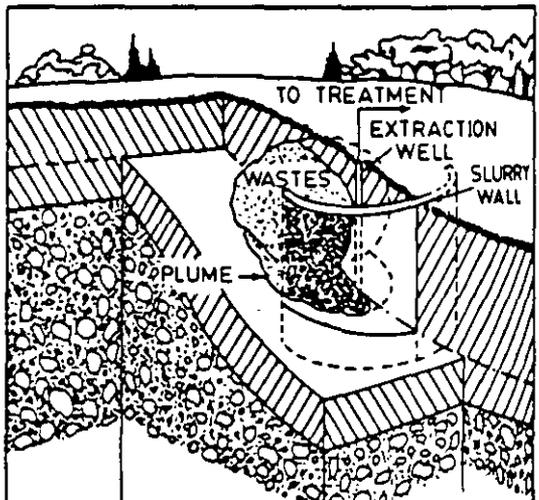
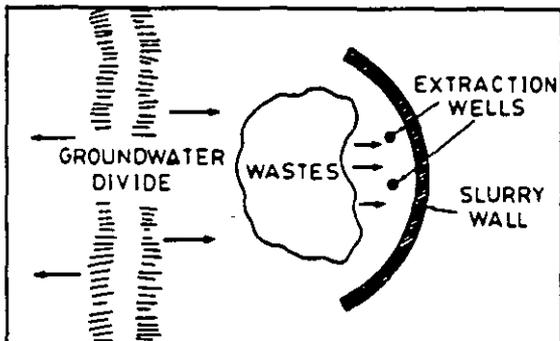


Figure 9-8. Slurry wall and extraction-wells used to collect leachate.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

TEMA :

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

**ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE – OCTUBRE 1999**

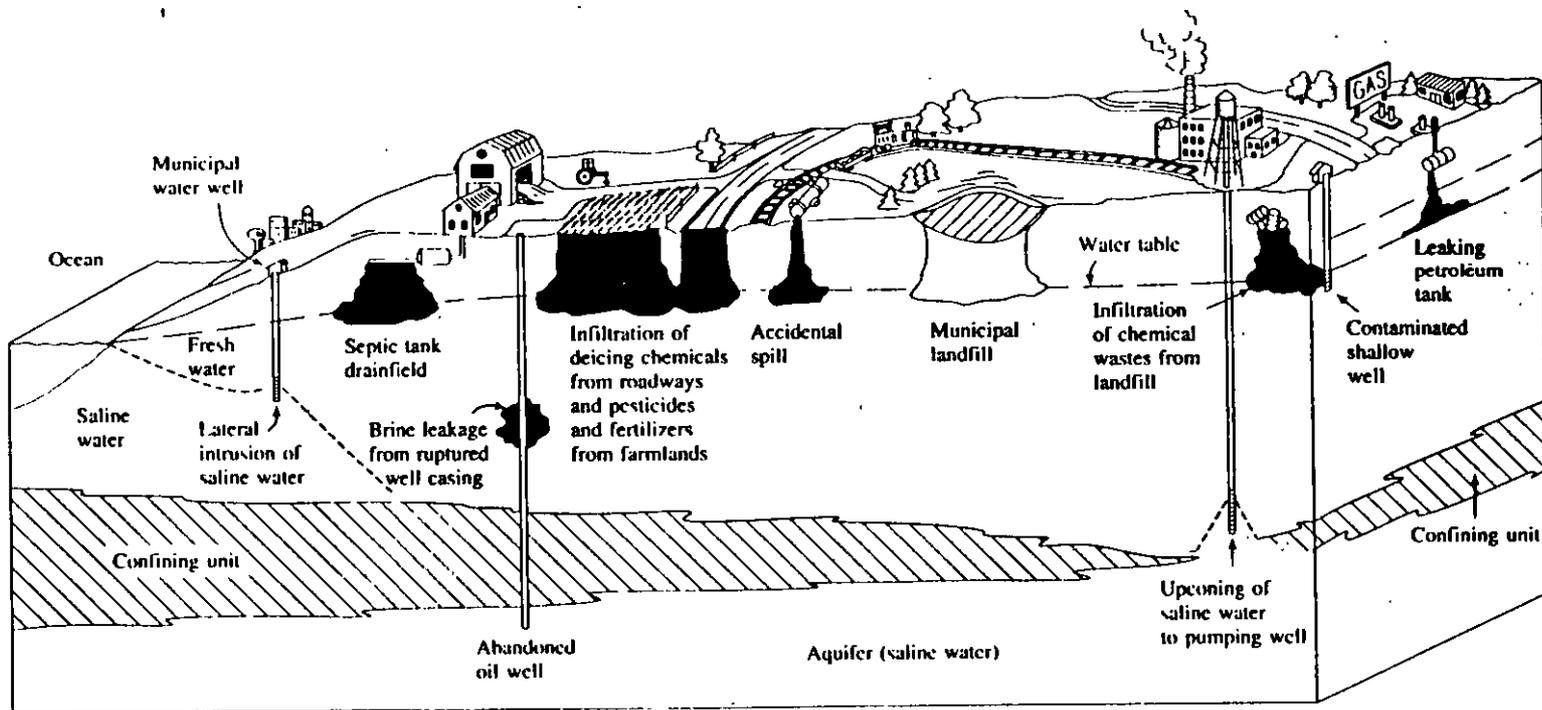


FIGURE 1.1 Mechanisms of ground-water contamination.

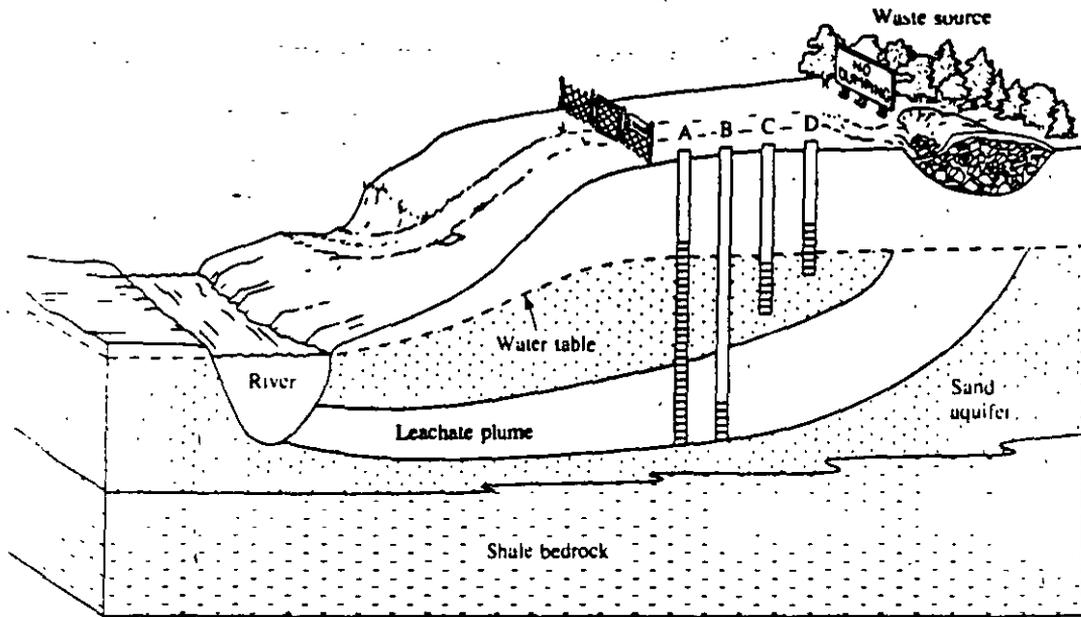
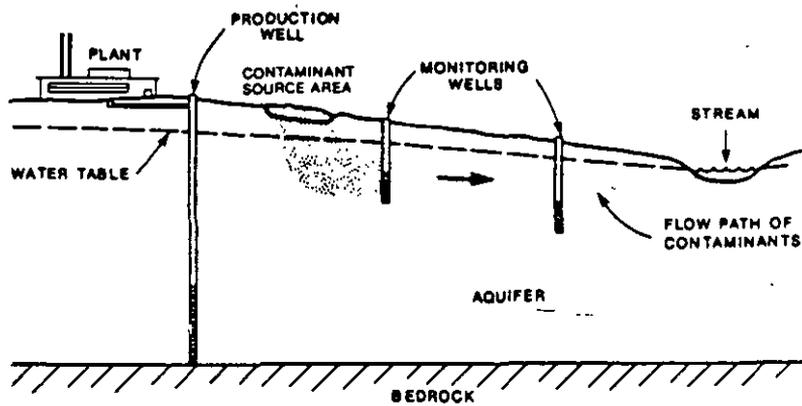
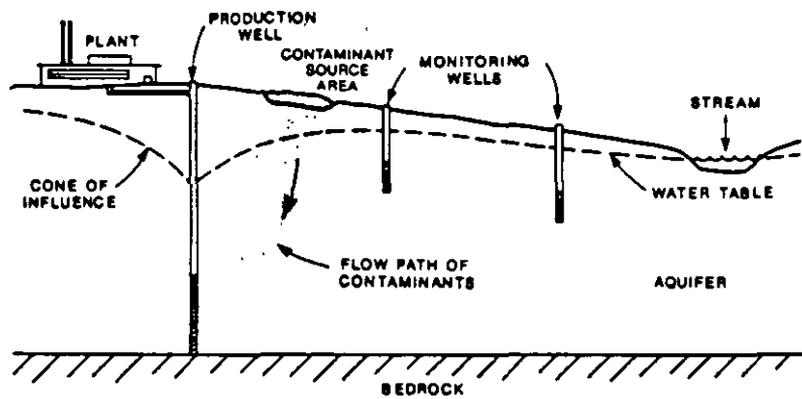


FIGURE 8.7 Effect of monitoring well-screen length on water-quality sampling. Monitoring well A is screened through the thickness of the aquifer. It intersects the plume of leachate but the reported concentration will be less than the actual concentration as water is withdrawn from both contaminated and uncontaminated parts of the aquifer. Piezometer B is also screened to intersect the plume of leachate. Reported concentration will be representative of the leachate. Piezometer C and water table monitoring D don't intersect the plume, indicating that it is deep in the aquifer.



A. IF NO PUMPING OCCURS



B. IF PUMPING OCCURS

Figure 3-46. Locating monitoring wells to map contaminants in an area affected by pumping w

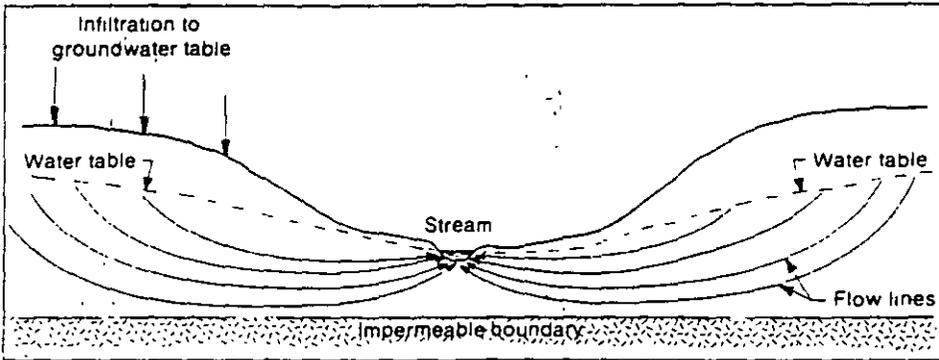


Figure 5.17a. Cross section through a stream valley showing flow lines in the groundwater system.

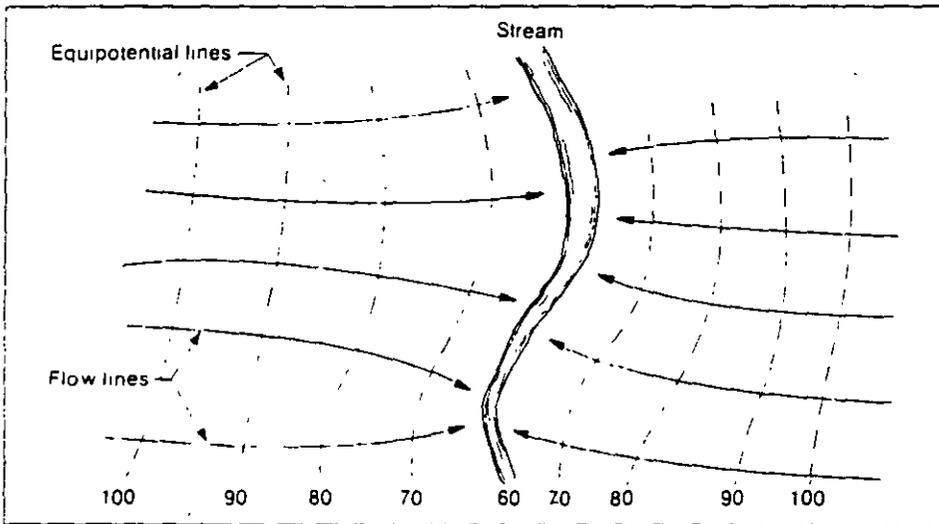
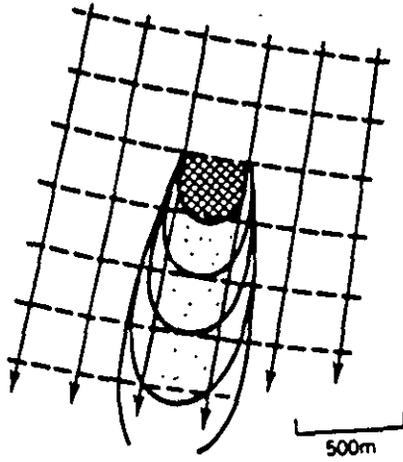
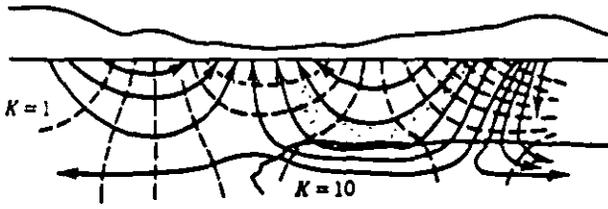
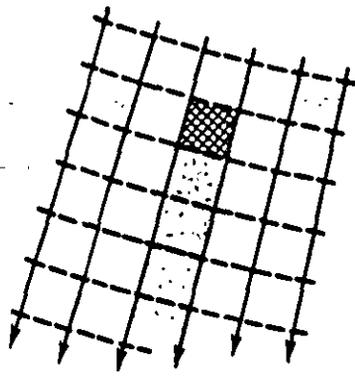
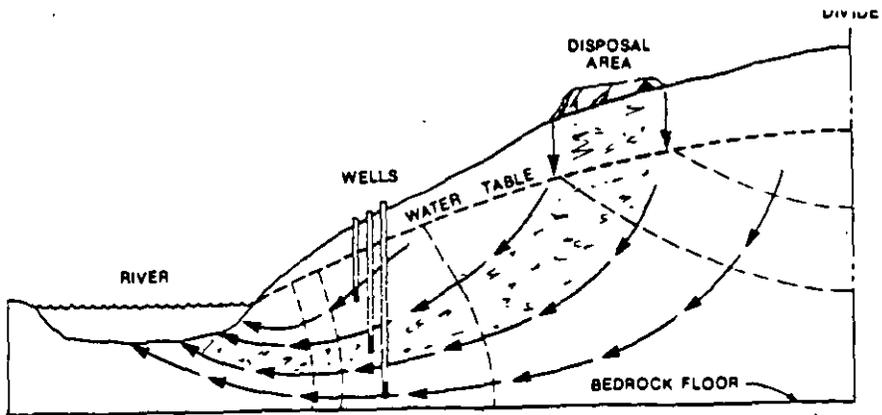
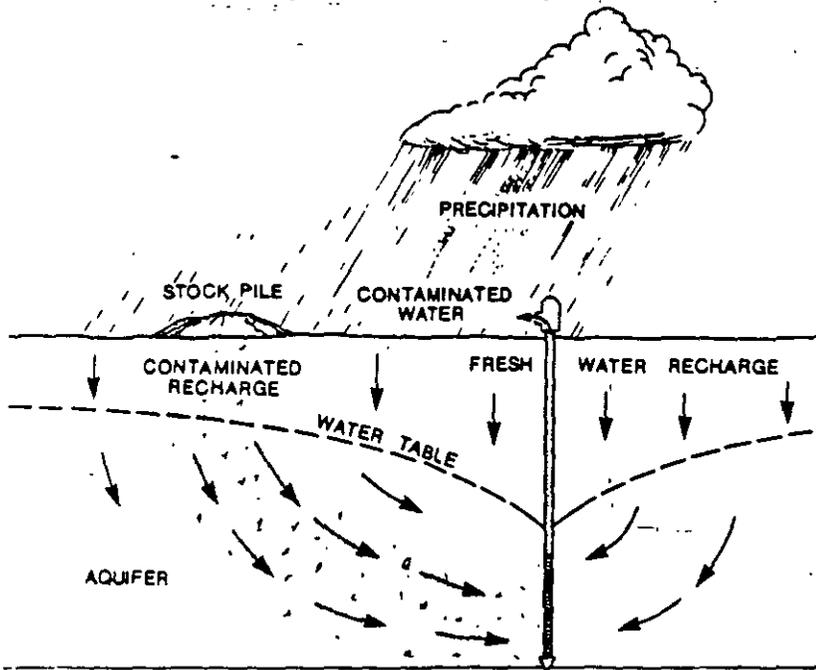


Figure 5.17b. Looking down on the stream valley from above with the water table exposed. The dotted lines represent points of equal groundwater elevation.





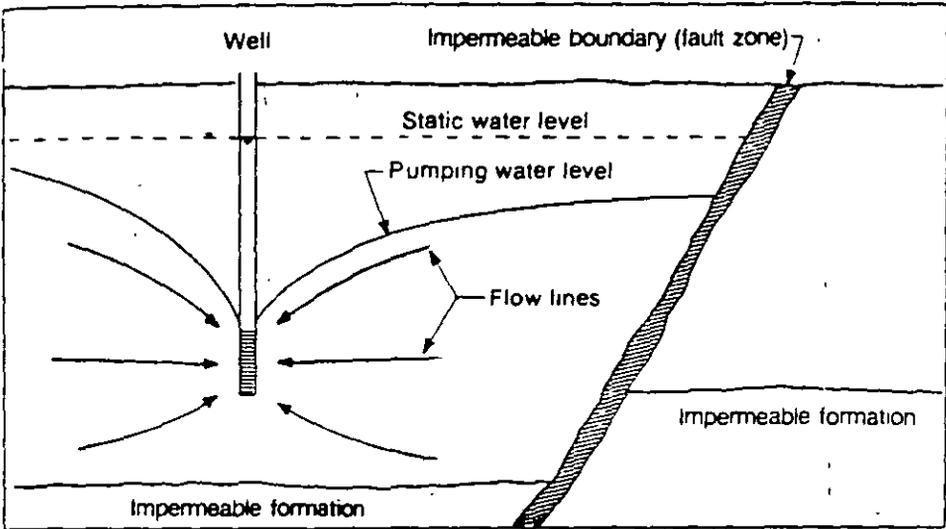


Figure 5.18a. Cross section near a pumping well showing the flow lines followed by water moving toward the well.

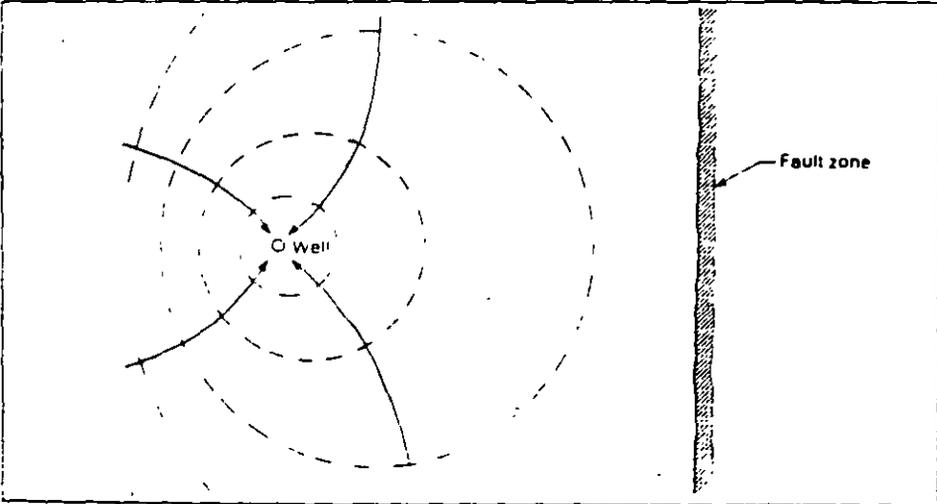
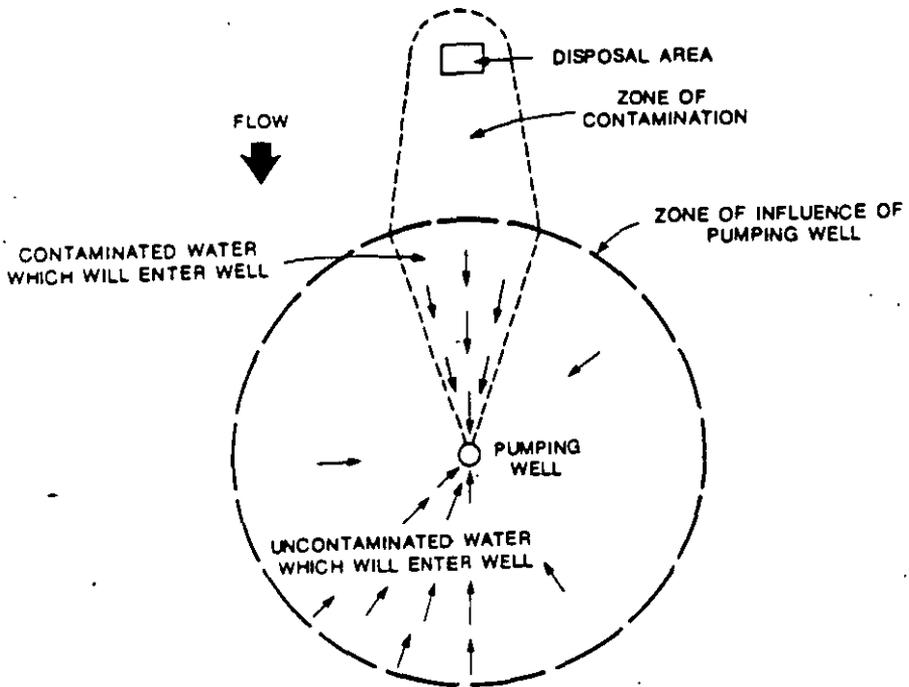
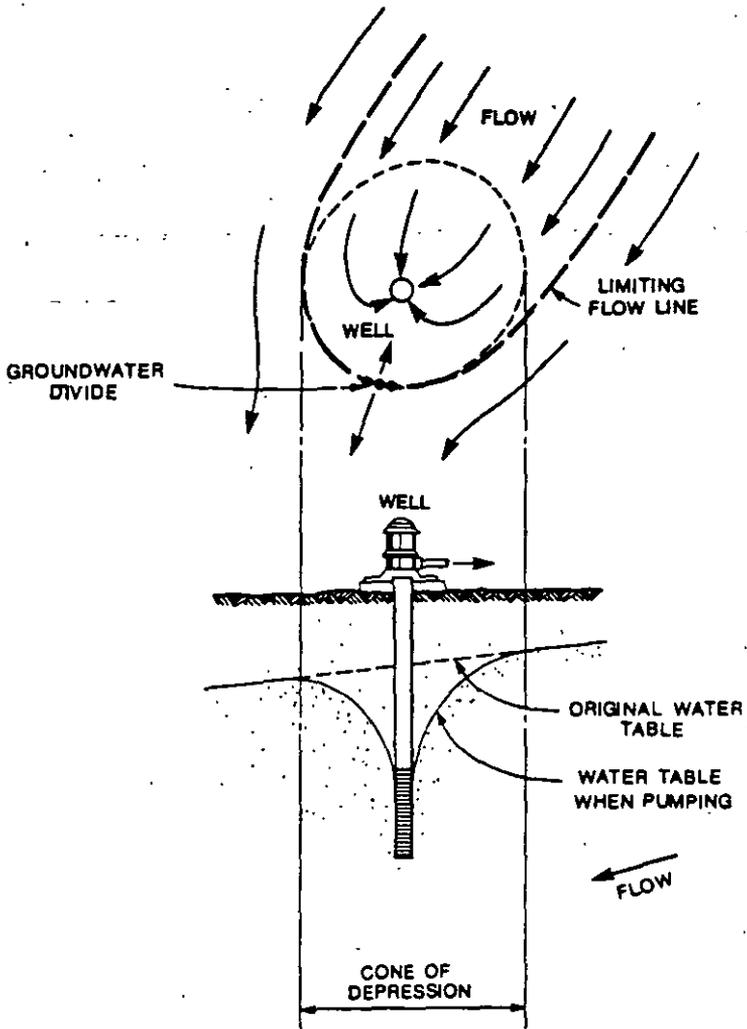
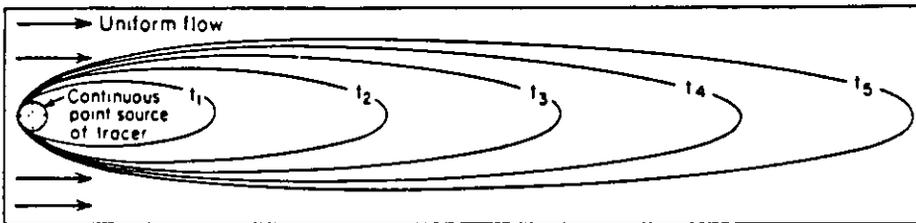
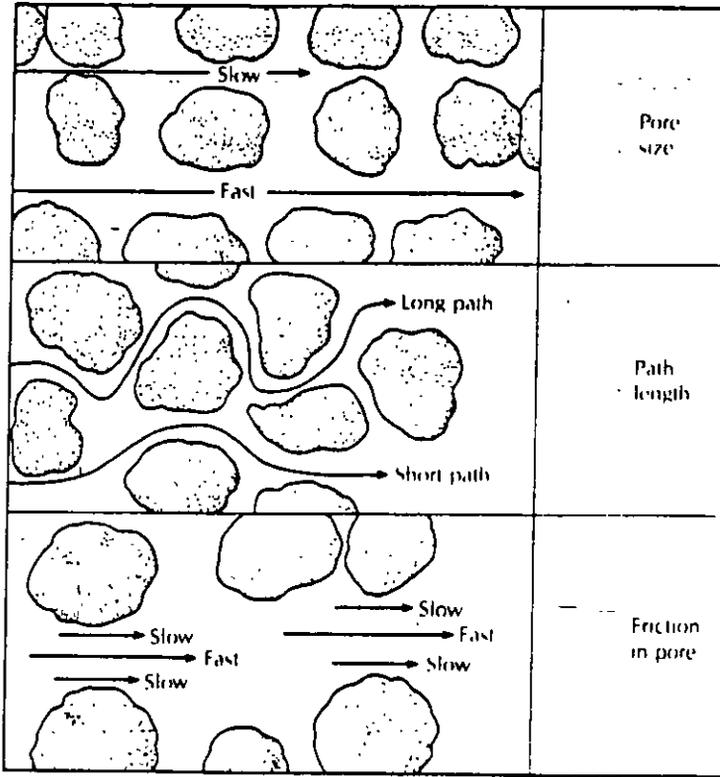
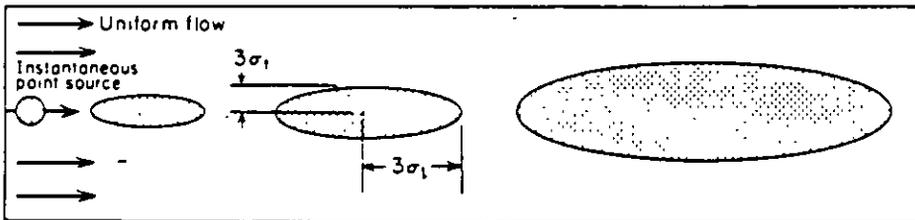


Figure 5.18b. Map of the potentiometric surface during long-term pumping shows that the impermeable boundary causes greater drawdown in the direction of the fault.



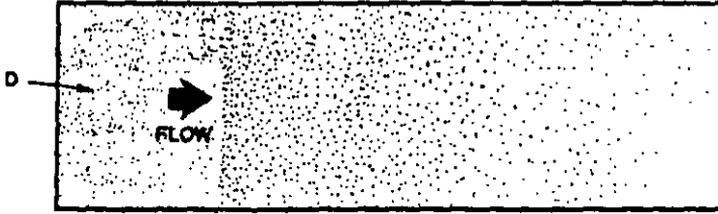


(a)

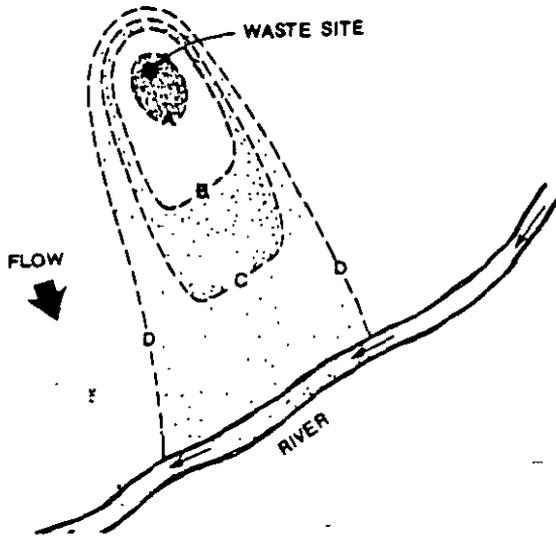
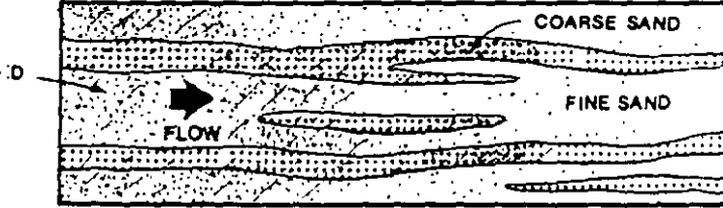


(b)

Figure 9.5 Spreading of a tracer in a two-dimensional uniform flow field in an isotropic sand. (a) Continuous tracer feed with step-function initial condition; (b) instantaneous point source.



A) HOMOGENEOUS SAND LAYER



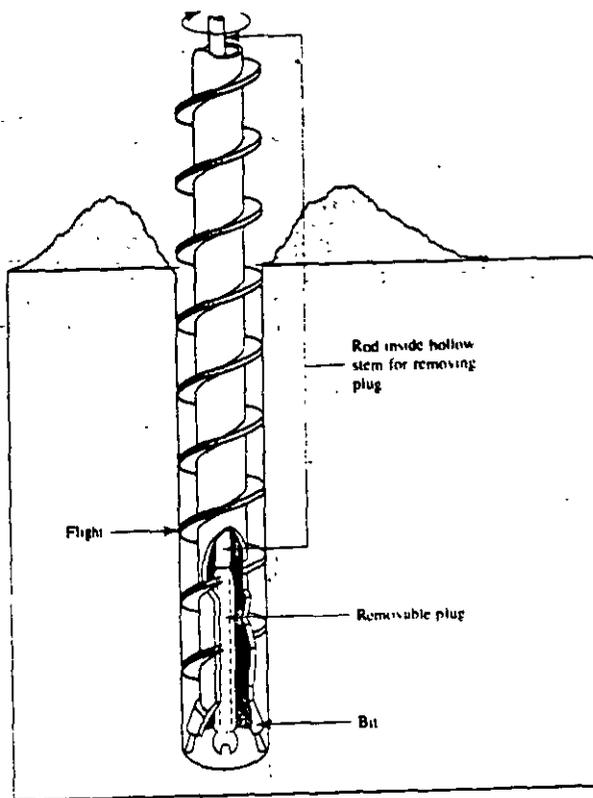


FIGURE 8.9 hollow-stem auger drill rod and bit. Source: M. L. Scalf et al. *Manual of Ground Water Sampling Procedures*, 1981. National Water Well Association. Used with permission.

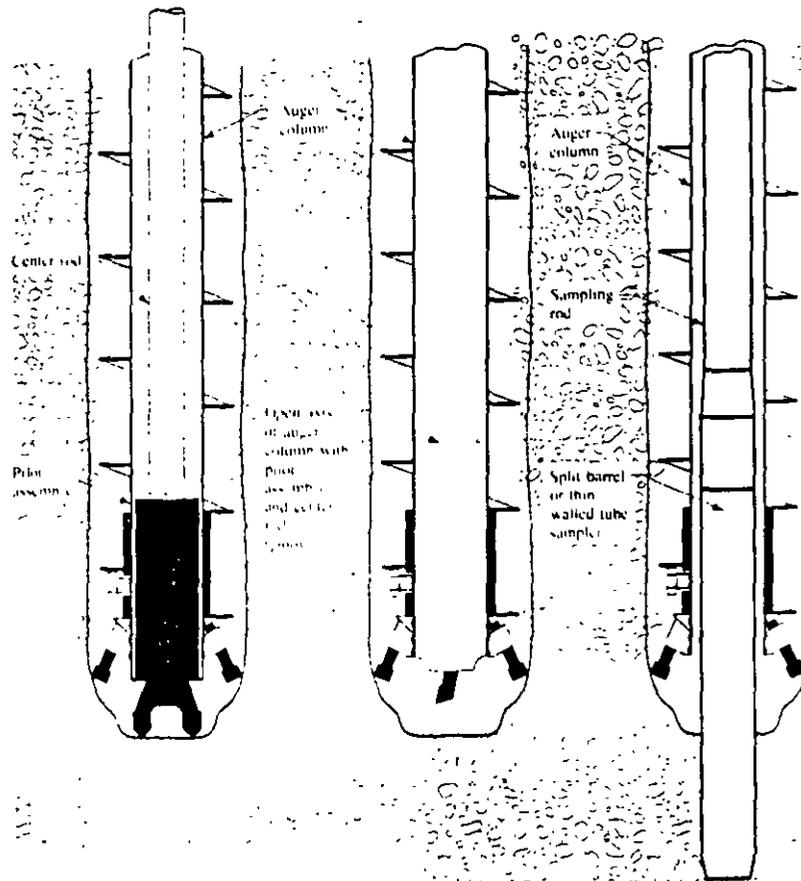


FIGURE 8.13 Sequential steps for the collection of a core sample through a hollow-stem auger. Source: Gier Macken. *Ground Water Monitoring Review*, no. 4 (1987): 51-62. Used with permission. Copyright © 1987 Water Well Journal Publishing Co.

AN EQUATION WHICH RELATES DATA FROM THREE
WELLS (X1, Y1, C1, X2, Y2, C2, X3, Y3, C3) WITH α_4
AND SOURCE DIMENSION γ - By David Edwards

(76)

Let $A1 = \frac{y_1 + \gamma/2}{2\sqrt{\alpha_4 x_1}}$	$A2 = \frac{y_1 - \gamma/2}{2\sqrt{\alpha_4 x_1}}$	$A3 = \frac{y_2 + \gamma/2}{2\sqrt{\alpha_4 x_2}}$	$A4 = \frac{y_2 - \gamma/2}{2\sqrt{\alpha_4 x_2}}$
$A5 = \frac{y_3 + \gamma/2}{2\sqrt{\alpha_4 x_3}}$	$A6 = \frac{y_3 - \gamma/2}{2\sqrt{\alpha_4 x_3}}$	C_0 = source strength v = velocity of contaminant λ = decay constant N = dispersivity in water. $N = \frac{x_2 - x_1}{x_2 - x_3}$	

- 1) $C_1 = \frac{C_0}{2} \exp\left\{\frac{x_1}{2\alpha_4} [1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/v}]\right\} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}$
- 2) $C_1 = \frac{C_0}{2} \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/v}]}{2\alpha_4} \cdot x_1\right\} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}$
- 3) $C_1 = \frac{C_0}{2} \left[\exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/v}]}{2\alpha_4} x_1\right\} \right]^{x_1} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}$ since $e^{ab} = (e^a)^b$
- 4) Likewise, $C_2 = \frac{C_0}{2} \left[\exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/v}]}{2\alpha_4} x_2\right\} \right]^{x_2} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 5) And, $C_3 = \frac{C_0}{2} \left[\exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/v}]}{2\alpha_4} x_3\right\} \right]^{x_3} \{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 6) $\frac{C_1}{C_2} = \frac{C_0/2 \left[\exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/v}]}{2\alpha_4} x_1\right\} \right]^{x_1} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}}{C_0/2 \left[\exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/v}]}{2\alpha_4} x_2\right\} \right]^{x_2} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}$
- 7) $\frac{C_1}{C_2} = \frac{\left[\exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/v}]}{2\alpha_4} x_1\right\} \right]^{x_1} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}}{\left[\exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/v}]}{2\alpha_4} x_2\right\} \right]^{x_2} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}} = \left[\exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/v}]}{2\alpha_4} (x_1 - x_2)\right\} \right] \frac{\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}}{\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}$
- 8) $\ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = \ln\left[\exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/v}]}{2\alpha_4} (x_1 - x_2)\right\} \right] + \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} - \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 9) $\ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = (x_1 - x_2) \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/v}]}{2\alpha_4} \right\} + \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} - \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 10) $(x_1 - x_2) \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/v}]}{2\alpha_4} \right\} = \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) - \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 11) Similarly, $(x_1 - x_3) \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/v}]}{2\alpha_4} \right\} = \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) - \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 12) Dividing, $\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3} = N = \frac{\ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) - \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}{\ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) - \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}}$
- 13) $N \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = N \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + N \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} - \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) - \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 14) $N \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) - \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) = -\ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + N \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} + \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \} - N \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 15) $\text{EXP}[N \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) - \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right)] = \text{EXP}[-\ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + N \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} + \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \} - N \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}]$
- 16) $\text{EXP}[\ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^N - \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right)] = \text{EXP}[\ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}^{N-1} + \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} - \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}^N]$
- 17) $\frac{\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^N}{\left(\frac{C_1}{C_3}\right)} = \frac{\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}^{N-1} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}{\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}^N} = \frac{[\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} \left(\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}\right) - \frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}] \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}{\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \} \frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}}$

AND, VOILA, THE EQUATION:

$$18) \left(\frac{C_2}{C_1}\right) \left[\left(\frac{C_1}{C_3}\right)^{\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}}\right] = \frac{\left\{ \text{erf } \frac{y_1 + \gamma/2}{2\sqrt{\alpha_4 x_1}} - \text{erf } \frac{y_1 - \gamma/2}{2\sqrt{\alpha_4 x_1}} \right\}^{\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}} \left\{ \text{erf } \frac{y_2 + \gamma/2}{2\sqrt{\alpha_4 x_2}} - \text{erf } \frac{y_2 - \gamma/2}{2\sqrt{\alpha_4 x_2}} \right\}}{\left\{ \text{erf } \frac{y_3 + \gamma/2}{2\sqrt{\alpha_4 x_3}} - \text{erf } \frac{y_3 - \gamma/2}{2\sqrt{\alpha_4 x_3}} \right\} \frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}}$$

x_1 cannot equal x_3 and C_1, C_3 cannot equal zero. -7-

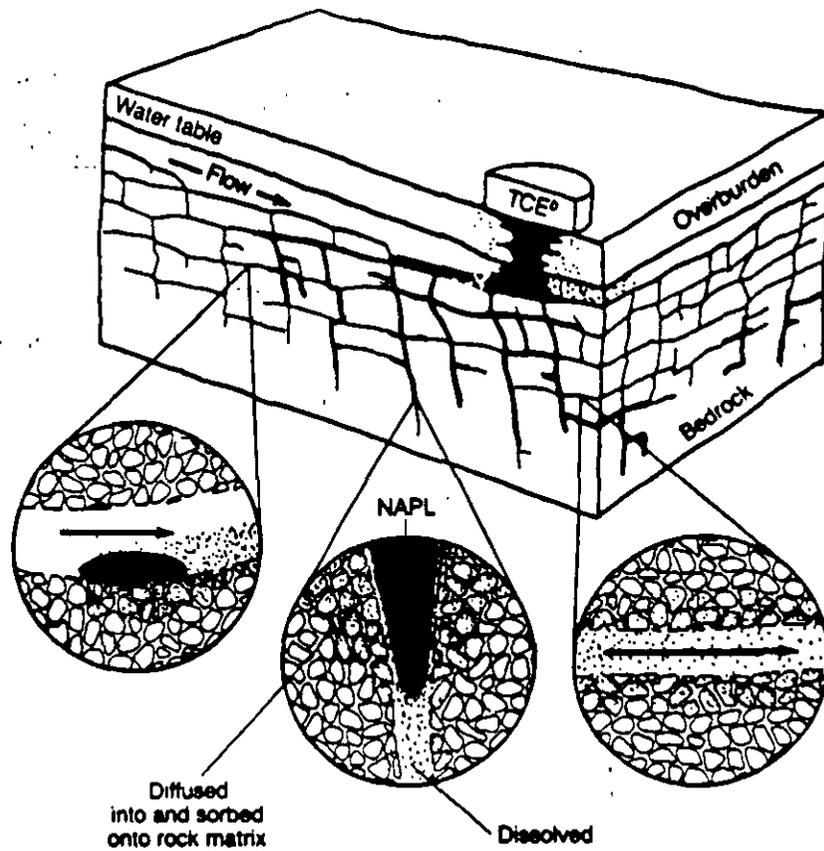


Figure 2.2 Schematic illustration of a DNAPL in a fractured porous medium showing geologic and pore scales. The DNAPL dissolves to create contamination in the fractures and in the low-permeability rock matrix (from Mackay and Cherry, 1989).

DE: PANKOU Y CHERRY, 1996

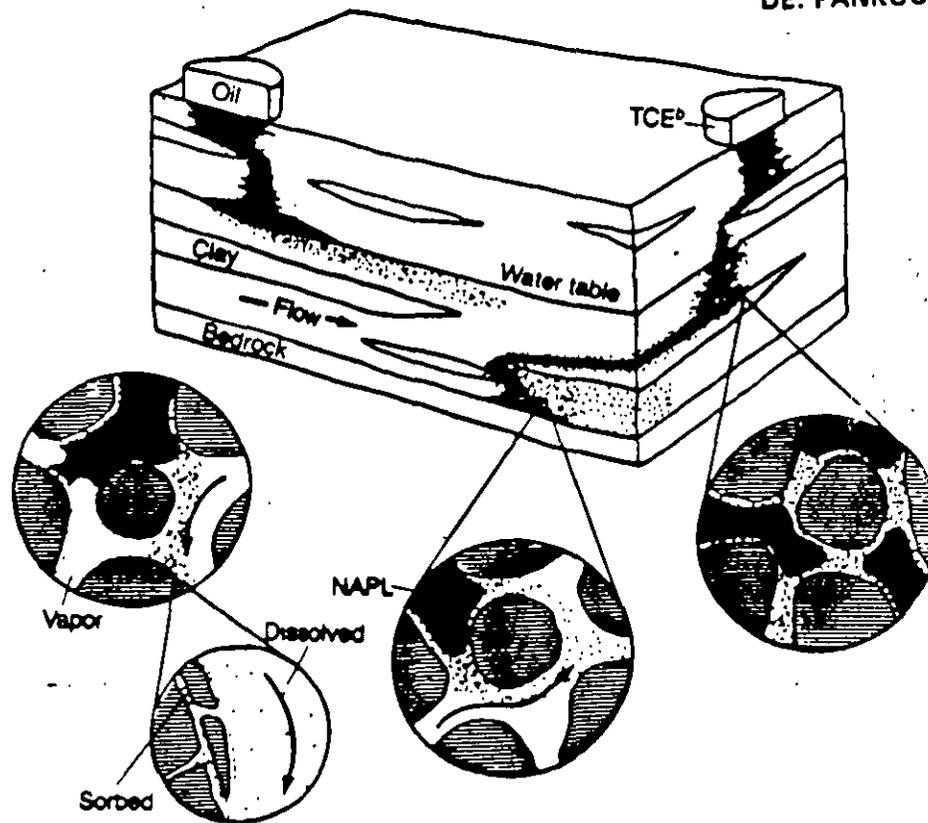


Figure 2.1 Schematic illustration of a DNAPL and a LNAPL in a porous medium, showing geologic and pore scales. A low-permeability clay layer deflects the DNAPL. DNAPL dissolution causes a plume (from Mackay and Cherry, 1989).

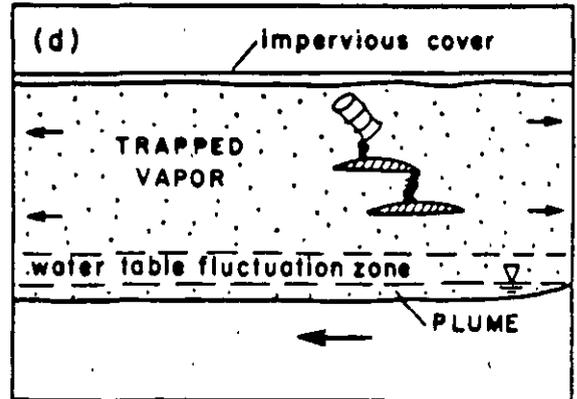
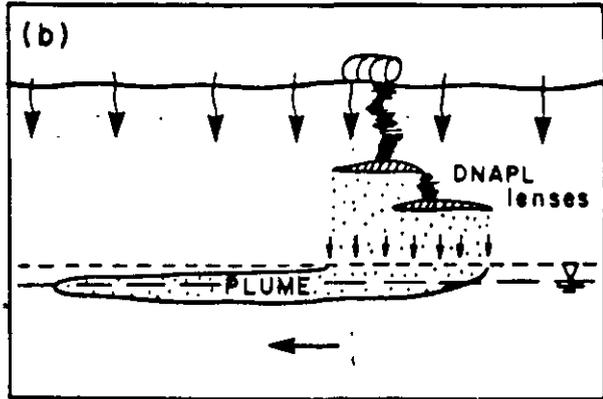
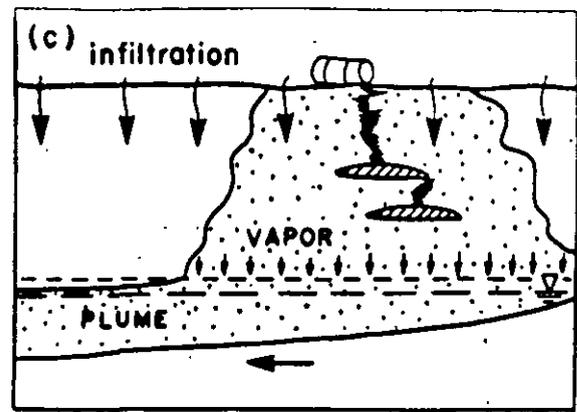
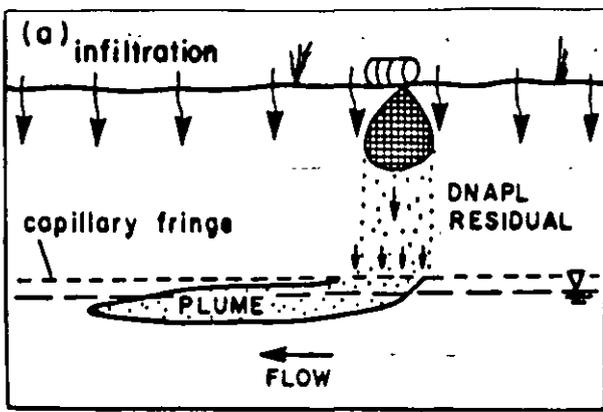
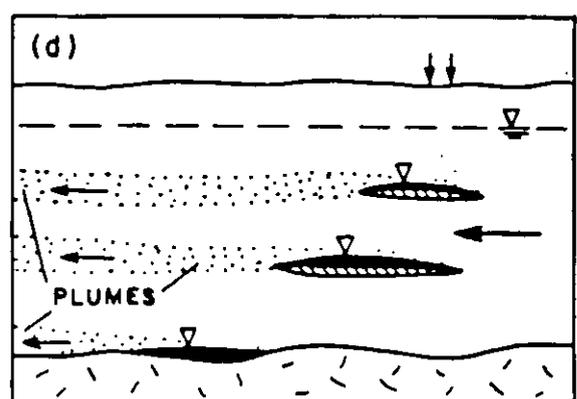
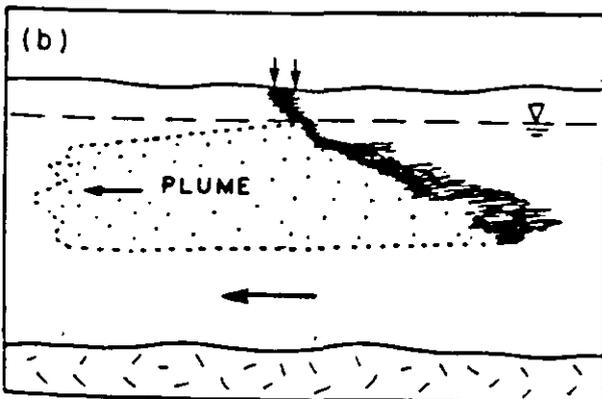
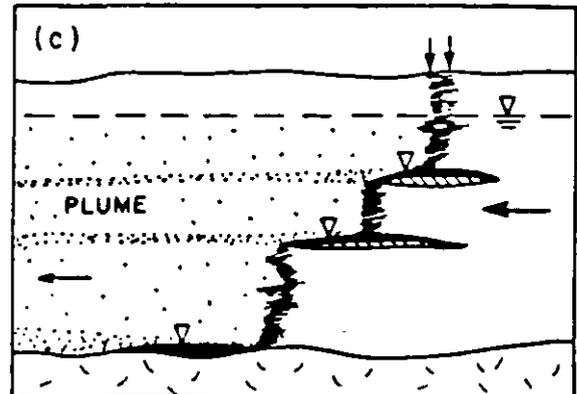
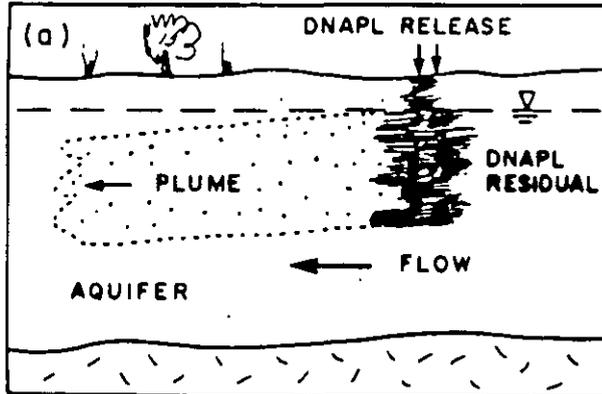


Figure 2.4 Conceptual scenarios for a DNAPL in the vadose zone in granular geologic deposits: a) homogeneous case - no vapor plume; b) heterogeneous case - no vapor plume; c) heterogeneous case - vapor plume; and d) effect of impervious ground cover over vapor-releasing DNAPL source.



DE: PANKOU Y CHERRY, 1996

Figure 2.5 Conceptual scenarios for a DNAPL in the groundwater zone in granular aquifers: a) partial penetration; b) partial penetration with offset; c) full penetration with offset; and d) same as part c, but at a later stage after DNAPL residual has disappeared due to dissolution in flowing groundwater.

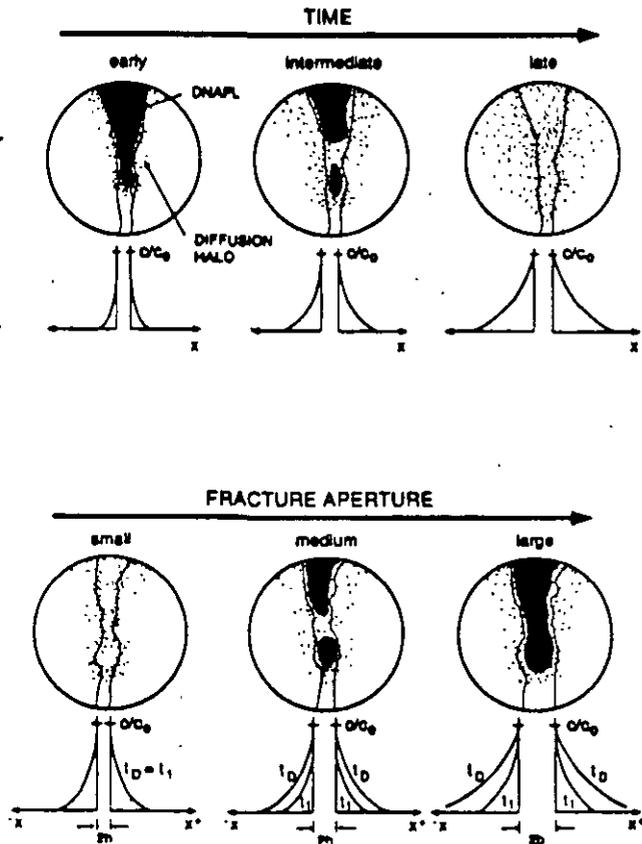
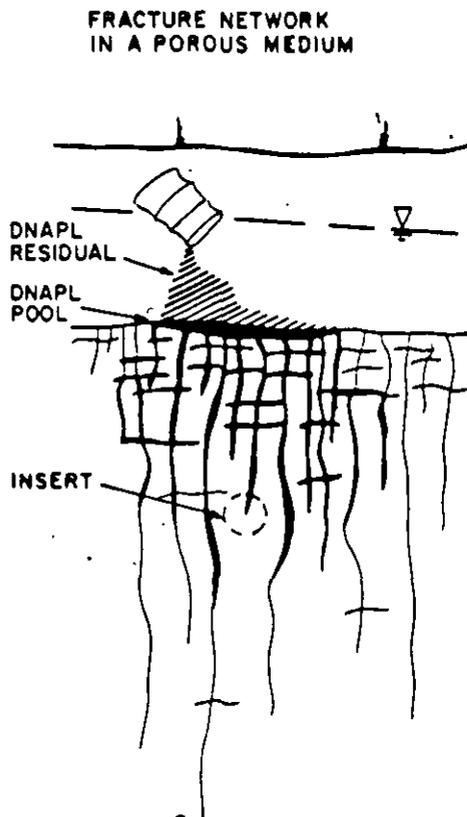
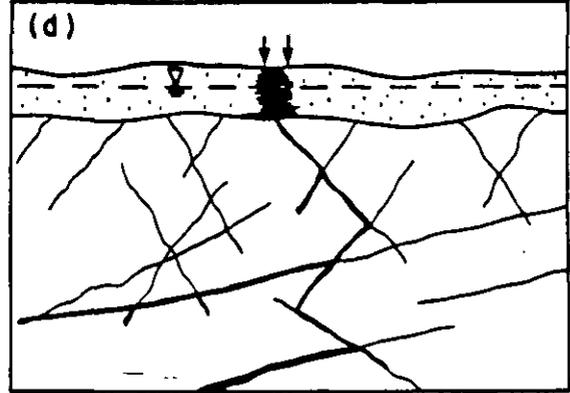
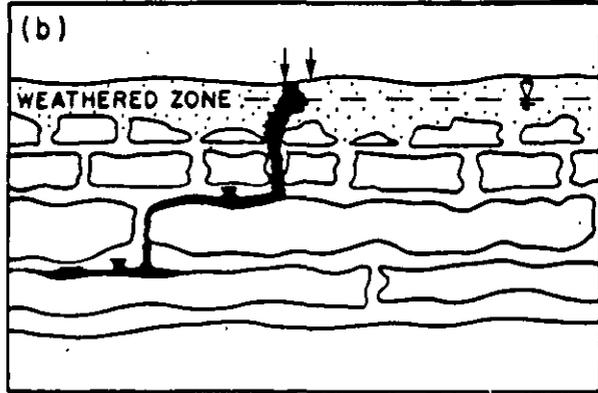
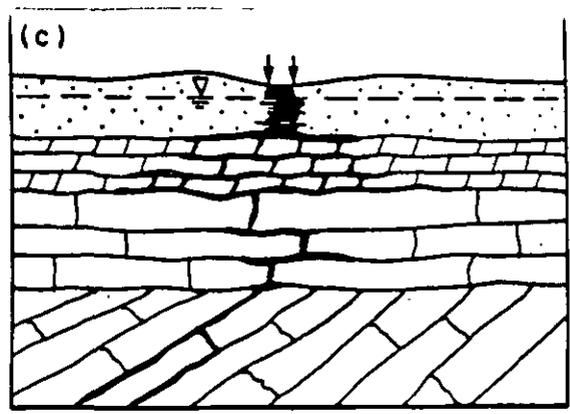
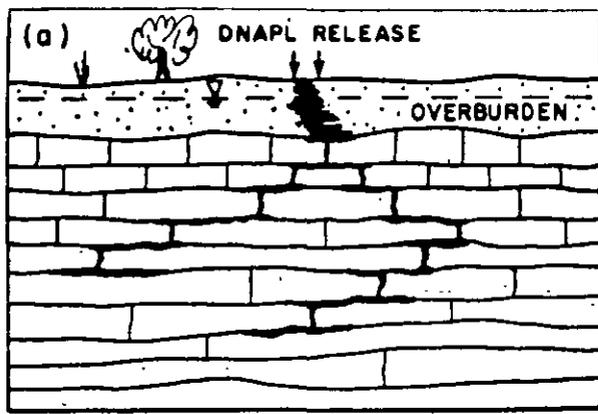


Figure 2.7 Conceptualization of DNAPL persistence and distribution with DNAPL mass loss due to diffusion in water-saturated fractures in a porous medium (such as a fractured clay till or sedimentary rock) as a function of: a) time; and b) fracture size (aperture). Diffusion halos around fractures containing DNAPL become large (more developed) with increases in time, as shown with the concentration vs. distance plots for the three relative time periods in part a. At any particular time t_1 , the DNAPL mass distribution will vary in different size fractures, with DNAPL disappearance occurring most rapidly in the smallest fractures; residual or disconnected DNAPL will be present in medium-sized fractures, and free DNAPL will be present in the largest fractures that are connected to overlying DNAPL pools. DNAPL disappearance times (t_D) increase with an increase with fracture aperture.

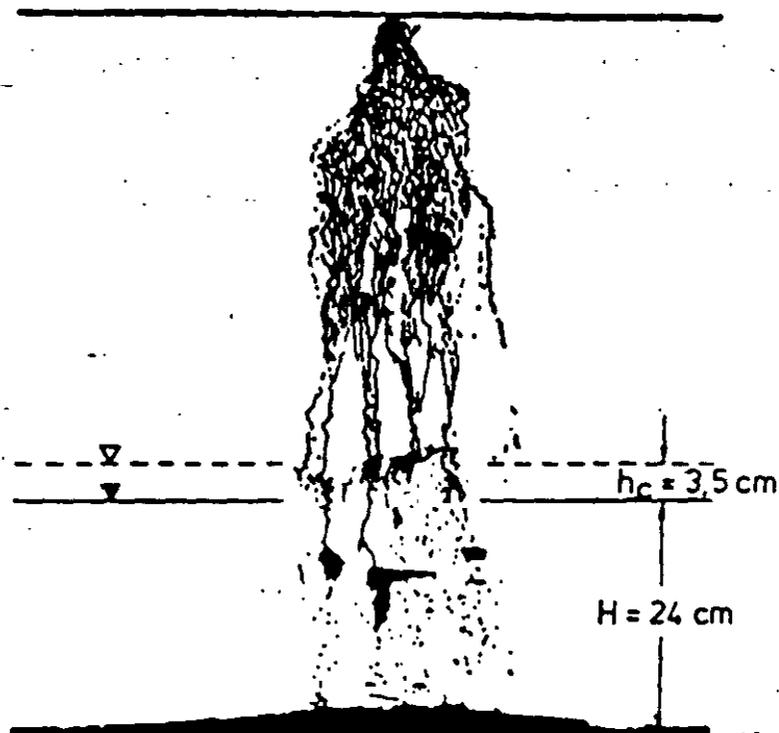


Figure 5.11 Tetrachloroethylene (PCE) release into a rough, unsaturated "fracture" with aperture 0.2 mm. (Reprinted with permission from Schwille (1988a).)

DE: PANKOU Y CHERRY, 15

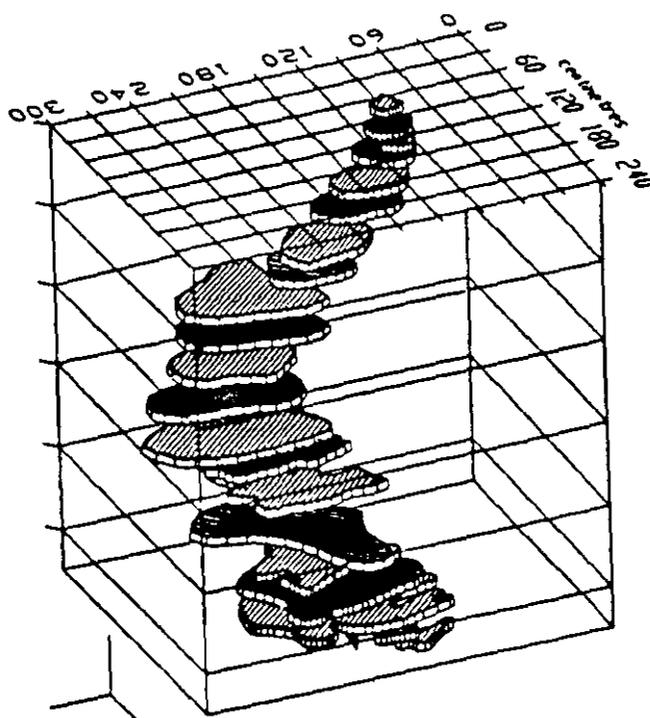


Figure 5.18 "Dnp-like" infiltration of tetrachloroethylene (PCE) into Borden sand. (Reprinted with permission from Poulsen and Kueper (1992).)

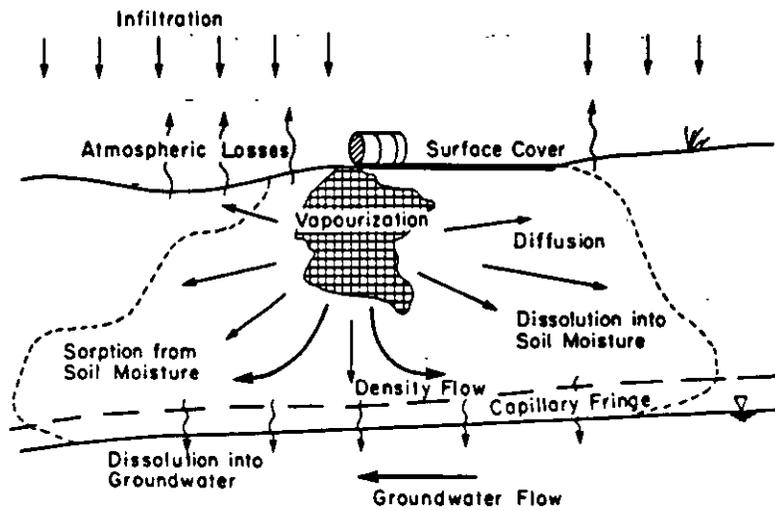


Figure 6.1 Conceptual model of vapor transport processes from a residual DNAPL source in the unsaturated zone. (Reprinted with permission from Mendoza and Frind, 1990a.)

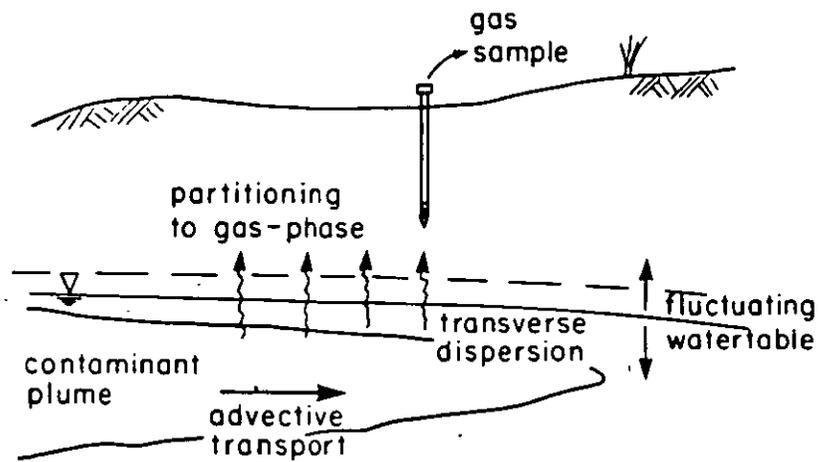


Figure 6.4 Conceptual model for processes involved in groundwater plume detection using soil-gas sampling techniques

DISPERSION

Fórmula que relaciona distancia, tiempo, dispersión, concentración inicial y concentración a diversas distancias.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{L - V_x T}{2\sqrt{D_L T}} \right) + \exp \left(\frac{V_x L}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{L + V_x T}{2\sqrt{D_L T}} \right) \right] \quad 1$$

Ecuación de la dispersión hidrodinámica (Fetter, 1988, pag.393).

Donde:

C_0 = Concentración inicial

L = Distancia

T = Tiempo

C = Concentración a la distancia L y el tiempo T

V_x = Velocidad linear media del agua subterránea

$$V_x = \frac{K}{n_e} \frac{dh}{dl} \quad 2$$

K = conductividad hidráulica

n_e = porosidad efectiva

dh/dl = gradiente hidráulico

D_L = Coeficiente de dispersión longitudinal

$$D_L = \alpha_L V_x + D^* \quad 3$$

D^* = Difusión molecular (10^{-10} -- 10^{-11} para materiales finos, y 10^{-9} para grandes, en m/s^2)

α_L = Dispersividad (unidades de distancia)

$$\alpha_L \approx 0.1L \quad 4$$

Ejemplo. Determinar el tiempo en que el frente de la pluma de un contaminante con un valor de 5 mg/l llega a un pozo de explotación localizado a una distancia de 2000 metros del pozo de recarga. Se seleccionó al parámetro NO₃ por ser el que presenta mayor concentración en el agua de recarga. Se marcó como 5 mg/l el frente de la pluma contaminante debido a que corresponde al criterio para agua potable.

Por lo tanto los valores iniciales son:

$$C_0 = 515 \text{ mg/l (NO}_3\text{)}$$

$$C = 5 \text{ mg/l (NO}_3\text{)}$$

$$L = 2000 \text{ m}$$

$$T = \text{incognita}$$

$$K = 2.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$dh/dl = 0.01$$

$$n_a = 0.23$$

$$D^* = 10^{-9} \text{ m/s}^2$$

sustituyendo los valores en la fórmula (2)

$$V_x = \frac{2.2 \times 10^{-5}}{0.23} \times 0.01 = 9.6 \times 10^{-7} = 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$\alpha_L = 0.1(2000) = 200 \text{ m}, \text{ (formula 4)}$$

$$D_L = 200 \times 10^{-6} + 10^{-9} = 2 \times 10^{-4} \text{ m/s}, \text{ (formula 3)}$$

Cuando la dispersividad(α_L), longitud (L) o el tiempo (T) son grandes, el segundo término del lado derecho de la expresión general (ecuación 1) tiende a cero. (Freeze and Cherry, 1979, pag. 391).

Por ello y sustituyendo los valores en la ecuación (1) queda:

$$\frac{5}{515} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{2000 - 10^{-6} T}{2\sqrt{2 \times 10^{-4} T}} \right) \right]$$

$$0.02 = \operatorname{erfc} \left(\frac{2000 - 10^{-6} T}{0.028\sqrt{T}} \right) \quad \text{-----} \quad 5$$

$$\text{si denominamos } X = \left(\frac{2000 - 10^{-6} T}{0.028\sqrt{T}} \right) \quad \text{-----} \quad 6$$

entonces:

$$\operatorname{erfc}(x) = 0.02$$

de la tabla (apendice 13, Fetter, 1988):

$$\operatorname{erfc}(1.6) = 0.023652$$

$$\operatorname{erfc}(1.7) = 0.016210$$

$$\text{por lo tanto: } \frac{0.023652 - 0.016210}{10} = 0.0007442 \quad \text{para cada incremento}$$

de 0.01 en el rango de 1.6 a 1.7

$$\text{por lo tanto: } \operatorname{erfc}(1.65) = 0.0199$$

$$\text{por lo tanto: } x = 1.65$$

$$\text{sustituyendo en (6): } 1.65 = \left(\frac{2000 - 10^{-6} T}{0.028\sqrt{T}} \right)$$

$$0.046\sqrt{T} = 2000 - 10^{-6} T$$

elevando al cuadrado:

$$0.002T = 4 \times 10^6 - 0.004T + 10^{-12} T^2$$

$$10^{-12} T^2 - 0.006T + 4 \times 10^6 = 0$$

$$T = \frac{0.006 \pm \sqrt{0.006^2 - 4 \times 10^{-12} \times 4 \times 10^6}}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T = \frac{0.006 \pm \sqrt{3.6 \times 10^{-5} - 1.6 \times 10^{-5}}}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T = \frac{0.006 \pm 0.0045}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T_1 = \frac{5.3 \times 10^{-3}}{10^{-12}}$$

$$T_2 = \frac{7.5 \times 10^{-4}}{10^{-12}}$$

$$T_1 = 5.3 \times 10^9 \text{ seg}$$

$$T_2 = 7.5 \times 10^8 \text{ seg}$$

$$T_1 = 170 \text{ años}$$

$$T_2 = 24 \text{ años}$$

El valor de tiempo real obtenido de la deducción de la ecuación cuadrática anterior es de 24 años.

EJEMPLO:

Se busca la distancia L del frente de Concentración C en al tiempo T

Concentración inicial (Co) mg/L:	515
Concentración del frente (C) mg/L:	5
Tiempo (T) años:	10
Tiempo en segundos:	3.15E+08
Conductividad hidráulica (K) m/s:	2.2E-05
Porosidad:	0.23
Gradiente:	0.01
Velocidad linear (Vx) m/s:	9.6E-07
Difusión molecular (D*) m/s ² :	1.00E-09
Dispersividad (alfa) m:	82 ** Se obtiene de aproximaciones de (alfa) = 0.
Dispersión (D _L) m/s ² :(formula 3)	7.84E-05

De formula (1):

$$\frac{2C}{C_o} = \operatorname{erfc}\left(\frac{L - V_x T}{2\sqrt{D_L T}}\right)$$

Si denominamos

$$X = \frac{L - V_x T}{2\sqrt{D_L T}} \dots\dots(7)$$

entonces:

$$\frac{2C}{C_o} = \operatorname{erfc}(X)$$

$\operatorname{erfc}(x) = 0.019417$

x (limite inferior):	1.6	$\operatorname{erfc}(\text{limite inferior}):$	0.023652
x (limite superior):	1.7	$\operatorname{erfc}(\text{limite superior}):$	0.016210

incremento por 0.001 de unidad:	0.000744
No. de incrementos:	4.310
X:-	1.66

Sustituyendo X en formula (7):

$$L = X2\sqrt{D_L T} + V_x T$$

Se obtiene que L = 822.83 m

APPENDIX 13 Values of the error of x [$\text{erf}(x)$] and the complementary error function of x [$\text{erfc}(x)$]. Note that $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$.

x	$\text{erf}(x)$	$\text{erfc}(x)$
0	0	1.0
0.05	0.056372	0.943628
0.1	0.112463	0.887537
0.15	0.167996	0.832004
0.2	0.222703	0.777297
0.25	0.276326	0.723674
0.3	0.328627	0.671373
0.35	0.379382	0.620618
0.4	0.428392	0.571608
0.45	0.475482	0.524518
0.5	0.520500	0.479500
0.55	0.563323	0.436677
0.6	0.603856	0.396144
0.65	0.642029	0.357971
0.7	0.677801	0.322199
0.75	0.711156	0.288844
0.8	0.742101	0.257899
0.85	0.770668	0.229332
0.9	0.796908	0.203092
0.95	0.820891	0.179109
1.0	0.842701	0.157299
1.1	0.880205	0.119795
1.2	0.910314	0.089686
1.3	0.934008	0.065992
1.4	0.952285	0.047715
1.5	0.966105	0.033895
1.6	0.976348	0.023652
1.7	0.983790	0.016210
1.8	0.989091	0.010909
1.9	0.992790	0.007210
2.0	0.995322	0.004678
2.1	0.997021	0.002979
2.2	0.998137	0.001863
2.3	0.998857	0.001143
2.4	0.999311	0.000689
2.5	0.999593	0.000407
2.6	0.999764	0.000236
2.7	0.999866	0.000134
2.8	0.999925	0.000075
2.9	0.999959	0.000041
3.0	1.999978	0.000022
∞	1.00000	0.00000

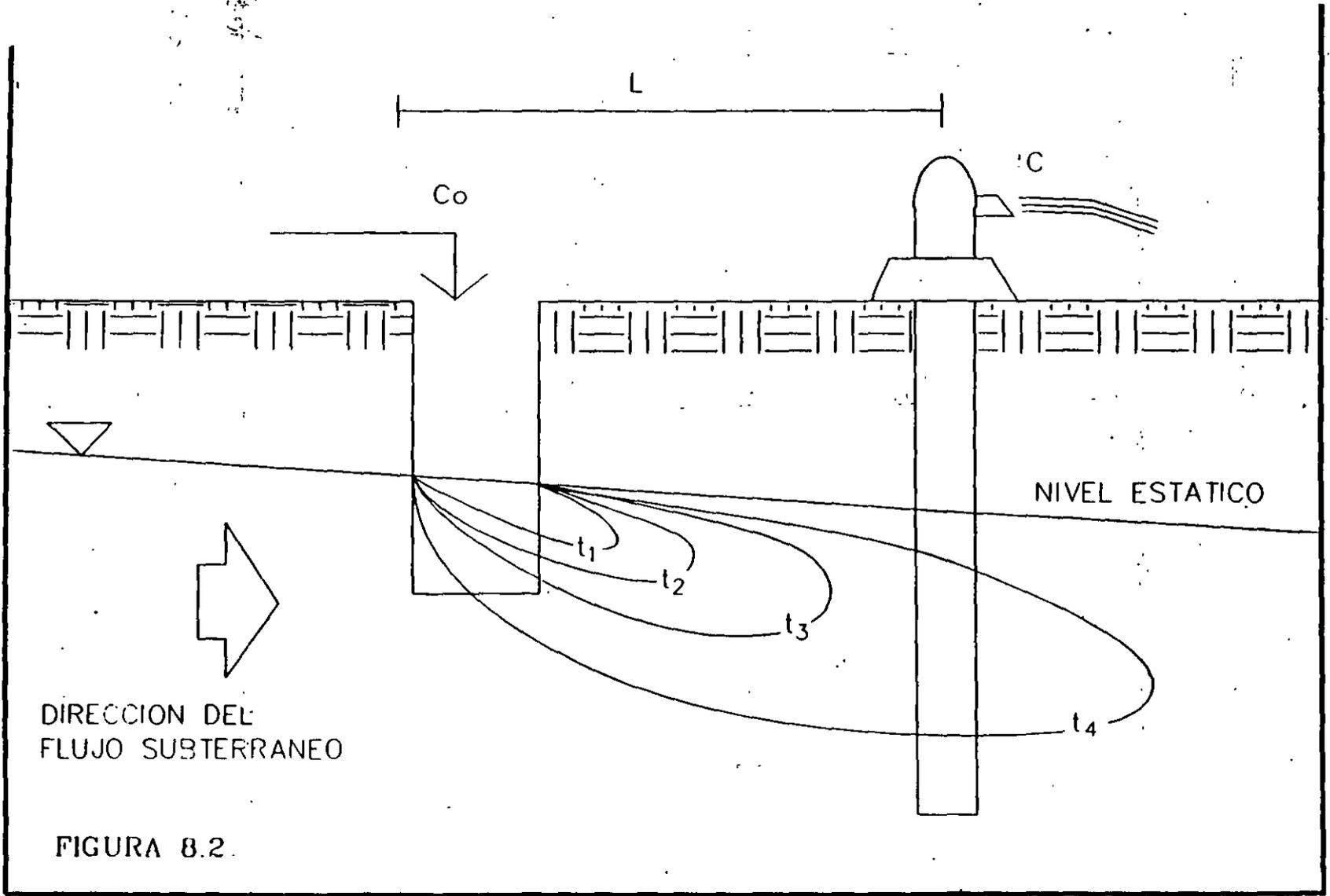


FIGURA 8.2.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

TEMA :

BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS Y CUERPOS DE AGUA

**ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE – OCTUBRE 1999**

BIORREMEDIACIÓN: UNA ALTERNATIVA PARA LA LIMPIEZA DE SUELOS Y ACUÍFEROS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

Susana Saval

Coordinación de Bioprocesos Ambientales, Instituto de Ingeniería, UNAM
Apartado Postal 70-472, Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F.

INTRODUCCIÓN

Los principales problemas de contaminación de suelos y acuíferos en México, son los ocasionados por derrames de hidrocarburos como: petróleo crudo, combustóleo, gasóleo, gasolina, diesel y turbosina, así como la disposición de recortes de perforación, lodos aceitosos y aceites lubricantes gastados, entre otros. Cada uno de estos materiales tiene su propia complejidad química, y la situación se agrava porque en una mayoría de casos los contaminantes se presentan en forma de mezcla, y además, se encuentran intemperizados.

En general, los hidrocarburos tienen menor densidad que el agua, por lo que tienden a flotar cuando están en contacto con ésta. Petróleo, combustóleo y desechos petroleros, por su color y aspecto, se hacen evidentes a simple vista cuando se encuentran en la superficie. Si son depositados en el suelo, prácticamente no penetran al subsuelo debido a su alta viscosidad, pero los lixiviados generados por las lluvias arrastran los compuestos solubles. Gasolinas, turbosina, diesel y gasóleo fluyen fácilmente hacia el subsuelo, durante su trayectoria son adsorbidos por el material geológico hasta que alcanzan el nivel freático, ahí se dispersan de acuerdo a la dirección de la corriente subterránea, creando así manchas de contaminación de gran superficie.

Entre las alternativas que existen, en el mercado para la limpieza de sitios contaminados, la biorremediación se ha perfilado como una opción muy atractiva por ser relativamente económica y amable al ambiente. En este trabajo se plantean diversos aspectos que conducen hacia el desarrollo exitoso y confiable de un proyecto de biorremediación en campo, y se discute la situación específica de México.

CARACTERÍSTICAS DE LAS TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

La más importante característica de la biorremediación es que los contaminantes no se destruyen, sino que a través de la actividad microbiana se transforman en compuestos químicamente diferentes, algunos de ellos pueden ser completamente degradados, de forma tal que cumple con la primera ley de la termodinámica. Cuando la transformación llega hasta la generación de bióxido de carbono, se habla entonces de una completa mineralización. La complejidad química de los contaminantes y la limitación de nutrientes esenciales para la actividad metabólica, hacen que el proceso requiera de varios años, y en algunos casos no se logra su completa degradación.

En los sitios donde ocurren derrames de hidrocarburos que no son atendidos inmediatamente, la flora microbiana presente en el suelo se somete a un proceso de selección natural, en el que los microorganismos sobrevivientes son aquellos que desarrollaron capacidad degradadora. En esos casos, la mejor opción es utilizar la flora autóctona del sitio, en lugar de agregar microorganismos exógenos. Para tratar derrames recientes, probablemente será necesario recurrir a preparados microbianos frescos.

VENTAJAS DE LA BIORREMEDIACIÓN

Una ventaja importante de la biorremediación es su bajo costo en relación con otros tratamientos. Es difícil hacer una comparación de costos, porque es necesario conocer las características de cada sitio en particular, pero en términos generales se puede decir que la biorremediación es por lo menos 10 veces más económica que la incineración y 3 veces más económica que algunas tecnologías fisicoquímicas de inmovilización. Este bajo costo se debe a varios factores, como un menor gasto de energía, bajo costo de los nutrientes y la operación bajo condiciones ambientales, que hace que su uso sea muy atractivo para los países en vías de desarrollo como México.

La biorremediación es una tecnología limpia, ya que los contaminantes pueden ser transformados hasta compuestos inocuos como el bióxido de carbono. Además de que cuando los nutrientes se agotan, incluyendo los contaminantes empleados como fuente de carbono, los microorganismos mueren.

La versatilidad de la biorremediación se basa en que puede adaptarse a las necesidades de cada sitio. Así, puede aplicarse bioestimulación si únicamente se requiere la adición de nutrientes para la actividad metabólica de la flora degradadora autóctona; bioincremento, cuando la proporción de la flora degradadora autóctona es muy reducida y se hace necesaria la adición de microorganismos degradadores exógenos; o bien, bioventeo cuando es imprescindible el suministro de oxígeno para estimular la actividad microbiana degradadora presente en el lugar. En cualquiera de las opciones anteriores, puede realizarse fuera del sitio si la contaminación

está en el suelo superficial, pero necesariamente *in situ* cuando los contaminantes han alcanzado el manto freático.

Cuando el tratamiento se hace fuera del sitio, pueden utilizarse bioceldas o biopilas sobre superficies impermeables que permitan la colección de lixiviados, de manera que no se contamine el espacio limpio. Además, después de la biorremediación el suelo se puede destinar al cultivo de especies vegetales para reincorporarlo a sus funciones biológicas más conocidas.

En el caso de aguas subterráneas, la biorremediación se aplica a través del bombeo-tratamiento-recarga que consiste en extraer el agua subterránea, promover la biodegradación de los contaminantes en reactores instalados en la superficie y posteriormente devolverla al acuífero, o bien, inyectar nutrientes y bacterias, de tal forma que se establece una recirculación y el sitio mismo se convierte en un biorreactor. A pesar de ser la tecnología más empleada a nivel mundial, existen ciertos aspectos que determinan el éxito de su aplicación por ejemplo: los contaminantes pueden estar fuertemente adsorbidos al material geológico, o bien, estar presentes en zonas de baja permeabilidad, lo que ocasiona limitaciones en la transferencia de masa.

DESVENTAJAS DE LA BIORREMEDIACIÓN

La biorremediación no puede aplicarse en campo cuando:

- se tienen compuestos radioactivos
- los compuestos orgánicos contaminantes son altamente halogenados
- existen metales pesados en concentraciones tales que inhiben la actividad microbiana
- las condiciones microambientales son desfavorables

Debido a que cada microorganismo tiene sus propias características, la tolerancia que presentan a cada situación es muy particular. Puede ocurrir que cuando las concentraciones de los contaminantes orgánicos son muy altas, se observan fenómenos de inhibición de la actividad microbiana.

Cuando el material geológico es netamente arcilloso, no es muy recomendable la biorremediación, porque la baja permeabilidad limita la transferencia de masa en el sistema. Lo anterior es determinante cuando la contaminación llega hasta el nivel freático y el tratamiento necesariamente será *in situ*. Para suelos superficiales este problema puede superarse si se agrega arena, o bien, algunos residuos agroindustriales, con lo cual se aumenta la permeabilidad y se favorece así, la transferencia de masa.

DESARROLLO DE PROYECTOS DE BIORREMEDIACIÓN

En el desarrollo de proyectos en biorremediación es conveniente integrar expertos en las diferentes disciplinas involucradas, como son: biotecnología, geohidrología, ciencias del suelo, ingeniería, química y legislación ambiental, quienes deben integrarse completamente en el problema desde que se inicia la caracterización. Esto permitirá sentar las bases para plantear estrategias que conduzcan a la solución de cada problema en particular.

La caracterización de un sitio contaminado debe considerarse como un diagnóstico muy preciso, ya que de aquí se genera la información que será utilizada, tanto para la definición de responsabilidades, como para la planeación de las actividades de remediación. El trabajo de campo se inicia con la prospección del sitio y su caracterización en la que se incluyen tres enfoques básicos: geohidrológico, fisicoquímico y microbiológico. La evaluación integrada de los resultados obtenidos permitirán definir la posibilidad de aplicar una biorremediación mediante estrategias *ad hoc* para cada sitio.

En la práctica común, la caracterización microbiológica es poco considerada, a pesar de que es determinante para definir la aplicabilidad de una biorremediación. Consta de dos tipos de estudios, la cuantificación de los microorganismos presentes incluyendo las pruebas de biofactibilidad, y los estudios de biodegradabilidad en el laboratorio. Estos últimos son indispensables para predecir el tiempo que tomará la biodegradación en campo.

La estrategia para la limpieza de un sitio es única para cada caso, y debe estar bien soportada en los resultados de su caracterización, de la misma forma que el médico que opera a un paciente, es aquel que diagnosticó la enfermedad y después de varios estudios y análisis sugiere una cirugía. Dada la importancia de la caracterización de un sitio, no se debe considerar que ésta es solo un requisito administrativo, sino una verdadera necesidad técnica en la que no se deben escatimar recursos y se deben involucrar expertos en el área.

Por lo que respecta al seguimiento de la concentración de contaminantes, existen dos enfoques uno de ellos es seguir la reducción de los compuestos químicos más tóxicos los cuales sirven como indicadores y el otro es utilizar un parámetro más general. Por ejemplo, en el caso de sitios contaminados con gasolinas se puede hacer referencia a los hidrocarburos monoaromáticos volátiles: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), o bien, al contenido de hidrocarburos totales. Al establecer los límites de limpieza será necesario definir cuál de los dos conceptos es el más adecuado, dado que el primero se refiere a la reducción de la toxicidad y el segundo a la limpieza del sitio. La tendencia actual parece inclinarse hacia una evaluación de riesgo, pero también se recurre a normatividades extranjeras que varían en un amplio margen. La primera opción toma su tiempo y tiene un costo, con la segunda se tendrá la incertidumbre de saber si fue la más adecuada.

RIESGOS DE LA BIORREMEDIACIÓN

Una de las preocupaciones actuales dentro del campo de la biorremediación en México, es la constante introducción de productos comerciales patentados de origen microbiano. Desde un

punto de vista muy riguroso, se sabe que los microorganismos nativos no son patentables porque son parte de la biodiversidad, solamente se pueden patentar aquellos que han sido modificados genéticamente.

Se ha visto que a México han llegado productos microbianos vendidos como "polvos mágicos" desconocidos capaces de destruir todo tipo de contaminantes, los cuales están siendo comercializados por gente de negocios que no tiene conocimientos de microbiología o de biotecnología y mucho menos, de bioseguridad.

Una de las recomendaciones de los fabricantes de productos microbianos es realizar aplicaciones consecutivas al suelo contaminado con la finalidad de alcanzar una cierta proporción microbiana, pero la realidad en muchos casos es que los microorganismos mágicos no logran adaptarse a las condiciones del sitio, y por más adiciones que se hagan no se registra la actividad degradadora.

Además de los productos microbianos, también se venden aditivos que son productos químicos patentados de formulación también desconocida, los cuales pueden ser nutrientes, o bien, tensoactivos. Estos últimos no siempre son biodegradables y cuando son agregados al suelo ayudan a la dispersión de los contaminantes, más que a su degradación. Cuando la aplicación de dichos productos se hace en una biopila o biocelda se pueden controlar dentro del sistema, pero si el tratamiento es *in situ* la dispersión de contaminantes ocurre en las aguas subterráneas o cuerpos de agua superficiales.

APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN EN MÉXICO

A pesar de que no se cuenta en México con un inventario de sitios contaminados que sea del dominio público y que sirva de base para la estimación del mercado real de la biorremediación, es obvio que éste existe por tratarse de un país netamente petrolero. De hecho, esa es la razón por la que un importante número de compañías extranjeras llegan diariamente a México con la finalidad de vender sus productos o tecnologías de remediación de sitios. En varios casos los resultados han sido poco exitosos, por las bajas eficiencias de limpieza y un mayor deterioro ambiental por la adición de químicos desconocidos.

La necesidad de dar solución urgente a varios problemas ambientales, muchas veces lleva a la aplicación de tecnologías disponibles en el mercado que no siempre aportan los resultados esperados. Un aspecto indispensable para lograr éxito durante la aplicación de cualquier tipo de tecnología, es la necesidad de adaptar e innovar a casos específicos, o incluso realizar nuevos desarrollos, situación que aún no se ha dado en biorremediación.

Un aspecto que al que se le ha dado poca importancia es que las características de cada suelo son diferentes y que no es una regla general que los microorganismos se adapten fácilmente a cualquier hábitat. En el caso de México, los suelos tienen características físicas, químicas y biológicas muy particulares, que los hacen diferentes a los suelos de otro lugar del mundo. Por

lo que respecta a las características de los contaminantes, conviene resaltar dos aspectos que son: su complejidad química y el hecho de que en algunos casos, tienen ya un avanzado grado de intemperismo. Estos aspectos, que por lo general no son tomados en consideración, dificultan el tratamiento de un suelo contaminado y algunas tecnologías probadas exitosamente en otros países no han funcionado en México.

Las compañías que cuentan con un buen respaldo científico deben tener bien identificadas las virtudes y limitaciones de sus tecnologías, con la finalidad de tomar la decisión de cuándo es conveniente sugerir su aplicación y cuándo es mejor emplear otra opción. Para aquellas tecnologías que se han aplicado en el extranjero es indispensable asegurarse de que hayan tenido experiencias previas al tratar contaminantes de composición conocida y comparables al tipo de contaminantes que comúnmente se encuentran en México.

Un aspecto adicional que conviene señalar es que una gran mayoría de instrumentos jurídico-administrativos que se manejan en la práctica cotidiana, perjudican el desarrollo de trabajos ambientales enfocados a la limpieza de sitios. Para tomar una buena decisión se debe considerar que la mejor propuesta económica no siempre corresponde a la mejor alternativa técnica. Algo que debe enfatizarse es la importancia de realizar buenos trabajos de caracterización del sitio, de la contaminación y de la factibilidad de realizar el proceso por vía biotecnológica. En la práctica común los trabajos de caracterización están muy limitados y no están encaminados a comprobar que la biorremediación funcionará en campo. Esto permitiría conocer perfectamente el comportamiento del sitio y así plantear estrategias *ad hoc* para su remediación.

Las oportunidades de negocio para la biorremediación existen, pero dada la gran variedad de opciones que existen en el mercado y la poca experiencia de las empresas ambientales en este campo, se plantea la necesidad de establecer políticas en las que se demuestren aspectos como :

- conocer la base científica de funcionamiento de la tecnología
- la existencia de experiencias previas, buenas o malas, en otros sitios donde se hayan tratado contaminantes de composición química similar
- que se cuenta con el personal técnico idóneo que será responsable del proyecto en campo y que domina la tecnología, de tal forma que pueda solucionar imprevistos durante el proceso
- haber realizado una caracterización completa del sitio, incluyendo las pruebas de biofactibilidad para el problema específico que va a ser tratado
- justificar el uso de productos microbianos y de aditivos y dar a conocer su composición y características de seguridad hacia el ambiente
- contar con un protocolo bien elaborado donde se establezca el seguimiento que se dará al proceso durante la aplicación de la tecnología en campo

En los casos donde no se tengan experiencias previas bajo las condiciones que imperan en México, será conveniente realizar pruebas piloto de demostración en campo, antes de operar en escala real.

Los aspectos mencionados conforman el marco de referencia bajo el cual, el Instituto Nacional de Ecología dará la certificación a tecnologías para la remediación de sitios contaminados. Para

este procedimiento se apoyan en órganos colegiados representados por universidades y centros de investigación de prestigio en el área. En este sentido, el Instituto de Ingeniería ha venido colaborando de manera muy cercana con las autoridades ambientales actuales.

BIBLIOGRAFÍA DE APOYO

Alper, J., 1993. Biotreatment firms rush to marketplace. *Bio/Technology* 11: 973-975.

Autry A.R. and Ellis G.M., 1992. Bioremediation: an effective remedial alternative for petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *Environ. Progress* 11(4): 318-323.

Blackburn J.W. and Hafker W R., 1993 The impact of biochemistry, bioavailability and bioactivity on the selection of bioremediation techniques. *TIBTECH* 11: 328-333.

Caplan J.A., 1993. The worldwide bioremediation industry: prospects for profit. *TIBTECH* 11: 320-323.

Finnerty W.R., 1994. Biosurfactants in environmental biotechnology. *Curr. Op. Biotechnol.* 5: 291-295

Gibson D.T. and Subramanian V., 1984. Microbial degradation of aromatic hydrocarbons, in Gibson D.T. (Ed.) Microbial degradation of organic compounds. *Microbiology Series* Vol. 13: 181-252.

Harvey R.W., 1993. Fate and transport of bacteria injected into aquifers *Curr. Op. in Biotechnol.* 4: 312-317.

Heitzer A., and Saylor G.S., 1993. Monitoring efficacy of bioremediation. *TIBTECH* 11: 334-343.

Instituto Nacional de Ecología, 1997. Requisitos técnico-administrativos que deben cumplir los promoventes de servicios para la restauración de sitios contaminados por materiales y/o residuos peligrosos, Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas.

Liu S. and Suflita J.M., 1993. Ecology and evolution of microbial populations for bioremediation. *TIBTECH*. 11: 344-352.

Riser-Roberts E., 1992. *Bioremediation of petroleum contaminated sites*. C.K. Smoley, Boca Raton, FL, USA.

Rogers J.A., Tedaldi D.J., and Kavanaugh M.C., 1993. A screening protocol for bioremediation of contaminated soil. *Environ. Progress* 12(2): 146-156.

Saval, S., 1995. Remediación y restauración, en *PEMEX: Ambiente y Energía. Los Retos del Futuro*, coedición UNAM-Petróleos Mexicanos, Mexico, pp 151-189.

Solleiro, J.L. and Castañón, R., 1996. Environmental Biotechnologies in Mexico: Potential and Constraints for Development and Difussion. In *Biotechnology for Sustainable Development*, University of Tennessee, Knoxville, USA, in press.

BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS: SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS EN MÉXICO

Susana Saval
Instituto de Ingeniería, UNAM
Apdo. Postal 70472, México, D.F. 04510, México
e-mail: ssb@pumas.iingen.unam.mx

Introducción

Las técnicas de biorremediación han surgido a nivel mundial como una alternativa atractiva para el saneamiento de suelos y acuíferos contaminados, por ser económicas, limpias, efectivas y seguras. Los problemas de contaminación con hidrocarburos que en la actualidad se han hecho evidentes en México, han promovido la llegada de una gran variedad de ofertas de biorremediación de todo tipo, sin embargo, se percibe un vacío en su manejo y en el conocimiento de sus bondades y limitaciones. En este artículo se plantea la situación actual de la biorremediación en México desde su perspectiva como un proceso biotecnológico de aplicación a gran escala.

Situación actual

Las modificaciones a la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, que se dieron a fines de 1996, incluyeron la figura de la responsabilidad ambiental. Con ello se hizo evidente la existencia de un gran número de sitios contaminados que fueron el resultado de muchos años de malas prácticas de operación y manejo de productos, particularmente los hidrocarburos. De esta forma, se abrió un importante mercado para la remediación de suelos contaminados, y en especial para la biorremediación.

Lo anterior, ha favorecido la creciente aparición de negocios, nacionales y extranjeros, interesados en colocar sus productos o servicios de biorremediación en México. Algunas firmas extranjeras lo han hecho de manera directa y otras a través de representantes en México con quienes han establecido alianzas estratégicas. Entre las firmas nacionales están empresas de servicios ambientales, de estudios en geofísica y mecánica de suelos o que simplemente cuentan con equipo de perforación. Lo más común y al mismo tiempo preocupante, es que estas empresas no cuentan con profesionales en microbiología o biotecnología, su actividad primordial para la biorremediación consiste en importar formulaciones extranjeras para venderlas en México como productos cuya descripción del contenido es mínima.

Algunas de las empresas venden el servicio completo, en el que van incluidos el movimiento del suelo, el suministro de productos y su aplicación. En estos casos, los contratistas siguen las instrucciones del fabricante para la aplicación de los productos en campo sin entender las bases de cada paso del procedimiento. Desafortunadamente, a esto le llaman "tecnología", sin entender la esencia de lo que es una verdadera tecnología.

Los tipos de productos que pueden encontrarse en el mercado de la biorremediación son muy variados, entre ellos están:

- concentrados bacterianos líquidos
- concentrados bacterianos en polvo con harina de salvado como soporte
- concentrados enzimáticos líquidos
- concentrados líquidos de nutrientes
- fertilizantes en polvo
- agentes tensoactivos líquidos
- mezclas de agentes tensoactivos y nutrientes

El uso de estos productos comúnmente va dirigido a aquellos suelos contaminados que han sido excavados para realizar el tratamiento fuera del sitio (off site) mediante una técnica de biolabranza, mejor conocida como land farming. La venta de estos productos es en forma de paquete y para su aplicación no se requiere información previa respecto al tipo de contaminantes, su concentración, tipo de suelo o humedad, por decir algunos de los parámetros más importantes. La receta es única y si no se utilizan los productos que vienen en el mismo paquete, no se asegura un funcionamiento exitoso. También recomiendan la adición de productos, principalmente de bacterias, por lo menos dos o tres veces por semana. La razón de esto último es que los microorganismos contenidos en las preparaciones no se adaptan a las condiciones del suelo contaminado o son desplazados por las comunidades nativas que ya están aclimatadas, lo que da como resultado que las bacterias exógenas mueran.

Ciertas empresas ofrecen servicios que además, llevan incluido el uso de equipo diseñado para funciones específicas. Ejemplos de éstos son los biorreactores mezclados con aereación y los aereadores para inyectar microburbujas de aire comprimido a la zona saturada, a través de pozos. Esta última opción tiene aplicación cuando la contaminación ha alcanzado el manto freático y el tratamiento necesariamente se debe realizar *in situ*. Muy pocos ejemplos como éste son los que se han puesto en marcha en México.

Con esta gran variedad de opciones, los costos en el mercado son también muy variados van del orden de 40 a 600 pesos M.N./m³ de suelo (considerar aproximadamente 4.5 a 70 USD/m³ suelo), pero sin que exista un parámetro de referencia en virtud de que cada problema es específico.

Por lo que respecta a los concentrados bacterianos en polvo, las instrucciones del fabricante indican que se deben someter a un "proceso de reactivación" algunas horas antes de su aplicación. Esta reactivación consiste en hidratar las bacterias en un determinado volumen de agua que incluso puede contener sales minerales como nutrientes, de los mismos que

vienen dentro del paquete de productos. Para esta actividad que hace sin un razonamiento lógico, utilizan cualquier cubeta y mezclan con una pala o incluso con la mano.

No ha sido fácil investigar la bondad de los productos, todos los proveedores consideran que son muy buenos y que su "tecnología" es la mejor. Lo más seguro es que con la adición de los nutrientes se active la flora nativa y sea ésta la que lleva a cabo la biodegradación de los contaminantes.

También conviene señalar que varios productos comerciales contienen bacterias transgénicas, es decir, que han sido manipuladas genéticamente (GEMs: Genetically Engineered Microorganisms) y que han sido utilizados en México en proyectos de biorremediación. Al respecto, es importante comentar que este aspecto se ha mantenido en discusión a nivel de los países más desarrollados y que aún no se ha aprobado su aplicación en campo, en virtud del riesgo ambiental y para la salud, que implica su manejo y dispersión en sitios abiertos.

Detalles adicionales relacionados con la práctica de la biorremediación en campo, son la adición de fertilizantes y de agentes tensoactivos. Los fertilizantes que vienen en polvo, se arrojan al suelo sin disolverlos previamente y sin asegurarse de su buena distribución. Mientras que los tensoactivos, conocidos también como surfactantes, se riegan al suelo o a cuerpos de agua, sin una dosificación y control que evite problemas ambientales secundarios como es la disolución y dispersión de los hidrocarburos en el agua.

También se han observado casos en los que el suelo contaminado se mezcla con suelo limpio como una forma de "dilución" para reducir la concentración de contaminantes, y con ello facilitar la biorremediación.

Otros ejemplos que reflejan los vacíos de conocimiento de la biorremediación, son la aplicación de reactivos químicos al suelo para la oxidación de los contaminantes, el simple movimiento del suelo para ventilar y transferir a la atmósfera contaminantes volátiles adsorbidos en el suelo, así como la adición de materiales celulósicos que sirven como absorbentes específicos de hidrocarburos. Estas actividades son llevadas a la práctica bajo el nombre de "biorremediación", sin que haya participación alguna de microorganismos.

La imagen que ha quedado en durante el desarrollo de proyectos en escala real, ejecutados por varias empresas nacionales y extranjeras deja mucho que decir. Más aún cuando se sabe la atención que requiere todo proceso biotecnológico, en el que los actores principales son entidades biológicas, microorganismos y enzimas, los cuales son susceptibles de ser afectados negativamente por condiciones microambientales extremas.

Pero no todo el panorama es negativo, también hay empresas muy responsables que conocen muy bien el área. Algunas se encargan de formular sus propios productos y dosificarlos, e incluso preparan sus propios inóculos. Este pequeño grupo de empresas sí saben cuando es conveniente aplicar un proceso de biorremediación, y que está en función del tipo de contaminante y de las características del sitio. Otras empresas aprovechan la diversidad

microbiana nativa con capacidad degradadora y solamente la estimulan con adición de fertilizantes. Mientras que otras más han descubierto un gran potencial de atenuación natural en ciertos sitios y únicamente le dan seguimiento.

Dada la diversidad de técnicas para la biorremediación y algunas malas prácticas que se han detectado, durante 1997 autoridades ambientales establecieron programas para la revisión curricular de cada una de las empresas de remediación con el apoyo de grupos de académicos, sin embargo, el trabajo fue muy largo y no se obtuvieron los beneficios esperados. En la actualidad la tendencia es poner en marcha los trabajos de biorremediación en campo con una vigilancia muy cercana desde su inicio y darle seguimiento hasta llegar a las concentraciones máximas permisibles. El problema es que debido a los mínimos conocimientos que se tienen en el campo de la biorremediación y en la forma adecuada para darle seguimiento, es muy probable que la información que se obtenga sea limitada, en el sentido de que no es bien conocida la forma de demostrar que se llevó a efecto una auténtica biorremediación.

Por parte del sector académico, durante los últimos dos años, han surgido en México muchos grupos de diversas universidades y centros de investigación que realizan estudios sobre biodegradación del petróleo, sus derivados y subproductos. El mayor número de investigaciones se realizan a nivel de laboratorio mediante modelos ideales bien controlados que, aunque se alejan de la realidad, son la única manera de responder a las muchas interrogantes. En otros casos, las investigaciones se realizan a escala real, donde se enfrentan los mayores retos para llevar los resultados del laboratorio a los sitios contaminados.

La biorremediación como proceso biotecnológico

Dado que la práctica de la biorremediación se realiza en campo, su ejecución debe ser vista como un problema ingenieril de escalamiento. Tomando como base lo anterior, se podría hacer énfasis sobre la forma deseable para desarrollar un proyecto de biorremediación, en tres etapas como lo muestra el cuadro anexo, caracterización del sitio, estudios de biotratabilidad y escalamiento al campo.

Por lo que respecta a la caracterización del sitio, incluye cuatro enfoques básicos: geohidrología, química de contaminantes, fisicoquímica y microbiología del suelo. Por lo general, en México la caracterización no se hace de manera exhaustiva, únicamente se cubren algunos aspectos geohidrológicos requeridos para estimar el volumen de suelo a tratar y con ello establecer el costo de saneamiento. Con esto, ya se tiene un problema de entrada porque no se conoce verdaderamente el sitio contaminado antes de iniciar la biorremediación. De la experiencia en campo se sabe que, mientras mayor énfasis se ponga en la caracterización del sitio, es más fácil entender el problema en campo y con ello gran parte de la remediación está resuelto.

Si la caracterización se hiciera completa, se entendería que el trabajo geohidrológico llevará a conocer el tamaño y forma de la mancha de contaminación, la cual habrá de convertirse en un biorreactor, que por naturaleza será heterogéneo. Además, el trabajo geohidrológico será útil para definir las diferentes alternativas de funcionamiento del biorreactor que conduzcan a reducir la heterogeneidad del sistema y la presencia de zonas muertas, a través de la colocación de pozos, que es la forma de estar en contacto directo con el subsuelo. Con esto, se podrá aumentar la transferencia de masa y con ello el biorreactor podrá ser dinámico.

A través de la caracterización química de los contaminantes se podrá conocer la amplia variedad de los hidrocarburos que servirán como substratos y otros compuestos que podrían inhibir la actividad metabólica. Mientras que la caracterización fisicoquímica del suelo permitirá conocer el microambiente donde los microorganismos llevarán a cabo su acción metabólica dirigida específicamente a la degradación de los contaminantes.

Por lo que respecta a la caracterización microbiológica, consiste en cuantificar la población total, la heterótrofa y la degradadora. Un aspecto novedoso de aplicación es la detección directa de genes catabólicos involucrados en vías metabólicas de hidrocarburos conocidos, por ejemplo, tolueno (*xylE*), naftaleno (*ndoB*) y dodecano (*alkB*). Una caracterización microbiológica se puede realizar en muestras de suelo para evaluar los microorganismos nativos o incluso en las preparaciones comerciales que van a ser aplicados.

Perspectivas

Tomando como base lo anterior, se puede establecer que la biorremediación en México debe ser llevada a la práctica con un mayor conocimiento de los factores involucrados y con una mayor responsabilidad para mantener su característica como un proceso biotecnológico verdaderamente limpio. Para ello se requiere de la integración de las diferentes disciplinas involucradas.

Lo ocurrido con los procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales sirven de ejemplo para mencionar que es cuestión de voluntad y de tiempo. Por ejemplo, las primeras plantas de tratamiento biológico de aguas residuales fueron construidas por ingenieros civiles con especialidad en ingeniería sanitaria, ellos manejaron estos procesos como una caja negra y sin conocer las virtudes y limitaciones de los microorganismos involucrados. Muchas de las plantas que se pusieron en marcha no tuvieron el éxito esperado, y fue a partir de la generación de conocimiento y de la participación de microbiólogos y biotecnólogos en el área, que el funcionamiento de las plantas mejoró considerablemente y ahora se conoce la forma para controlar las plantas de tratamiento. Una situación similar a ésta tendrá que darse para la biorremediación en los años futuros.

Trabajo por hacer hay mucho, todavía se puede decir que la biorremediación de suelos y acuíferos en México está empezando, lo que se requiere es voluntad para conformar grupos verdaderamente interdisciplinarios.

Conclusiones

En el marco del desarrollo sustentable, la biorremediación presenta importantes perspectivas para resolver muchos de los problemas de contaminación con hidrocarburos que aquejan a México. Lo que hace falta es una integración de los biotecnólogos con el resto de las disciplinas involucradas y una participación más decidida del sector académico con las empresas prestadoras de servicios ambientales, para hacer de la biorremediación una práctica ambientalmente responsable.

Para finalizar, conviene mencionar que este artículo no se preparó para dar estadísticas, porque el número de empresas que ofrecen productos o servicios de biorremediación es muy cambiante día con día. El interés de integrarlo ha surgido de la experiencia adquirida durante varios años dedicados a la evaluación del desempeño de empresas de servicios ambientales y a la ejecución de proyectos de biorremediación en campo, en los que el Instituto de Ingeniería ha participado con diferentes entidades de los sectores público y privado.

CARACTERIZACIÓN DEL SITIO

Geohidrológica
Química de Contaminantes
Fisicoquímica
Microbiológica



ESTUDIOS DE BIOTRATABILIDAD

Uso de contaminantes como sustrato
Consumo de oxígeno
Generación de CO₂
Consumo de nutrientes



ESCALAMIENTO AL CAMPO

Desarrollo de un proyecto de biorremediación

COSTOS DE RESTAURACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS Y SUS IMPLICACIONES EN LA NORMATIVIDAD

Susana Saval

Instituto de Ingeniería, UNAM

Apartado Postal 70472, México, D.F. 04510

ssb@pumas.iingen.unam.mx

Introducción

Durante el manejo y disposición de materiales o residuos peligrosos, el suelo constituye la principal matriz receptora. Cuando se trata de materiales sólidos, la afectación al suelo es superficial en tanto no ocurra una lixiviación por efecto de la lluvia o por una autodescomposición de éstos. Si en cambio los materiales o residuos peligrosos se encuentran en estado líquido, éstos pueden migrar hasta alcanzar cuerpos de agua superficiales, o incluso, penetrar al subsuelo y alcanzar depósitos de agua subterránea someros o profundos. Tomando como referencia la legislación ambiental vigente desde 1996, surge la obligación de reparar el daño causado a los recursos naturales afectados.

El concepto de restauración, que está definido en la Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) como el "*conjunto de actividades tendientes a la recuperación y reestablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales*" es tal vez la definición más ambiciosa con la cual se puede asegurar el equilibrio ecológico en su amplio sentido, pero su enfoque se ve limitado ante la actividad industrial, donde la cantidad de residuos o la concentración de contaminantes es en ocasiones muy alta o las condiciones del sitio son muy particulares. En estos casos, es cuando conviene hablar de otro concepto como saneamiento o remediación, términos técnicos cuyo enfoque está dirigido específicamente a la reducción en la concentración de contaminantes a niveles que no constituyan un riesgo para la salud o el ambiente en general.

Si los materiales o residuos peligrosos son sólidos, es probable que después de su recolección con equipo y personal especializado puedan ser llevados a un confinamiento autorizado. Sin embargo, cuando el suelo y subsuelo quedan afectados aún después de retirar los materiales o residuos, es necesario aplicar una remediación. Para ello, existen una gran cantidad de técnicas que difieren en su base de funcionamiento y por supuesto en su costo. Muchas de ellas han sido aplicadas exitosamente, mientras que otras han ocasionado mayores disturbios ambientales que los de la propia contaminación.

Caracterización de sitios contaminados

Como paso previo a la restauración es necesario realizar la caracterización del sitio contaminado, ésta reviste particular importancia, ya que está enfocada a conocer en detalle el problema de contaminación (Saval, 1998a). El mayor porcentaje de las actividades se realiza en el propio sitio, mientras que otra parte en el laboratorio. El trabajo en campo está dirigido fundamentalmente a evaluar la superficie y profundidad que abarca la mancha de contaminación en el suelo y si la afectación ha llegado a un cuerpo de agua superficial o subterráneo. Para ello se requiere de perforaciones, instalación de pozos, mediciones en campo y muestreos inalterados. El costo de las perforaciones está en función del tipo de material geológico, de la maquinaria requerida, de la profundidad que se pretende alcanzar y además de las actividades de muestreo que se hayan planeado para realizar en el momento de las perforaciones. Como referencia se puede mencionar que el costo de perforación por metro lineal varía entre \$ 1000 y \$ 3000 M.N. Respecto a la instalación de pozos, su costo dependerá del uso que se les va a dar y de los requerimientos solicitados para cada caso en particular, se cotiza por metro lineal hasta \$ 5000 M.N.

Por lo que respecta al muestreo, éste debe planearse cuidadosamente. Las muestras deben ser químicamente inalteradas y representativas de la contaminación y del volumen de suelo contaminado. Recientemente la Profepa ha establecido que se requiere de una muestra por cada 100m^3 de suelo, esto es, una superficie de 100m^2 a 1 m de profundidad (Profepa, 1999).

Las actividades en el laboratorio se enfocan principalmente a los análisis para conocer el tipo y concentración de contaminantes y con ello evaluar el riesgo que implica su presencia en el propio sitio. Aquí, es indispensable definir claramente los métodos analíticos a utilizar para que los resultados sean útiles y no haya necesidad de repetir el muestreo, más aún cuando se trata de muestras profundas. El costo por análisis varía entre \$ 500 y \$ 1500 M.N. según las especificaciones de cada uno.

Como parte de la caracterización, se requiere también de pruebas de tratabilidad a través de las cuales es posible demostrar que la concentración de los contaminantes puede ser reducida de manera efectiva. De las pruebas de tratabilidad surgen las necesidades que se deberán satisfacer cuando se trabaje en gran escala, así como una estimación del tiempo de ejecución y de los costos de la restauración. La caracterización y su costo son únicos para cada sitio, aunque el tipo de actividades que se realicen sea similar entre un caso y otro.

El resultado de una caracterización debe ser la propuesta de restauración del sitio, la cual es también única para cada sitio en particular. Puede constar de una o varias alternativas técnicas, o bien, una combinación de varias. La estrategia a seguir en la restauración es la decisión más importante, por lo que cualquier gasto que se escatime en la caracterización puede significar un dato necesario para la restauración, que no se obtuvo en el momento adecuado.

Técnicas de restauración de sitios contaminados

De acuerdo con su base de funcionamiento, las técnicas de restauración pueden ser físicas, químicas o biológicas. Todas las técnicas tienen sus ventajas y limitaciones, las cuales conviene conocer para decidir para qué casos aplica cada una de ellas (Saval, 1995). Existen técnicas que necesariamente se aplican en el sitio contaminado (*in situ*) por ejemplo, aquellos casos donde el suelo superficial no requiere ser excavado, cuando la contaminación está en el subsuelo y/o alcanza el nivel del agua subterránea, o bien, cuando se trata de cuerpos de agua superficiales. Otras técnicas se aplican fuera del sitio, por lo que se requiere excavar el suelo contaminado y transportarlo a otro sitio para ser sometido a remediación, aunque esta opción es muy utilizada no se recomienda por el riesgo que representa el manejo y movimiento de contaminantes. Un listado de técnicas de remediación para suelo y subsuelo se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Técnicas de remediación más utilizadas en México

Remediación de suelo superficial <i>in situ</i>	Remediación de suelo fuera del sitio	Remediación de suelo profundo y agua subterránea <i>in situ</i>
biorremediación	confinamiento	aislamiento y contención
labranza (landfarming)	incineración	atenuación natural
atenuación natural	biorremediación	lavado (flushing)
oxidación química	oxidación química	bombeo y tratamiento
extracción de vapores	lavado	adsorción en carbón activado
solidificación y estabilización	estabilización en relleno	biorremediación

Seguimiento de la restauración

Existen varios aspectos que deben ser tomados en consideración para dar seguimiento a la restauración de un sitio, entre los más importantes se pueden citar:

1. la estrategia de muestreo, que incluye la periodicidad, el número y la localización de las diferentes muestras a obtener, que generalmente son de suelo y agua subterránea;
2. la definición de los métodos analíticos a utilizar;
3. la elección del laboratorio que realizará los análisis; y
4. la obtención de muestras no contaminadas en los alrededores para verificar los valores de fondo que serán muy útiles en casos específicos, por ejemplo cuando se trata de metales pesados.

Las actividades de muestreo y análisis son de fundamental importancia, ya que con ello se evalúa el avance de la remediación, se estima el tiempo necesario para alcanzar los límites de limpieza y se toman las decisiones para el cierre administrativo de cada caso de restauración de sitios contaminados.

Costos de restauración de sitios contaminados

Existen varios factores que determinan el costo de una restauración, entre ellos están:

- la presencia de materiales y residuos almacenados en recipientes
- la existencia de un tiradero industrial
- el tipo y concentración de contaminantes
- la profundidad de la contaminación en el suelo
- la existencia de contaminación en el agua subterránea
- la estrategia de remediación que se pretende aplicar a suelo y subsuelo
- los límites de limpieza que se deben alcanzar
- las condiciones que debe tener el sitio después de la restauración
- el tiempo en el que se pretende realizar la restauración

El costo de una restauración puede desglosarse en los diferentes conceptos que la constituyen, los cuales se enlistan en la Tabla 2. El porcentaje que cada concepto representa del total, será diferente para cada estrategia de restauración, aquellas en las que se requiere equipo, éste concepto ocupará el mayor porcentaje, especialmente en lo referido a operación y mantenimiento.

Tabla 2. Desglose de los costos de restauración

√ equipo
• inversión
• instalación
• operación y mantenimiento
√ proceso
• mano de obra y supervisión
• materiales consumibles
√ trabajo de laboratorio
• análisis de seguimiento
√ trabajo de gabinete
• planeación e integración del proyecto
• análisis e interpretación de resultados
√ costos indirectos

Encontrar en la literatura costos de restauración ha sido el principal anhelo de aquellos interesados en el tema, pero dado que cada estrategia responde a las características de cada caso en particular, conviene tomar cualquier información con cierta reserva. Algunas experiencias que se refieren a suelos contaminados con hidrocarburos se presentan en la Tabla 3, aquí resaltan los costos más bajos para las técnicas de biorremediación y aún en este caso, las cifras tienen un importante intervalo de variación. Esta variación se debe a las necesidades de movimiento del suelo cuando el tratamiento es en superficie o a la instalación de pozos si el tratamiento es *in situ*, actividades con las que se busca la oxigenación y homogeneidad del sistema, aspectos que son la base del éxito de una biorremediación (Saval, 1998b).

Tabla 3. Costos de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

Técnica de remediación	\$ M.N. / m ³ suelo
Oxidación química	200 - 700
Biorremediación	50 - 600
Confinamiento	500 - 800
Lavado	600 - 900
Incineración	1 000 - 1 200
Estabilización en relleno	400 - 700

Toda remediación tiene un comportamiento similar al que se representa en la Fig. 1. La concentración de contaminantes baja notablemente al inicio, después la disminución ocurre de manera más lenta hasta que los cambios son mínimos. Mientras tanto, el costo acumulado va siempre en aumento. El momento en que la restauración resulta incosteable debe ser previsto con anticipación, más aún cuando la concentración de contaminantes está lejos de los límites de limpieza establecidos. Si esto llegara a ocurrir, la única solución es buscar otra estrategia de remediación, para lo cual los resultados de las pruebas de tratabilidad serán de gran utilidad.

De lo anterior se concluye que el aspecto más importante durante la restauración de un sitio, es conocer la concentración mínima de contaminantes que se alcanza con la técnica de remediación elegida, la cual debe ser congruente con los límites de limpieza establecidos para un sitio en particular.

Límites de limpieza: normatividad y disposiciones vigentes

En ausencia de normatividad propia que establezca niveles de limpieza a alcanzar durante la restauración de sitios contaminados, se han venido adoptando normatividades extranjeras. La más común es la que se aplica para suelos y agua subterránea en los Estados Unidos de Norteamérica, la cual establece límites permisibles que son particulares para cada uno de los Estados. En un análisis detallado de dicha

información, se encontró un amplio intervalo que varía incluso en varios órdenes de magnitud, ejemplo de ello es el benceno, cuyo límite máximo permisible está entre 0.005 y 50 mg/kg (Saval, 1999a). Con lo anterior se puede establecer que un límite de limpieza puede ser tan riguroso que difícilmente podrá alcanzarse en una restauración, o bien, puede ser tan alto que aún después de la restauración representa un riesgo para la salud y para el ambiente en general.

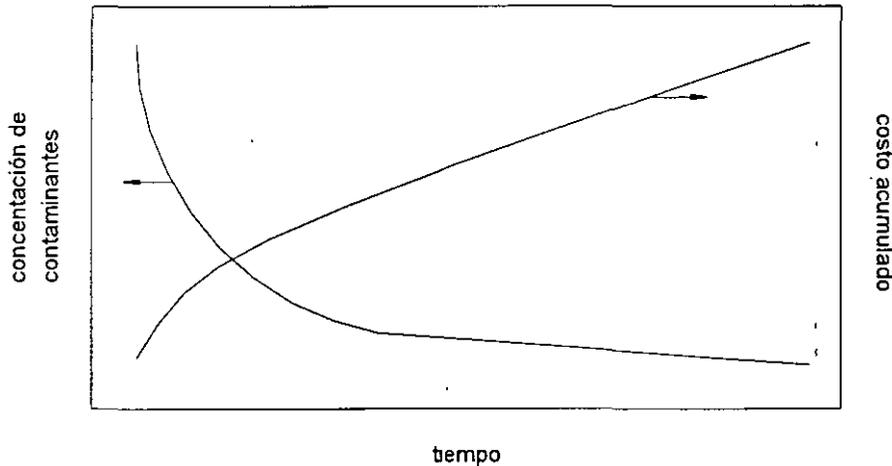


Fig 1. Comportamiento de la remediación de un suelo contaminado

La experiencia documentada en la materia ha creado ciertas tendencias de realizar estudios de evaluación de riesgo toxicológico y ecológico para cada sitio, pero tampoco existe una normatividad propia que establezca un procedimiento uniforme para realizar dichos estudios. Además, la aplicación de los diversos enfoques reportados pueden dar como resultado un intervalo muy amplio en las concentraciones permisibles, dado que se realizan con base en supuestos y valores teóricos que son tomados de la literatura o de experiencias previas, situación que es igualmente preocupante porque no constituyen una base verdaderamente firme para establecer límites de limpieza.

Tomando como base que el mayor número de emergencias ambientales con afectación a suelo son las ocasionadas por derrames de hidrocarburos, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente estableció en 1998 los Criterios Interinos de Limpieza para Suelos Contaminados con Hidrocarburos, los cuales se presentan en la Tabla 4 (Profepa, 1998a; Cancino y col., 1998). Para el establecimiento de estos Criterios se tomaron en consideración tres aspectos principales:

1. la adopción de indicadores de riesgo a la salud, como son el benceno y otros hidrocarburos poliaromáticos considerados cancerígenos;
2. la distinción entre suelos según su uso, para que en zonas industriales se permitan límites de concentración más altos que en zonas urbanas, comerciales o agrícolas;

3. las experiencias previas de restauración en México, donde se han aplicado técnicas amables al ambiente y se hayan alcanzado los límites de limpieza fijados previamente.

Tabla 4 Criterios interinos de limpieza para suelos contaminados con hidrocarburos

	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Uso de suelo	agricultura forestal recreativo de conservación	residencial comercial	industrial
Contaminante. (concentraciones en mg/kg, ppm, base seca)			
Gasolina			
HTPs	200	200	500
Benceno*	20	20	50
Tolueno	40	40	100
Xilenos	40	40	100
Diesel			
HTPs	1,000	1,000	2,000
benzopireno*	0.08	0.08	0.80
benzo(a)antraceno*	0.80	0.08	8.0
benzo(b)fluoranteno*	0.80	0.80	8.0
benzo(k)fluoranteno*	8.00	8.00	80.0
criseno*	80.0	80.0	800.0
Residuos aceitosos			
HTPs	1,000	1,000	2,000
benzopireno*	0.08	0.08	0.75
benzo(a)antraceno*	0.80	0.80	7.5
benzo(b)fluoranteno*	0.80	0.80	7.5
benzo(k)fluoranteno*	8.00	8.00	75.0
criseno*	80.0	80.0	750.0

*compuestos cancerígenos

Fuente: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 1998a, Cancino y col., 1998

Para la aplicación de los Criterios Interinos de Limpieza en casos de restauración, se deben cumplir dos condiciones: el límite de concentración del producto y el límite de concentración de las sustancias que constituyen un riesgo a la salud.

Como complemento a los Criterios Interinos de Limpieza para Suelos Contaminados con Hidrocarburos, la Profepa estableció en el primer semestre de 1999, las técnicas analíticas recomendadas durante la caracterización de sitios contaminados y el seguimiento de restauraciones (Tabla 4). La base de estas

decisiones radica en la aplicación de métodos específicos para cada tipo de contaminante y en especial para aquellos que son nocivos a la salud (Profepa, 1999).

Tabla 4. Métodos de análisis recomendados para suelos contaminados con hidrocarburos

Contaminante	Método analítico base
Hidrocarburos base diesel	Extracción de la muestra de suelo con cloruro de metileno Cromatografía de gases - Ionización de flama (EPA 8015 B)
Hidrocarburos base gasolina	Extracción de la muestra de suelo con cloruro de metileno Cromatografía de gases - Ionización de flama (EPA 8015 B)
Hidrocarburos recuperables de petróleo (petróleo, aceites y residuos aceitosos)	Extracción de la muestra de suelo con cloruro de metileno Espectrometría en infrarrojo (EPA 418.1)
Benzopireno	Extracción de la muestra de suelo con cloruro de metileno Cromatografía - Espectrometría de masas (EPA 8310 / 8100 / 8270 C)
Benceno	Extracción de la muestra de suelo con cloruro de metileno Cromatografía de gases - Espectrometría de masas (EPA 8240 / 8260 C)

Fuente: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 1999

Por otra parte, la falta de una normatividad en el área de restauración de sitios contaminados, también provocó la aplicación de la NOM-053-ECOL/93 para el análisis de todo tipo de material o residuo de características desconocidas a través de pruebas de Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad e Inflamabilidad (CRETI). La experiencia acumulada durante varios años ha demostrado que este procedimiento está lejos de arrojar resultados verdaderamente confiables para "basuras industriales" y no es el adecuado para análisis de suelos contaminados. La recomendación que surge es una revisión detallada de las NOM-052-ECOL/93 y NOM-053-ECOL/93, para hacer las adecuaciones necesarias.

Entre otras disposiciones oficiales, existe un Manual Técnico para la Atención de Emergencias Ambientales desarrollado por la Profepa, el cual contiene guías para la evaluación de daños ambientales y para la determinación de acciones correctivas, donde se hace énfasis en el procedimiento a seguir durante la caracterización y la restauración de sitios contaminados (Profepa, 1998b).

Una propuesta para una normatividad ad hoc

El proceso de creación de normas ambientales en México se ha dado, por lo general, tomando como referencia regulaciones de otros países y sin tomar en consideración la situación específica de México y la

experiencia práctica acumulada a través de la participación de los verdaderos expertos en cada área. Esto ha generado normas que no pueden ser aplicadas tal como fueron dictadas, porque están lejos de la realidad. Como ejemplo se puede citar la NOM-087-ECOL/95, la cual se elaboró con la finalidad de controlar la disposición final a los residuos biológico-infecciosos, pero que no tomó en cuenta las dificultades económicas, en este caso, del sector salud.

Se ha detectado una marcada influencia de técnicas extranjeras que no son aplicables a la situación específica de México, y que se han filtrado a través de intereses económicos de un importante número de empresas que en su mayoría tienen poco dominio del tema. No todas las técnicas han mostrado ser la mejor solución para la restauración de un sitio determinado y en muchos casos se han alcanzado los límites de limpieza a través de actividades que no están sustentadas en principios científicos (Saval, 1999b).

Aunque se ha establecido que el costo de restauración de un sitio es función de varios factores, se puede decir que en general es del orden de millones de pesos. Muchas industrias contaminadoras han gastado varios millones de pesos para remediar suelos contaminados con el compromiso de alcanzar los límites de limpieza que se fijaron, pero sin conocer la base de funcionamiento de la técnica aplicada y sin saber si será una solución permanente. Al paso del tiempo, el problema de contaminación está presente de nuevo y en muchos casos, su magnitud es mayor que cuando se atacó por primera vez, pero dado que se cumplieron los objetivos en su momento, no hay nada que hacer al respecto, excepto iniciar una nueva restauración. En muchos casos, este es un comportamiento cíclico que ocurre con más frecuencia cuando los límites de limpieza son muy estrictos o los tiempos de ejecución son muy cortos.

El tema de la restauración de sitios contaminados en México es todavía nuevo, a pesar de los muchos trabajos que se han realizado especialmente en zonas afectadas por derrames de petróleo o sus derivados, pero aún hace falta adquirir más experiencia dada la gran diversidad de casos.

Tomando en cuenta lo anterior, no parece ser conveniente crear ahora instrumentos normativos definitivos que después tengan que adecuarse, sin embargo, ante la urgencia de establecer reglas claras y la falta de tiempo para tomar decisiones acertadas, surge como propuesta la posibilidad de crear Criterios y Procedimientos Técnicos y Administrativos que puedan aplicarse en la práctica con un seguimiento muy cercano durante un periodo de tiempo bien definido al momento de su publicación. De esta forma se podría acumular experiencia que serviría como base para elaborar documentos que en el mediano plazo se conviertan en Normas Oficiales Mexicanas. En el caso específico de la restauración de sitios contaminados con hidrocarburos, la experiencia que se ha venido generando con la aplicación de los Criterios Interinos de Limpieza constituyen una base idónea para el establecimiento de la normatividad correspondiente. De la misma manera convendría proceder para el caso de suelos contaminados con bifenilos policlorados, con metales pesados y con otros contaminantes comunes en México.

Bibliografía

- Cancino M.A., Rodriguera J.D. y Muñoz J.M., 1998. Restauración de sitios contaminados, el papel de la autoridad. *Teorema*, Año 5, Número 18 (septiembre-noviembre), pp 73-75.
- Profepa, 1998a. Memorias del Grupo de Trabajo sobre Restauración de Sitios Contaminados. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Subprocuraduría de Auditoría Ambiental. Dirección de Emergencias Ambientales.
- Profepa, 1998b. Manual técnico para la aplicación de medidas para la atención de emergencias ambientales. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Subprocuraduría de Auditoría Ambiental. Dirección de Emergencias Ambientales.
- Profepa, 1999. Memorias del Grupo de Trabajo sobre Restauración de Sitios Contaminados. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Subprocuraduría de Auditoría Ambiental. Dirección de Emergencias Ambientales. En redacción.
- Saval S., 1995. Remediación y Restauración. En *Pemex: Ambiente y Energía, Los Retos del Futuro*, UNAM-Petróleos Mexicanos, México.
- Saval S., 1998a. La reparación del daño. Aspectos técnicos: Remediación y Restauración. La responsabilidad jurídica en el daño ambiental. UNAM-Petróleos Mexicanos, México, pp 209-235.
- Saval S., 1998b. Situación actual y perspectivas de la biorremediación de suelos y acuíferos en México, *BioTecnología*, Revista de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, A.C. Vol. 3: 71-76.
- Saval S., 1999a. En busca de criterios de limpieza para sitios contaminados con hidrocarburos. *Teorema*, Año 5, Número 19 (diciembre 1998-febrero 1999), pp 14-16.
- Saval S., 1999b. Éxitos y fracasos de la remediación de suelos en sitios contaminados con hidrocarburos. Reunión Anual del Programa Universitario del Medio Ambiente 1998: Conservación y restauración de suelos. Coordinación de Vinculación, Programa Universitario del Medio Ambiente, UNAM, en prensa.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

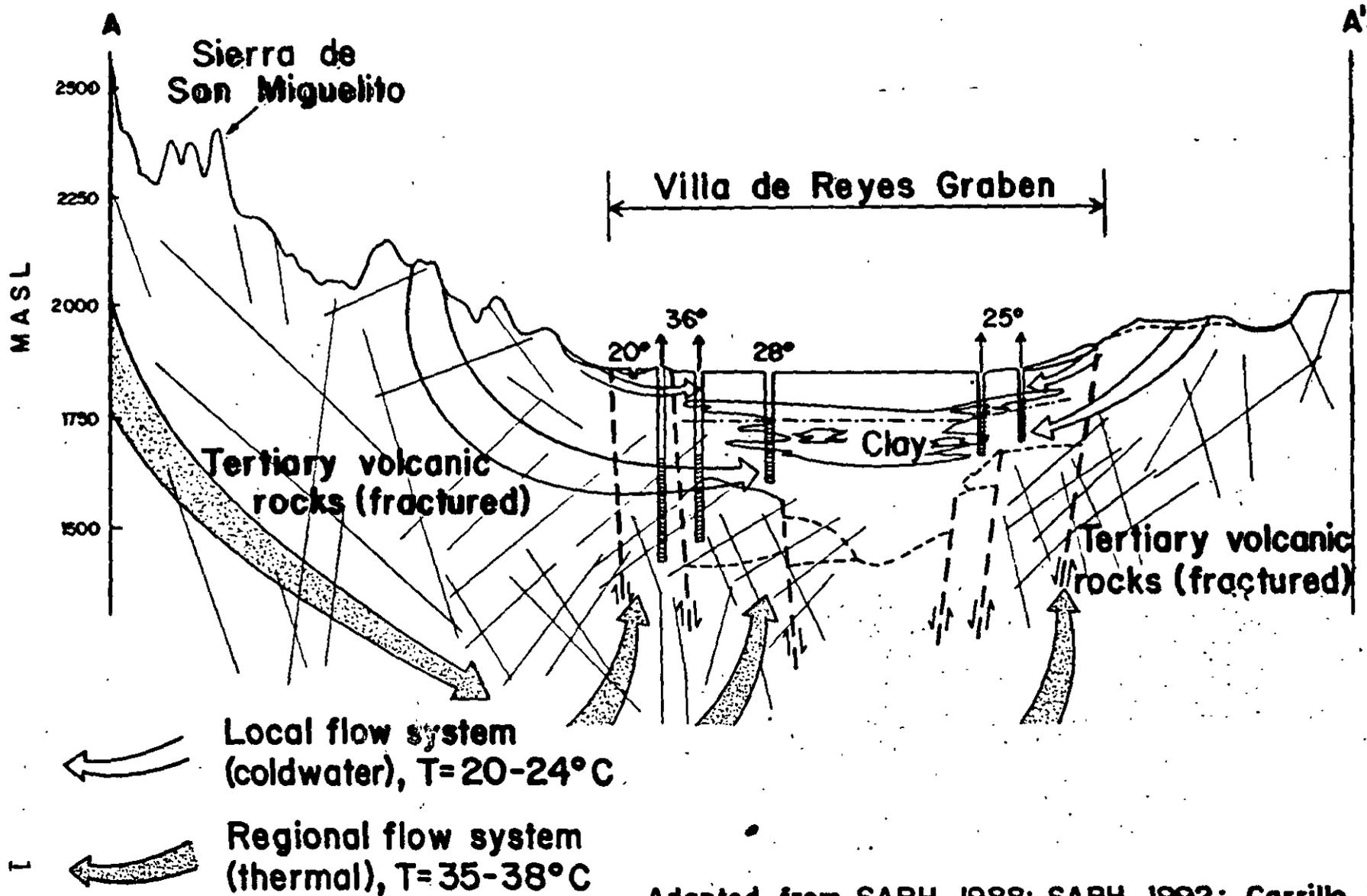
TEMA :

RADÓN

**FIS. ALEJANDRA CORTÉS SILVA
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE - OCTUBRE 1999**

SAN LUIS POTOSI VALLEY

CONCEPTUAL MODEL OF THE GROUNDWATER FLOW SYSTEM IN SAN LUIS POTOSI, MEXICO



Adapted from SARH, 1988; SARH, 1992; Carrillo, 1999

RADON-222 IN GROUNDWATER IN TWO VOLCANIC ZONES OF CENTRAL MEXICO

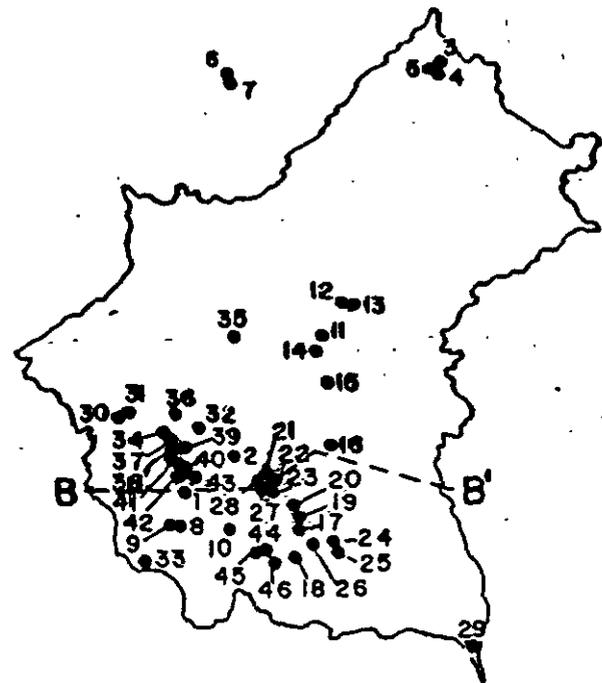
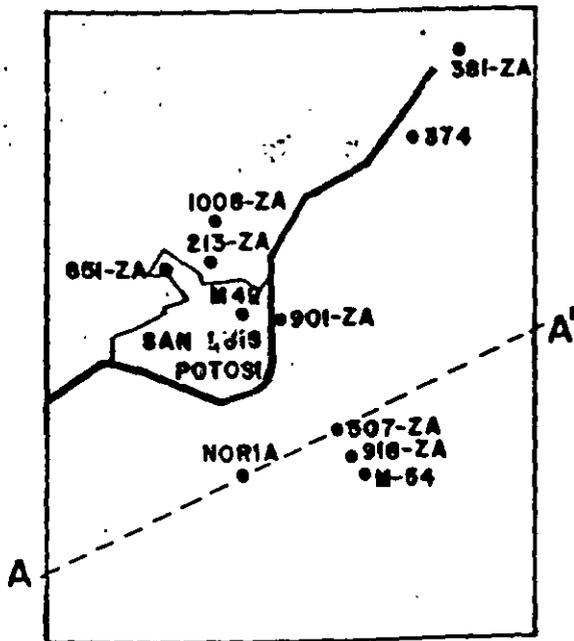
CORTES, Alejandra, ESPINOSA, Guillermo, CARDONA, Antonio, Instituto de Geofísica, UNAM, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, Mexico, D.F.;

FARVOLDEN, Robert, National Ground Water Association, 6375 Riverside Drive, Dublin, Ohio 43017.

Radon-222 values measured in the groundwater of the basin of Mexico and the valley of San Luis Potosi are presented. The study areas are physiographically independent, of volcanic origin and geologically different. Samples are from deep production wells and springs belonging to municipal water supply networks. Concentrations were measured in the field by two methods; i) a scintillator coupled to a photomultiplier tube; and, ii) a passive method using Solid State Nuclear Track Detectors with comparable results. The relatively low concentration of Radon-222 in the basin of Mexico is believed to be related to the composition of the basic rocks. Of the 45 samples analysed (300 Bq/m^3 average value), only 15% have values higher than 1000 Bq/m^3 . These anomalies correlate with the zone of contact between the volcanic units (basalts, tuffs and ash) and the lacustrine clay deposited in the ancient lakes of the valley. In San Luis Potosi 18 samples had an average concentration of 4000 Bq/m^3 . These relatively high concentrations are related to the felsic composition of the volcanic rocks in the area. The results agree with interpretations of groundwater flow systems obtained in a concurrent geohydrological study of this region.

LOCALIZATION MAP

PHYSIOGRAPHIC PROVINCES
MEXICAN VOLCANIC BELT
CENTRAL MESETA



The Geology of Radon



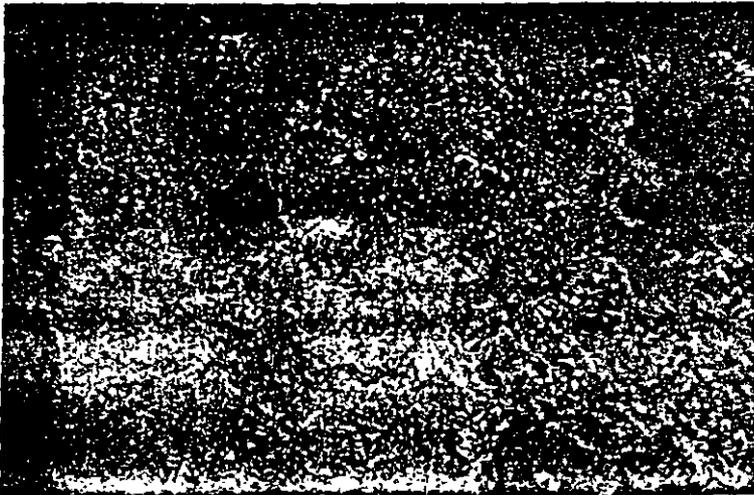
Studies of the geology of radon include research into how uranium and radon sources are distributed in rocks and soils, how radon forms in rocks and soils, and how radon moves. Studying how radon enters buildings from the soil and through the water system is also an important part of the geology of radon.

Uranium: The source

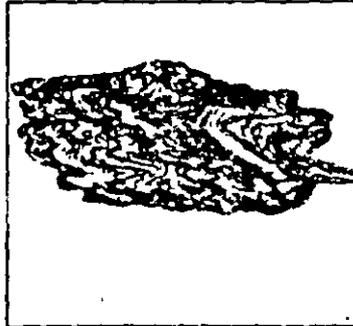
To understand the geology of radon—where it forms, how it forms, how it moves—we have to start with its ultimate source, uranium. All rocks contain some uranium, although most contain just a small amount—between 1 and 3 parts per million (ppm) of uranium. In other words, a million pounds (500 tons) of rocks generally will have 1 to 3 pounds of uranium scattered through it.

Rocks break down mechanically and chemically to form soils at the Earth's surface. It is not surprising, therefore, that most soils also contain small amounts (1 to 3 ppm) of uranium. In general, the uranium content of a soil will be about the same as the uranium content of the rock from which the soil was derived.

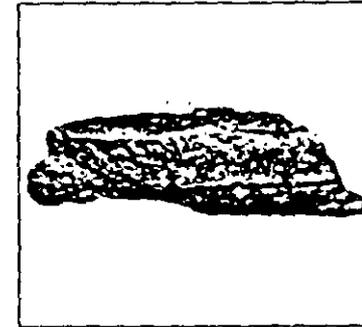
The bright yellow mineral tyuyamunite is one of the most common uranium ore minerals. This specimen, which is less than 3 inches across, came from the Ridenour mine, Arizona, near the Grand Canyon (photograph by Karen Wenrich).



Igneous



Metamorphic



Sedimentary

The three major rock types.

Some types of rocks have higher than average uranium contents. These include light-colored volcanic rocks, granites, dark shales, sedimentary rocks that contain phosphate, and metamorphic rocks derived from these rocks. These rocks and their soils may contain as much as 100 ppm uranium. Layers of these rocks underlie various parts of the United States.

The higher the uranium level is in an area, the greater the chances are that houses in the area have high levels of indoor radon. But some houses in areas with lots of uranium in the soil have low levels of indoor radon, and other houses on uranium-poor soils have high levels of indoor radon. Clearly, the amount of radon in a house is affected by factors in addition to the presence of uranium in the underlying soil.

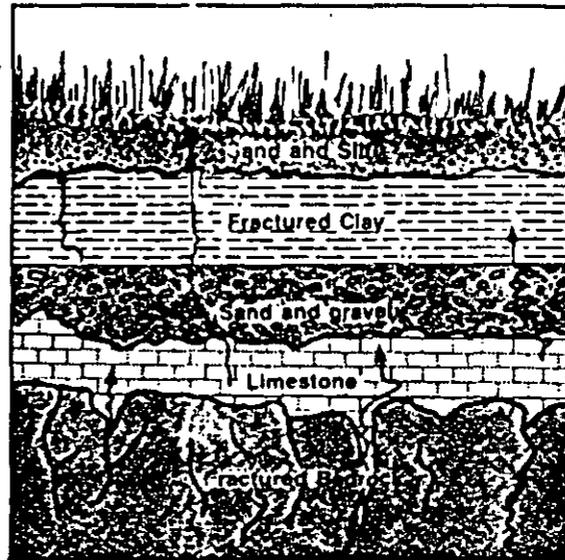
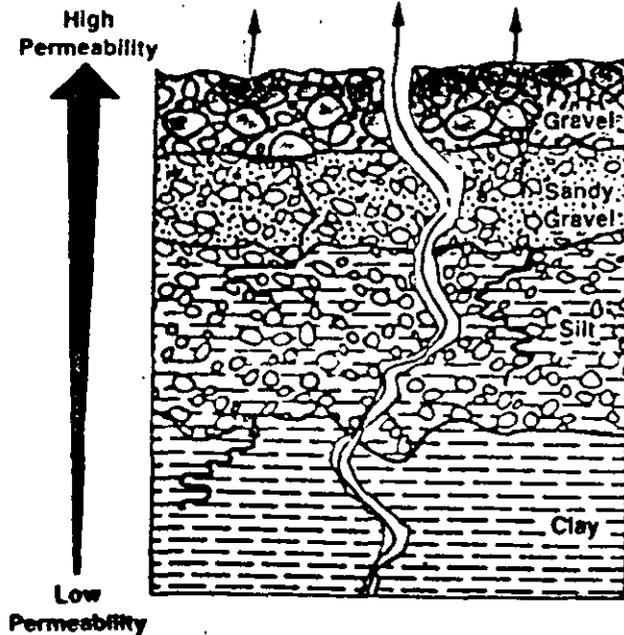
Radon movement

Because radon is a gas, it has much greater mobility than uranium and radium, which are fixed in the solid matter in rocks and soils. Radon can more easily leave the rocks and soils, by escaping into fractures and openings in rocks and into the pore spaces between grains of soil.

The ease and efficiency with which radon moves in the pore space or fracture affects how much radon enters a house. If radon is able to move easily in the pore space, then it can travel a great distance before it decays, and it is more likely to collect in high concentrations inside a building.

The method and speed of radon's movement through soils is controlled by the amount of water present in the pore space (the soil moisture content), the percentage of pore space in the soil (the porosity) and the "interconnectedness" of the pore spaces that determines the soil's ability to transmit water and air (the permeability).

Radon can move through cracks in rocks and through pore spaces in soils.



Radon moves more readily through permeable soils, such as coarse sand and gravel, than through impermeable soils, such as clays. Fractures in any soil or rock allow radon to move more quickly.

Some radon atoms remain trapped in the soil and decay to form lead, other atoms escape quickly into the air.

Radon in water moves slower than radon in air. The distance that radon moves before most of it decays is less than 1 inch in water-saturated rocks or soils, but it is as much as 6 feet through dry rocks or soils. Because water also tends to flow much more slowly through soil pores and rock fractures than does air, radon travels shorter distances in wet soils than in dry soils before it decays.

For these reasons, homes in areas with drier, highly permeable soils and bedrock, such as hill slopes, mouths and bottoms of canyons, coarse glacial deposits, and fractured or cavernous bedrock, may have high levels of indoor radon. Even if the radon content of the air in the soil or fracture is in the normal range (200-2,000 pCi/L), the permeability of these areas permits radon bearing air to move greater distances before it decays and thus contributes to high indoor radon.

Radon entry into buildings

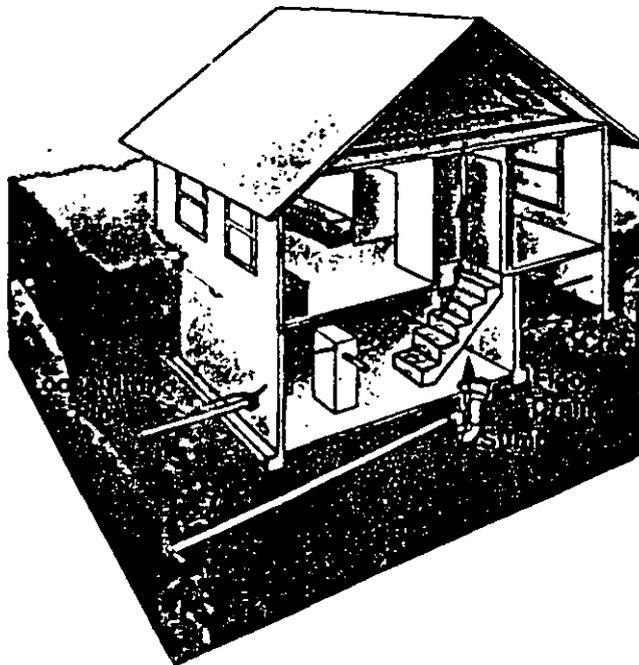
Radon moving through soil pore spaces and rock fractures near the surface of the earth usually escapes into the atmosphere. Where a house is present, however, soil air often flows toward its foundation for three reasons: differences in air pressure between the soil and the house, the presence of openings in the house's foundation, and increases in permeability around the basement (if one is present).

In constructing a house with a basement, a hole is dug, footings are set, and coarse gravel is usually laid down as a base for the basement slab. Then, once the basement walls have been built, the gap between the basement walls and the ground outside is filled with material that often is more permeable than the original ground. This filled gap is called a disturbed zone.

Radon moves into the disturbed zone and the gravel bed underneath from the surrounding soil. The backfill material in the disturbed zone is commonly rocks and soil from the foundation site, which also generate and release radon. The amount of radon in the disturbed zone and gravel bed depends on the amount of uranium present in the rock at the site, the type and permeability of soil surrounding the disturbed zone and underneath the gravel bed, and the soil's moisture content.

The air pressure in the ground around most houses is often greater than the air pressure inside the house. Thus, air tends to move from the disturbed zone and gravel bed into the house through openings in the house's foundation. All house foundations have openings such as cracks, utility entries, seams between foundation walls and slabs, sumps, permeable foundation materials, and uncovered soil in crawl spaces and basements.

Most houses draw less than one percent of their indoor air from the soil; the remainder comes from outdoor air, which is generally quite low in radon. Houses with low indoor air pressures, poorly sealed foundations, and several entry points for soil air, however, may draw as much as 20 percent of their indoor air from the soil. Even if the soil air has only moderate levels of radon, levels inside the house may be very high.



Radon can enter a house through many paths

REACTORES NUCLEARES

UN REACTOR NUCLEAR CONSTA DE TRES ELEMENTOS PRINCIPALES:

EL COMBUSTIBLE, EL MODERADOR Y EL FLUIDO REFRIGERANTE

EL COMBUSTIBLE NUCLEAR SE OBTIENE A PARTIR DE LA FISIÓN DEL URANIO. EL URANIO SE UTILIZA EN SU FORMA NATURAL CONTENIENDO UN 0.7% DE URANIO-235 O BIEN EN FORMA DE URANIO ENRIQUECIDO, AL QUE ARTIFICIALMENTE SE ELEVA LA CONCENTRACIÓN HASTA UN 3 Ó 4%. EL URANIO NATURAL SE COLOCA EN LOS REACTORES EN FORMA DE URANIO METÁLICO O DE ÓXIDO DE URANIO, DISPUESTO EN BARRAS COMPACTAS O TUBOS CORTOS DE VARIOS CENTÍMETROS DE DIÁMETRO Y LONGITUD.

EL MODERADOR ES EL QUE HACE POSIBLE LA REACCIÓN NUCLEAR. PARA QUE EL CHOQUE DE UN NEUTRON PUEDA PRODUCIR UNA FISIÓN ES PRECISO QUE LA VELOCIDAD DEL NEUTRON SEÁ DEL ORDEN DE 2 KM/SEG. CUANDO EL NEUTRON SALE DEL NÚCLEO FISIONADO LLEVA UNA VELOCIDAD DE 20,000 KM/SEG. LA FUNCIÓN DEL MODERADOR ES FRENAR NEUTRONES SIN ABSORVERLOS, EL MATERIAL DE LOS MODERADORES ES GENERALMENTE GRAFITO, AGUA PESADA Y ALGUNOS LÍQUIDOS ORGÁNICOS.

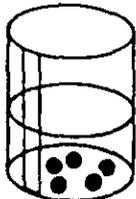
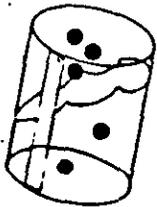
EL FLUIDO REFRIGERANTE TIENE COMO FUNCIÓN EVACUAR EL CALOR PRODUCIDO POR EL COMBUSTIBLE PARA PRODUCIR VAPOR.

Radon in water

Radon can also enter homes through their water systems. Water in rivers and reservoirs usually contains very little radon, because it escapes into the air, so homes that rely on surface water usually do not have a radon problem from their water. In big cities, water processing in large municipal systems aerates the water, which allows radon to escape, and also delays the use of water until most of the remaining radon has decayed.

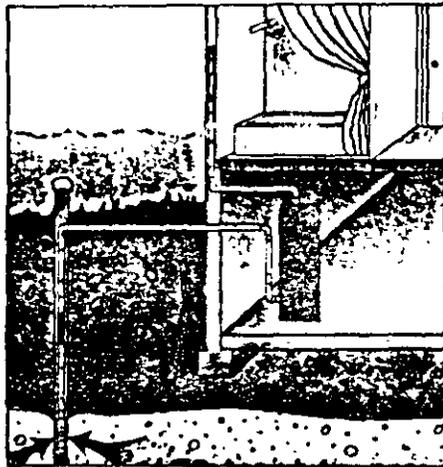
In many areas of the country, however, ground water is used as the main water supply for homes and communities. These small public water works and private domestic wells often have closed systems and short transit times that do not remove radon from the water or permit it to decay. This radon escapes from the water to the indoor air as people take showers, wash clothes or dishes, or otherwise use water. In general, house water with 10,000 pCi/L of radon contributes about 1 pCi/L to the level of radon in the indoor air.

The areas most likely to have problems with radon in ground water are areas that have high levels of uranium in the underlying rocks. For example, granites in various parts of the United States have resulted in high levels of radon in ground water that is supplied to private water supplies.



Radon escapes from water when it is agitated

In areas where the main water supply is from private wells and small public water works, radon in ground water can add 1 pCi/L to the indoor air radon level.



Radon Potential

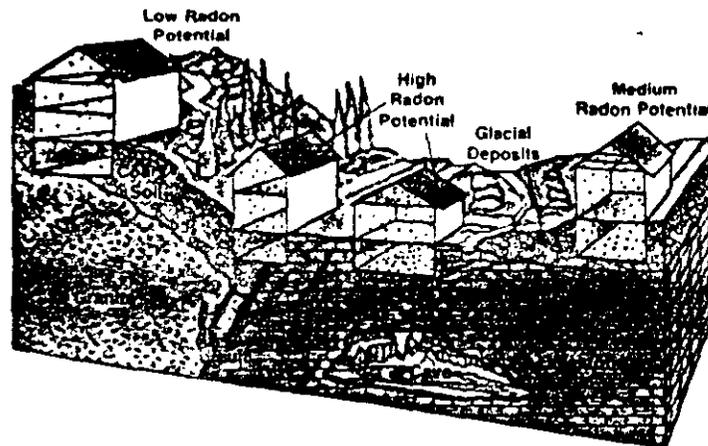


You can get an idea as to how concerned you should be about radon in your house by learning about the geology of the site and its radon potential. If your house is in an area with a high potential for radon, then chances are that your house has an indoor radon problem. However, as we have discussed, the way a house is built can increase the risk—so even in areas of low radon potential, some houses can have unhealthy radon levels.

Scientists evaluate the radon potential of an area and create a radon potential map by using a variety of data. These data include the uranium or radium content of the soils and underlying rocks and the permeability and moisture content of the soils. Usually maps of these factors are not available, and other indirect sources of information about these factors, such as geologic maps, maps of surface radioactivity, and soil maps, are used.

Another type of information that scientists use in determining the radon potential of an area is radon measurements of local soil air. Existing indoor radon data for homes also are useful. These data are the most direct information available about indoor radon potential, even though the houses that have been sampled may not be typical for the area and exact location information for measured houses is seldom available.

Knowing the types of rock and soil at a site helps a geologist determine its radon potential.

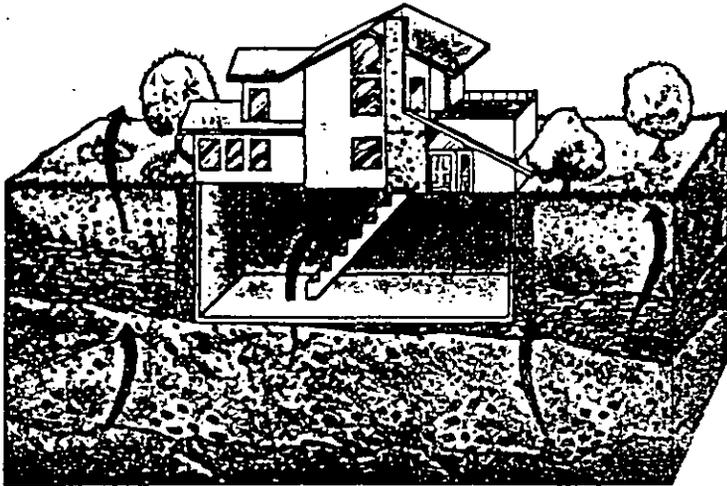


Preface



High levels of indoor radon are found in every State. We know from medical and environmental studies that radon can be a health risk, primarily as a cause of lung cancer. Radon comes from the soil, rock, and water around us. Because levels of radon vary from place to place, and because houses differ in their vulnerability to radon, it is important that all houses be measured for radon. This booklet presents important geological information about radon; how it forms, the kinds of rocks and soils it comes from, and how it moves through the ground or is carried by water into buildings. Also this booklet explains the way geologists estimate the radon potential of an area, be it a State, a county, or your neighborhood. Finally it tells where you can get more information about radon.

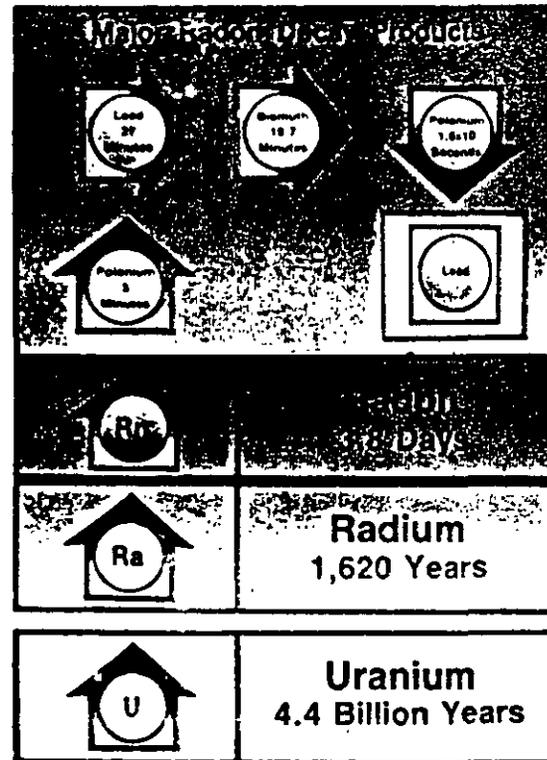
Radon gas, a radioactive product of uranium, can reach high levels in some houses, depending on the local geology and house construction.



What Is Radon?



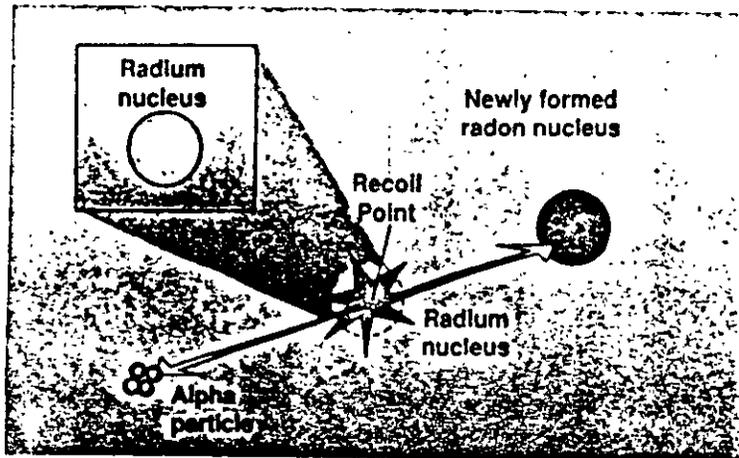
Radon is a gas produced by the radioactive decay of the element radium. Radioactive decay is a natural, spontaneous process in which an atom of one element decays or breaks down to form another element by losing atomic particles (protons, neutrons, or electrons). When solid radium decays to form radon gas, it loses two protons and two neutrons. These two protons and two neutrons are called an alpha particle, which is a type of radiation. The elements that produce radiation are called radioactive. Radon itself is radioactive because it also decays, losing an alpha particle and forming the element polonium.



Radon formation

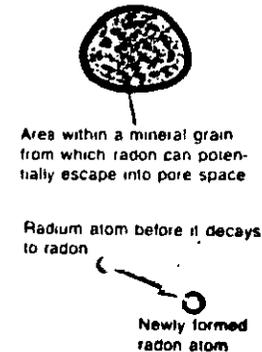
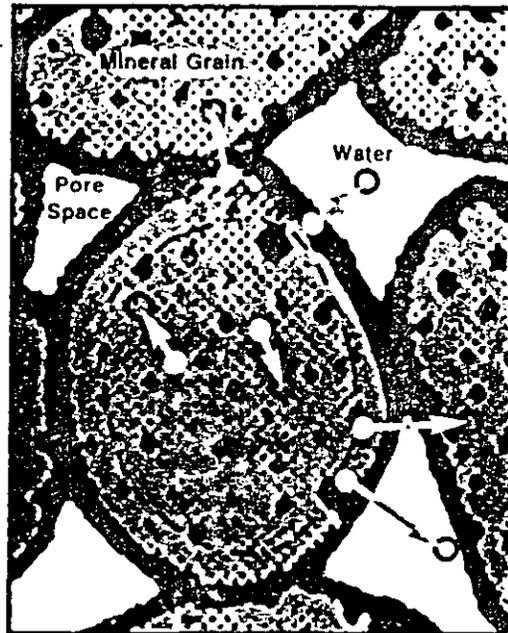
Just as uranium is present in all rocks and soils, so are radon and radium because they are daughter products formed by the radioactive decay of uranium.

Each atom of radium decays by ejecting from its nucleus an alpha particle composed of two neutrons and two protons. As the alpha particle is ejected, the newly formed radon atom recoils in the opposite direction, just as a high-powered rifle recoils when a bullet is fired. Alpha recoil is the most important factor affecting the release of radon from mineral grains.



A radium atom decays to radon by releasing an alpha particle, containing two neutrons and two protons, from its nucleus.

The location of the radium atom in the mineral grain (how close it is to the surface of the grain) and the direction of the recoil of the radon atom (whether it is toward the surface or the interior of the grain) determine whether or not the newly formed radon atom enters the pore space between mineral grains. If a radium atom is deep within a big grain, then regardless of the direction of recoil, it will not free the radon from the grain, and the radon atom will remain embedded in the mineral. Even when a radium atom is near the surface of a grain, the recoil will send the radon



Most of the radon produced within a mineral grain remains embedded in the grain, only 10 to 50 percent escapes to enter the pore space. If water is present in the pore space, the radon atom can more easily remain in the pore space; if the pore space is dry, the radon atom may shoot across the pore and embed in another grain where it cannot move.

atom deeper into the mineral if the direction of recoil is toward the grain's core. However, the recoil of some radon atoms near the surface of a grain is directed toward the grain's surface. When this happens, the newly formed radon leaves the mineral and enters the pore space between the grains or the fractures in the rocks.

The recoil of the radon atom is quite strong. Often newly formed radon atoms enter the pore space, cross all the way through the pore space, and become embedded in nearby mineral grains. If water is present in the pore space, however, the moving radon atom slows very quickly and is more likely to stay in the pore space.

For most soils, only 10 to 50 percent of the radon produced actually escapes from the mineral grains and enters the pores. Most soils in the United States contain between 0.33 and 1 pCi of radium per gram of mineral matter and between 200 and 2,000 pCi of radon per liter of soil air.

DISTRIBUCION GEOLOGICA DEL RADÓN

Su distribución en distintos tipos de acuíferos, ha sido estudiada por Michel, 1987, quien determinó que las mayores concentraciones de radón, en acuíferos compuestos por rocas ígneas y metamórficas, están en función del contenido de Uranio en el acuífero y el patrón de flujo subterráneo. Los niveles más altos se han encontrado, como es de esperarse, en acuíferos compuestos por rocas intrusivas de composición félsica.

El Radón contenido en agua subterránea emplazada en rocas metamórficas, varía ampliamente y se ha encontrado que no hay relación aparente, entre su concentración y el grado de metamorfismo. No obstante, en algunos estudios se ha determinado que el alto grado de metamorfismo se relaciona a altas concentraciones de Radón, como lo es en terrenos donde se han desarrollado pegmatitas con mineralización de Uranio, así como también en esquistos y gneiss, que por su mineralogía presentan niveles de Radón más altos que las rocas metasedimentarias.

DISTRIBUCION GEOLOGICA DEL RADON

En los acuíferos granulares, compuestos por arenas de cuarzo principalmente, el uranio presente es casi nulo, debido a que esas unidades han pasado por un largo proceso de intemperismo y transporte, lo que propicia que se presente escasa concentración de radón. Sin embargo pueden existir areniscas que alojen yacimientos de uranio de tipo secundario, que ha sido depositado a partir del agua subterránea en un medio reductor.

Las arcosas generalmente provienen de sedimentos producto del intemperismo y disgregación de rocas graníticas, los cuales no han sido transportados muy lejos de la roca madre, por lo tanto un intenso intemperismo químico ha alterado los feldespatos a arcillas, que fijan parte del Uranio original. Estos acuíferos contienen concentraciones de Radón que dependerán de la distancia a los ambientes de depósito y procesos por los que hayan pasado los sedimentos que los componen, así como a las características hidráulicas del acuífero, (K y S).

DISTRIBUCION GEOLOGICA DEL RADON

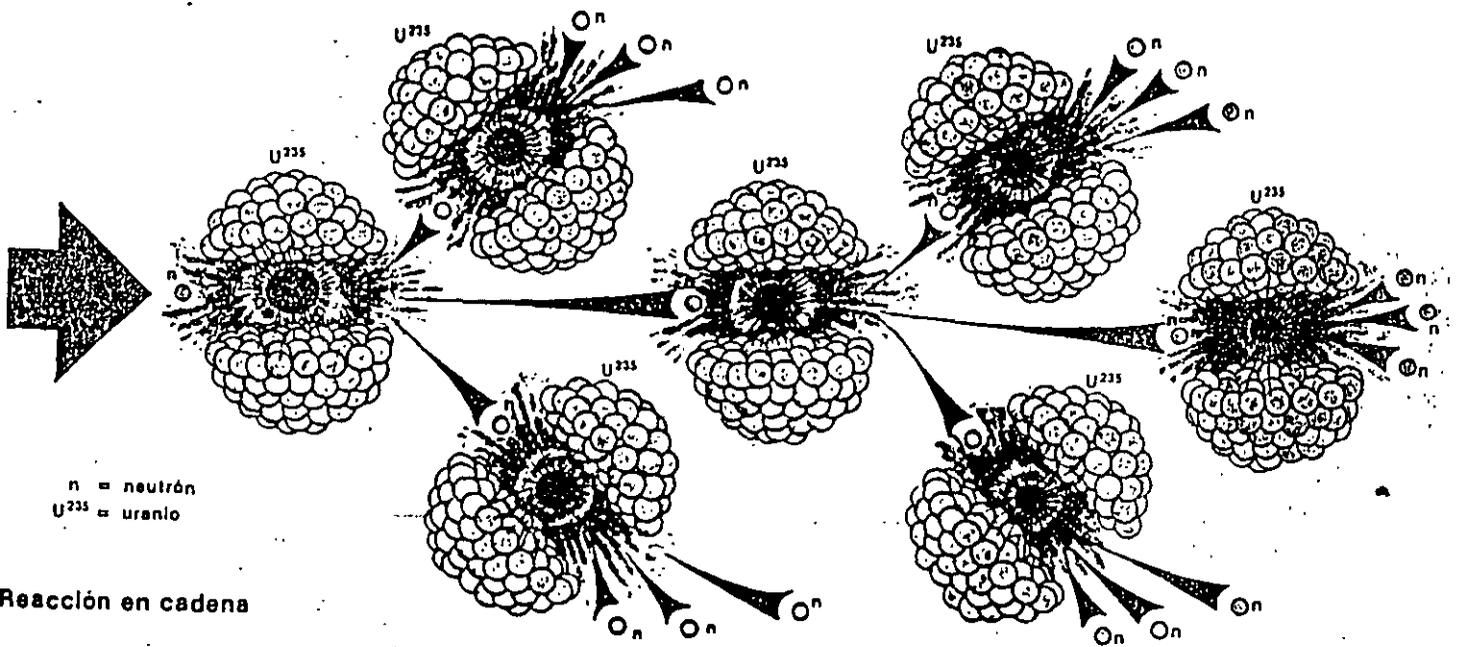
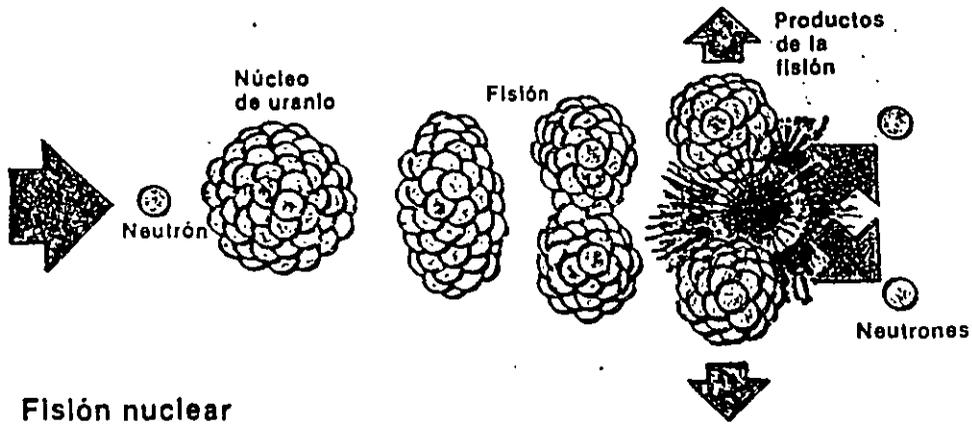
La distribución geológica del Radón esta directamente relacionada con la geoquímica del Uranio y del Torio. En la fusión parcial y cristalización fraccionada del magma, el Uranio y el Torio se concentran en la fase líquida y se incorporan en los productos más ricos en sílice. Por este motivo, las rocas igneas, (aquellas que se forman por la solidificación de una lava o magma) de composición granítica están fuertemente enriquecidas en Uranio y Torio, en comparación con rocas de composición basáltica y ultramáfica, (Faure, 1986).

GENERALIDADES DEL RADÓN-222

El Radón-222 es un gas inerte radiactivo, que pertenece al grupo de los gases nobles. Tiene el más alto punto de fusión y ebullición, así como temperatura y presión críticas, (Cothorn, 1987). Ocurre naturalmente como parte de la cadena de desintegración del Uranio, de donde se derivan sus tres isótopos naturales.

Debido a su vida media y subproducto de decaimiento, el isótopo más importante de analizar es el Radón-222. Es incoloro, inodoro, y químicamente inerte. Debido a sus característica de emisión radiactiva y solubilidad en agua, es utilizado como trazador en el área hidrogeológica.

m.	AMU	Isotopic Comp. (at.%)	Elem.	AMU	Isotopic Comp. (at.%)	Elem.	AMU	Isotopic Comp. (at.%)	Elem.	AMU	Isotopic Comp. (at.%)
H ¹	1.007825	99.985	Zn ⁶⁷	66.927129	4.1	Sn ¹¹³	114.903348	0.36	Dy ¹⁶⁴	163.929171	28.2
H ²	2.0140	0.015	Zn ⁶⁸	67.924846	18.8	Sn ¹¹⁶	115.901747	14.53	Ho ¹⁶⁵	164.930319	100
He ³	3.01608	0.000138	Zn ⁷⁰	69.925325	0.6	Sn ¹¹⁷	116.902956	7.68	Er ¹⁶²	161.928775	0.14
He ⁴	4.00260	99.999862	Ga ⁶⁹	68.925580	60.1	Sn ¹¹⁸	117.901609	24.22	Er ¹⁶⁴	163.929198	1.61
Li ⁶	6.015121	7.5	Ga ⁷¹	70.924700	39.9	Sn ¹¹⁹	118.903310	8.58	Er ¹⁶⁶	165.930290	33.6
Li ⁷	7.016003	92.5	Ge ⁷⁰	69.924250	20.5	Sn ¹²⁰	119.902200	32.59	Er ¹⁶⁷	166.932046	22.95
Be ⁹	9.012182	100	Ge ⁷²	71.922079	27.4	Sn ¹²²	121.903440	4.63	Er ¹⁶⁸	167.932368	26.8
B ¹⁰	10.012937	19.9	Ge ⁷³	72.923463	7.8	Sn ¹²⁴	123.905274	5.79	Er ¹⁷⁰	169.935461	14.9
B ¹¹	11.009305	80.1	Ge ⁷⁴	73.921177	36.5	Sb ¹²¹	120.903821	57.3	Tm ¹⁶⁹	168.934212	100
C ¹²	12.000000	98.90	Ge ⁷⁶	75.921401	7.8	Sb ¹²³	122.904216	42.7	Yb ¹⁶⁸	167.933891	0.13
C ¹³	13.003355	1.10	As ⁷⁵	74.921591	100	Te ¹²⁰	119.904048	0.096	Yb ¹⁷⁰	169.934759	3.05
N ¹⁴	14.003074	99.634	Se ⁷⁴	73.922475	0.9	Te ¹²²	121.903054	2.60	Yb ¹⁷¹	170.936323	14.3
N ¹⁵	15.000108	0.366	Se ⁷⁶	75.919212	9.0	Te ¹²³	122.904271	0.908	Yb ¹⁷²	171.936376	21.2
O ¹⁶	15.994915	99.762	Se ⁷⁷	76.919912	7.6	Te ¹²⁴	123.902823	4.816	Yb ¹⁷³	172.938208	16.12
O ¹⁷	16.999131	0.038	Se ⁷⁸	77.917301	23.6	Te ¹²⁵	124.904433	7.14	Yb ¹⁷⁴	173.938859	31.8
O ¹⁸	17.999160	0.200	Se ⁸⁰	79.916520	49.7	Te ¹²⁶	125.903314	18.95	Yb ¹⁷⁶	175.942564	12.7
F ¹⁹	18.998403	100	Se ⁸²	81.916698	9.2	Te ¹²⁸	127.904463	31.69	Lu ¹⁷⁵	174.940770	97.41
Ne ²⁰	19.992435	90.51	Br ⁷⁹	78.918336	50.69	Te ¹³⁰	129.906229	33.80	Lu ¹⁷⁶	175.942679	2.59
Ne ²¹	20.993843	0.27	Br ⁸¹	80.916289	49.31	I ¹²⁷	126.904473	100	Hf ¹⁷⁴	173.940044	0.162
Ne ²²	21.991383	9.22	Kr ⁷⁸	77.920397	0.35	Xe ¹²⁴	123.905894	0.10	Hf ¹⁷⁶	175.941406	5.206
Ne ²³	22.989767	100	Kr ⁸⁰	79.916380	2.25	Xe ¹²⁶	125.904281	0.09	Hf ¹⁷⁷	176.943217	18.606
Mg ²⁴	23.985042	78.99	Kr ⁸²	81.913482	11.6	Xe ¹²⁸	127.903531	1.91	Hf ¹⁷⁸	177.943696	27.297
Mg ²⁵	24.985837	10.00	Kr ⁸³	82.914135	11.5	Xe ¹²⁹	128.904780	26.4	Hf ¹⁷⁹	178.945812	13.629
Mg ²⁶	25.982593	11.01	Kr ⁸⁴	83.911507	57.0	Xe ¹³⁰	129.903509	4.1	Hf ¹⁸⁰	179.946545	35.100
Al ²⁷	26.98154	100	Kr ⁸⁶	85.910616	17.3	Xe ¹³¹	130.905072	21.2	Ta ¹⁸⁰	179.947462	0.012
Si ²⁸	27.976927	92.23	Rb ⁸⁵	84.911794	72.165	Xe ¹³²	131.904144	26.9	W ¹⁸⁰	180.947992	99.988
Si ²⁹	28.976495	4.67	Rb ⁸⁷	86.909187	27.835	Xe ¹³⁴	133.905395	10.4	W ¹⁸²	179.946701	0.13
Si ³⁰	29.973770	3.10	Sr ⁸⁴	83.913430	0.56	Xe ¹³⁶	135.907214	8.9	W ¹⁸³	181.948202	26.3
Si ³²	31.973762	100	Sr ⁸⁶	85.909267	9.86	Cs ¹³³	132.905429	100	W ¹⁸⁴	182.950220	14.3
S ³²	31.972070	95.02	Sr ⁸⁷	86.908884	7.00	Ba ¹³⁰	129.906282	0.106	W ¹⁸⁶	183.950928	30.67
S ³³	32.971456	0.75	Sr ⁸⁸	87.905619	82.58	Ba ¹³²	131.905042	0.101	W ¹⁸⁸	185.954357	28.6
S ³⁴	33.967866	4.21	Y ⁸⁹	88.905849	100	Ba ¹³⁴	133.904486	2.417	Re ¹⁸⁵	184.952951	37.40
S ³⁶	35.967080	0.22	Zr ⁹⁰	89.904703	51.45	Ba ¹³⁵	134.905665	6.592	Re ¹⁸⁷	186.955744	62.60
Cl ³⁵	34.968852	75.77	Zr ⁹¹	90.905644	11.22	Ba ¹³⁶	135.904553	7.854	Os ¹⁸⁴	183.952488	0.02
Cl ³⁷	36.965903	24.23	Zr ⁹²	91.905039	17.15	Ba ¹³⁷	136.905812	11.23	Os ¹⁸⁶	185.953830	1.58
Ar ³⁶	35.967545	0.337	Zr ⁹⁴	93.906314	17.38	Ba ¹³⁸	137.905232	71.70	Os ¹⁸⁷	186.955741	1.6
Ar ³⁸	37.962732	0.063	Zr ⁹⁶	95.908275	2.80	La ¹³⁸	137.907105	0.09	Os ¹⁸⁸	187.955860	13.3
Ar ⁴⁰	39.962384	99.60	Nb ⁹³	92.906377	100	La ¹³⁹	138.906346	99.91	Os ¹⁸⁹	188.958137	16.1
K ³⁹	38.963707	93.2581	Mo ⁹²	91.905085	14.84	Ce ¹³⁶	135.90740	0.19	Os ¹⁹⁰	189.95836	26.4
K ⁴⁰	39.963999	0.0117	Mo ⁹⁴	93.906813	9.25	Ce ¹³⁸	137.905985	0.25	Os ¹⁹²	191.961467	41.0
K ⁴¹	40.961825	6.7302	Mo ⁹⁵	94.905840	15.92	Ce ¹⁴⁰	139.905433	88.48	Ir ¹⁹¹	190.960584	37.3
Ca ⁴⁰	39.962591	96.941	Mo ⁹⁶	95.904678	16.68	Ce ¹⁴²	141.90721	11.08	Ir ¹⁹³	192.962717	62.7
Ca ⁴²	41.958618	0.647	Mo ⁹⁷	96.906020	9.55	Pr ¹⁴¹	140.907647	100	Pt ¹⁹⁰	189.959917	0.01
Ca ⁴³	42.958766	0.135	Mo ⁹⁸	97.905406	24.13	Nd ¹⁴²	141.907719	27.13	Pt ¹⁹²	191.961019	0.79
Ca ⁴⁴	43.955480	2.086	Mo ¹⁰⁰	99.907477	9.63	Nd ¹⁴³	142.909810	12.18	Pt ¹⁹⁴	193.962655	32.9
Ca ⁴⁶	45.953689	0.004	Tc	-	-	Nd ¹⁴⁴	143.910083	23.80	Pt ¹⁹⁶	194.961766	33.8
Ca ⁴⁸	47.952533	0.187	Ru ⁹⁶	95.907599	5.52	Nd ¹⁴⁵	144.912570	8.30	Pt ¹⁹⁸	195.964926	25.3
Sc ⁴⁵	44.955910	100	Ru ⁹⁸	97.905287	1.82	Nd ¹⁴⁶	145.913113	17.19	Pt ¹⁹⁹	197.967869	7.2
Ti ⁴⁶	45.952629	8.0	Ru ⁹⁹	98.905939	12.7	Nd ¹⁴⁸	147.916889	5.76	Au ¹⁹⁷	196.966543	100
Ti ⁴⁷	46.951764	7.3	Ru ¹⁰⁰	99.904219	7.6	Nd ¹⁵⁰	149.920887	5.64	Hg ¹⁹⁶	195.965807	0.34
Ti ⁴⁸	47.947947	73.8	Ru ¹⁰¹	100.905582	7.0	Pm	-	-	Hg ¹⁹⁸	197.966743	10.02
Ti ⁴⁹	48.947871	5.5	Ru ¹⁰²	101.901348	31.6	Sm ¹⁴⁴	143.911978	3.1	Hg ¹⁹⁹	198.968254	16.84
Ti ⁵⁰	49.944792	5.4	Ru ¹⁰⁴	103.90542	18.7	Sm ¹⁴⁷	146.914895	15.0	Hg ²⁰⁰	199.968300	23.13
V ⁵⁰	49.947161	0.250	Rh ¹⁰³	102.90550	100	Sm ¹⁴⁸	147.914820	11.3	Hg ²⁰¹	200.970277	13.22
V ⁵¹	50.943962	99.750	Pd ¹⁰²	101.90564	1.020	Sm ¹⁴⁹	148.917181	13.8	Hg ²⁰²	201.970617	29.80
Cr ⁵⁰	49.946046	4.345	Pd ¹⁰⁴	103.90429	11.14	Sm ¹⁵⁰	149.917273	7.4	Hg ²⁰⁴	203.973167	6.85
Cr ⁵²	51.940509	83.789	Pd ¹⁰⁶	104.905079	22.33	Sm ¹⁵²	151.919729	26.7	Tl ²⁰³	202.972320	29.524
Cr ⁵³	52.940651	9.501	Pd ¹⁰⁸	105.903478	27.33	Sm ¹⁵⁴	153.922206	22.7	Tl ²⁰⁵	204.974401	70.476
Cr ⁵⁴	53.938882	2.365	Pd ¹¹⁰	107.903895	26.46	Eu ¹⁵¹	150.919847	47.8	Pb ²⁰⁴	203.973020	1.4
Mn ⁵⁵	54.938047	100	Pd ¹¹²	109.905167	11.72	Eu ¹⁵³	152.921225	52.2	Pb ²⁰⁶	205.974440	24.1
Fe ⁵⁴	53.939612	5.8	Ag ¹⁰⁷	106.905092	51.839	Gd ¹⁵²	151.919786	0.20	Pb ²⁰⁷	206.975872	22.1
Fe ⁵⁶	55.934939	91.72	Ag ¹⁰⁹	108.904757	48.161	Gd ¹⁵⁴	153.920861	2.18	Pb ²⁰⁸	207.976627	52.4
Fe ⁵⁷	56.935396	2.2	Cd ¹⁰⁶	105.906461	1.25	Gd ¹⁵⁶	154.922618	14.80	Bi ²⁰⁹	208.980374	100
Fe ⁵⁸	57.933277	0.28	Cd ¹⁰⁸	107.904176	0.89	Gd ¹⁵⁸	155.922118	20.47	Po	-	-
Co ⁵⁹	58.933198	100	Cd ¹¹⁰	109.903005	12.49	Gd ¹⁵⁷	156.923956	15.65	Ar	-	-
Ni ⁵⁸	57.935346	68.27	Cd ¹¹¹	110.904182	12.80	Gd ¹⁵⁸	157.924099	24.84	Rn	-	-
Ni ⁶⁰	59.930788	26.10	Cd ¹¹²	111.902758	24.13	Gd ¹⁶⁰	159.927049	21.86	Fr	-	-
Ni ⁶¹	60.931058	1.13	Cd ¹¹³	112.904400	12.22	Tb ¹⁵⁹	158.925342	100	Ra	-	-
Ni ⁶²	61.928346	3.59	Cd ¹¹⁴	113.903357	28.73	Dy ¹⁵⁶	155.925277	0.06	Ac	-	-
Ni ⁶⁴	63.927968	0.91	Cd ¹¹⁶	115.904754	7.49	Dy ¹⁵⁸	157.924403	0.10	Th ²³²	232.038054	100
Cu ⁶³	62.939598	69.17	In ¹¹³	112.904061	4.3	Dy ¹⁶⁰	159.925193	2.34	Pa	-	-
Cu ⁶⁴	64.927793	30.83	In ¹¹⁵	114.903880	95.7	Dy ¹⁶¹	160.926930	18.9	U ²³⁴	234.040946	0.0055
Zn ⁶⁴	63.929145	48.6	Sn ¹¹²	111.904826	0.97	Dy ¹⁶²	161.926795	25.5	U ²³⁵	235.043921	0.720
Zn ⁶⁶	65.926034	27.9	Sn ¹¹⁴	113.902784	0.65	Dy ¹⁶³	162.928728	24.9	U ²³⁸	238.050784	99.2745



ENERGIA TERMICA Y CALORIFICA

LA FUENTE MÁS IMPORTANTE EN ESTE TIPO DE ENERGÍA ES EL SOL. LOS HIDROCARBUROS Y EL CARBÓN SON OTRA FUENTE DE ENERGÍA TÉRMICA QUE LIBERAN CALOR AL QUEMARSE, LAS RESERVAS DETECTADAS GARANTIZAN SU DISPONIBILIDAD HASTA LOS PRIMEROS LUSTROS DEL PRÓXIMO SIGLO.

LA MODERNA FUENTE DE ENERGÍA TÉRMICA ES EL NÚCLEO DEL ÁTOMO. A PRINCIPIOS DE ESTE SIGLO ALBERT EINSTEIN POSTULÓ QUE TODO EL UNIVERSO ES ENERGÍA; QUE LA ENERGÍA Y LA MATERIA SON LA MISMA COSA EXPRESANDO LA SIGUIENTE RELACIÓN A ESTE POSTULADO:

$$E = MC^2$$

SE REALIZARON EXPERIMENTOS QUE CULMINARON CON LA FISION O RUPTURA DE NÚCLEOS DE ÁTOMOS DE URANIO-235 LOGRANDO QUE UNA PEQUEÑA PARTE DE MATERIA SE TRANSFORMARA EN ENERGÍA TÉRMICA LOGRANDO CORROBORAR LAS TEORÍAS DE EINSTEIN.

EL ÁTOMO ESTÁ FORMADO POR PROTONES, ELECTRONES Y NEUTRONES. EL NÚMERO DE PROTONES QUE CONTIENE EL NÚCLEO DE UNA ÁTOMO DETERMINA EL NUMERO ATOMICO Y ES IGUAL AL NÚMERO DE ELECTRONES ORBITALES. EL NÚMERO DE PROTONES Y NUETRONES SE CONOCE COMO MASA ATOMICA.

EN LA NATURALEZA EXISTEN 272 ÁTOMOS ESTABLES CON MASAS ATOMICAS DIFERENTES QUE DAN LUGAR A LOS 103 ELEMENTOS.

CADA ELEMENTO ESTÁ FORMADO POR EL MISMO NUMERO ATOMICO PERO PUEDE TENER DIFERENTE MASA ATOMICA, A ESTOS ELEMENTOS SE LES CONOCE CON EL NOMBRE DE ISOTOPOS.

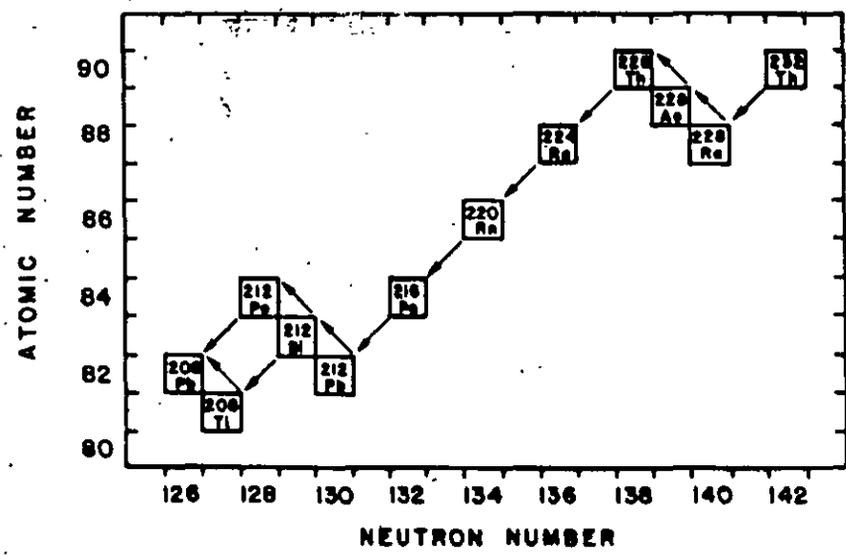
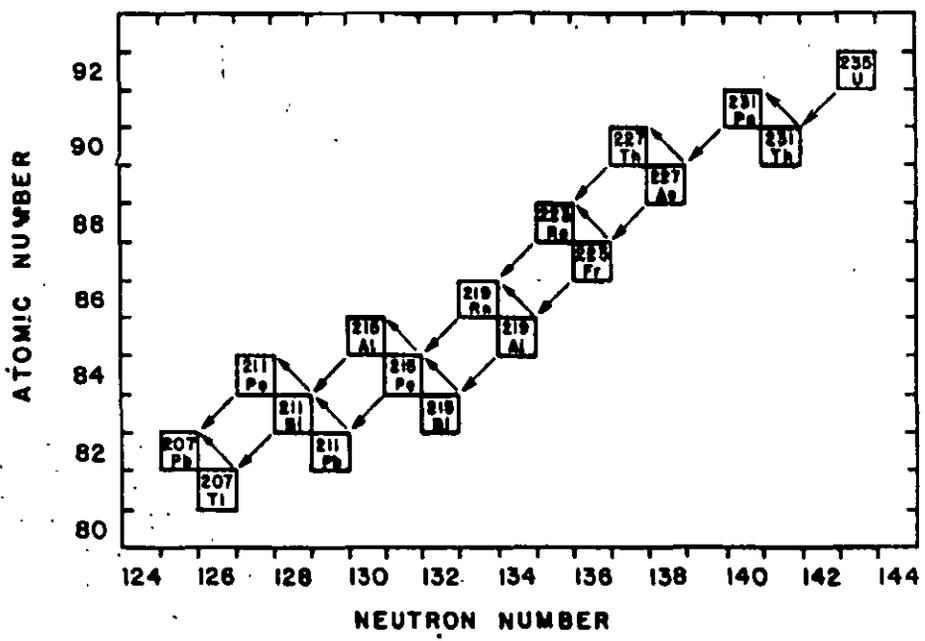
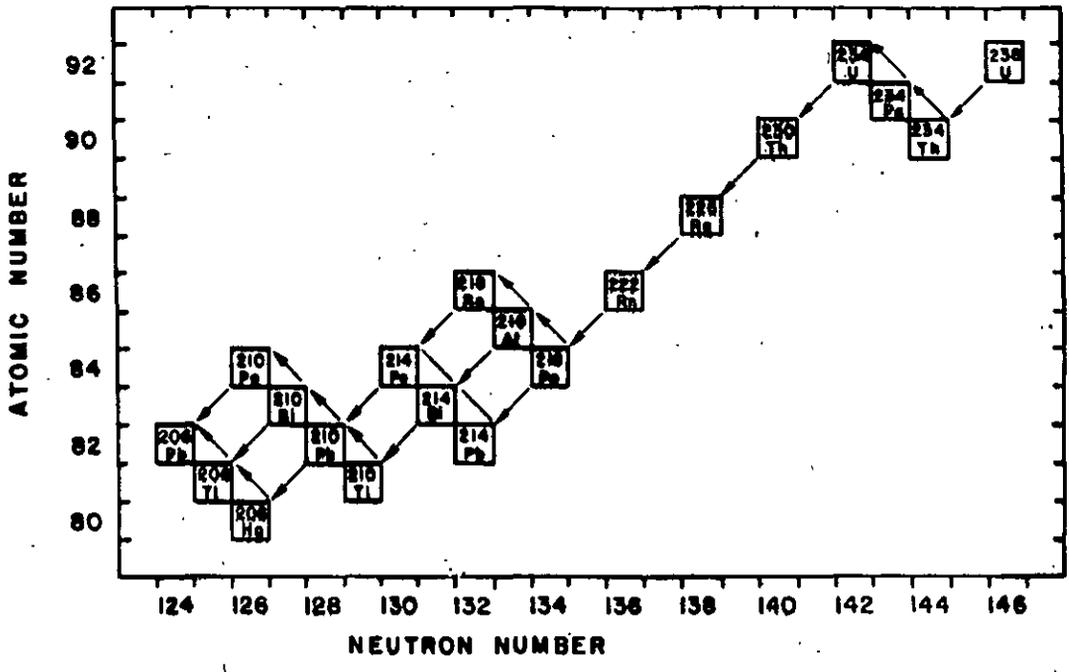
EN LOS EXPERIMENTOS SOBRE RADIOACTIVIDAD EN ELEMENTOS TALES COMO URANIO, POLONIO Y RADIO, LLEVADOS A CABO A FINES DEL SIGLO PASADO POR HENRI BECQUEREL Y LOS CURIE CONDUJERON AL DESCUBRIMIENTO DEL FENÓMENO DE LA TRANSMUTACION DE UN ÁTOMO EN OTRO DIFERENTE A PARTIR DE UNA DESINTEGRACION ESPONTANEA LA CUAL OCURRÍA CON GRAN DESPRENDIMIENTO DE ENERGÍA.

ESTOS EXPERIMENTOS Y LA PROPUESTA DE EINSTEIN CONDUJERON A QUE SI SE LOGRABA DESINTEGRAR A VOLUNTAD LOS ÁTOMOS DE ALGÚN ELEMENTO SE LOGRARÍAN OBTENER CANTIDADES FABULOSAS DE ENERGIA.

EN 1938 SE COMPROBÓ EL FENÓMENO DE FISION NUCLEAR, BOMBARDEANDO CON NUETRONES A NÚCLEOS DE URANIO-235. EN ESTA REACCIÓN CADA NÚCLEO SE PARTE EN DOS NÚCLEOS DE MASAS INFERIORES, EMITIENDO RADIACIONES, Y LIBERANDO ENERGÍA QUE SE MANIFIESTA EN FORMA TERMICA Y EMITIENDO DOS O TRES NUEVOS NEUTRONES.

ENRICO FERMI TRATÓ DE MANTENER Y CONTROLAR UNA REACCIÓN NUCLEAR UTILIZANDO LOS NUETRONES PRODUCIDOS EN LA FISION NUCLEAR PARA FISIONAR A SU VEZ OTROS NÚCLEOS DEL MISMO ISÓTOPO PRODUCIENDO CON ÉSTO UNA REACCION EN CADENA.

ESTOS DESCUBRIMIENTOS TUVIERON COMO PRIMERA APLICACIÓN LA MANUFACTURA DE BOMBAS ATOMICAS QUE FUERON UTILIZADAS DURANTE LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL.



MINI-GLOSARIO

-ROCAS FELSICAS LLAMADAS TAMBIEN ROCAS ACIDAS.

-ROCAS MAFICAS LLAMADAS TAMBIEN BASICAS

-EN LA MODALIDAD DE EXTRUSIVAS ESTAN LA RIOLITA COMO ACIDA Y EL BASALTO COMO BASICA.

-EN LA MODALIDAD DE INTRUSIVAS ESTAN EL GRANITO COMO ACIDO Y EL GABRO COMO BASICA

-PEGMATITAS SON ROCAS QUE SE ORIGINAN A GRANDES PROFUNDIDADES.

-ESQUISTOS Y GNEISS SON ROCAS PRODUCTO DE METAMORFISMO REGIONAL, LA DIFERENCA ENTRE ELLAS ES SU FORMACION A DIFERENTES PRESIONES, UNO PUEDE TRANSFORMARSE EN EL OTRO. SON ROCAS FOLIADAS, DE MANERA NATURAL A PARTIR DEL PRIMERO SE FORMA EL SEGUNDO. SU ORIGEN PUEDE SER IGNEO O SEDIMENTARIO.

-ARENISCAS ESTE TIPO DE ROCAS SEDIMENTARIAS ESTAN DIVIDIDAS EN TRES GRUPOS:

-ARENISCA DE CUARZO O CUARCITA, MAYOR CONTENIDO DE CUARZO.

-ARCOSAS EN DONDE EL MAYOR CONTENIDO ES EL FELDESPATO.

-ARENISCAS LITICAS O LITARENITA EL MAYOR CONTENIDO ES DE FRAGMENTOS DE ROCAS, (VOLCANICAS, METAMORFICAS Y SEDIMENTARIAS).



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

TEMA :

**INTRODUCCIÓN
CALIDAD DEL AGUA**

**DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE - OCTUBRE 1999**

Disponibilidad del Agua en México en Función de la Cantidad, Calidad y Usos

Blanca Jiménez Cisneros

INTRODUCCIÓN

México dispone de 5125 m³/hab. por año y de acuerdo con Postel (1992) no se clasifica como un país con escasez (2000 m³/hab por año). Sin embargo, México como muchos otros países, sufre de escasez severa en varias cuencas hidrológicas debido a dos factores: a) el deterioro de la calidad, el cual limita el empleo del agua y, b) el defasamiento espacial y temporal entre la oferta y la demanda. En este trabajo aborda el primer problema y se plantea una metodología para calcular la disponibilidad en términos de su cantidad y la calidad.

El índice de disponibilidad (*ID*) consta de dos términos (a, b), donde el primero refleja la cantidad y el segundo el grado de tratamiento requerido por un agua para darle el uso deseado en función de su calidad. El parámetro b, se evalúa con ayuda de otro índice denominado Potencial de Uso (*PU*) que mide qué tanto y por qué se aleja el agua de la calidad deseada.

Al emplear el *ID* fácilmente se observa cómo se modifica la disponibilidad del agua obtenida a partir de los balances hidráulicos y se tiene una idea clara de las necesidades de tratamiento por región hidrológica para un uso dado. Adicionalmente, al calcular el índice de Potencial de Uso se logran identificar algunos problemas generados por los conflictos entre la cantidad y la calidad para ciertos fines.

Además, la metodología propuesta para el cálculo del *PU* tiene la ventaja de no requerir datos de parámetros predeterminados, iguales para todo el país o región, con periodos largos y uniformes de muestreo. El cálculo del índice es sencillo, lo que hace a la metodología muy útil para países en desarrollo.

ANTECEDENTES

Para preservar el agua en cantidad y calidad es necesario conocer cuánta agua hay, cómo se usa y en qué estado se encuentra. De esta información derivan las políticas de administración, las necesidades de infraestructura de tratamiento y las de importación de agua de una cuenca a otra, cuando en la zona no hay suficiente o es de mala calidad

Durante la década de los 60's se hicieron muchos esfuerzos para clasificar los cuerpos de agua de acuerdo con su calidad en una forma ágil y confiable. Este fue el origen de los denominados "Índices de Calidad" (Horton, 1965, Landwehr, 1979 y Crabtree *et al.*, 1987).

En general, estos índices se caracterizan por emplear un número limitado y específico de parámetros, combinándolos entre ellos sin ningún sustento físico, químico o biológico. La dificultad de aplicarlos en forma universal para representar problemas prácticos hizo que hoy en día estén casi abandonados. A pesar de ello, y sobre todo en países donde la falta de infraestructura y programas de saneamiento ha deteriorado la calidad de muchos cuerpos de agua, es todavía necesario contar con un método para evaluar la cantidad disponible de agua tomando en cuenta su calidad. Los métodos de administración del agua empleados en países avanzados requieren una gran cantidad de datos, la medición de los mismos parámetros en todo el territorio así como frecuencias uniformes de muestreo durante periodos prolongados. Emplean además complejos modelos matemáticos. Estos requerimientos son difíciles de cumplir en países en desarrollo, en los que se sigue acostumbrando establecer la disponibilidad del agua sólo en términos de su cantidad, sin tomar en cuenta que la calidad limita su empleo como desafortunadamente sucede en la práctica.

La necesidad de tener una idea clara de la disponibilidad efectiva del agua llevó a desarrollar un índice que tomara en cuenta la calidad a partir de la información disponible (Jiménez y Ramos, 1995). Este método es sencillo y ofrece un enfoque racional para el manejo del recurso de manera que en un futuro se puedan emplear modelos matemáticos más completos y de mayor precisión.

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE DISPONIBILIDAD

El índice de disponibilidad para un determinado uso se define como

$$ID = (a, b) \quad (1)$$

donde

a: cantidad de agua renovable para una región hidrológica.

b: clasificación del agua según el tratamiento requerido para adecuar su calidad al uso que se le pretende dar.

Para calcular "a" se emplea la ecuación de balance que se basa en la figura 1

$$S(i) = \sum_k S_k(i-1) + T(i-1) + CP(i) - \sum_k D_k(i) - T(i) + \sum_k R_k(i) \quad (2)$$

donde

(i) : designa la región en estudio;

$(i-1)$: las regiones cuyas descargas ingresan a la región (i) ;

$S(i)$: el excedente de volumen disponible en la región (i)

$T(i-1)$: Transformaciones certificadas de volúmenes de agua desde otras regiones a la región (i) ;

$CP(i)$: el volumen que ingresa por cuenca propia a la región (i)

$T(i)$: Transferencias desde la región (i) hacia otras regiones debidos a compromisos contraídos;

$D_k(i)$: las demandas para el uso k en la región (i) ;

$R_k(i)$: los retornos correspondientes al uso k en la región (i) .

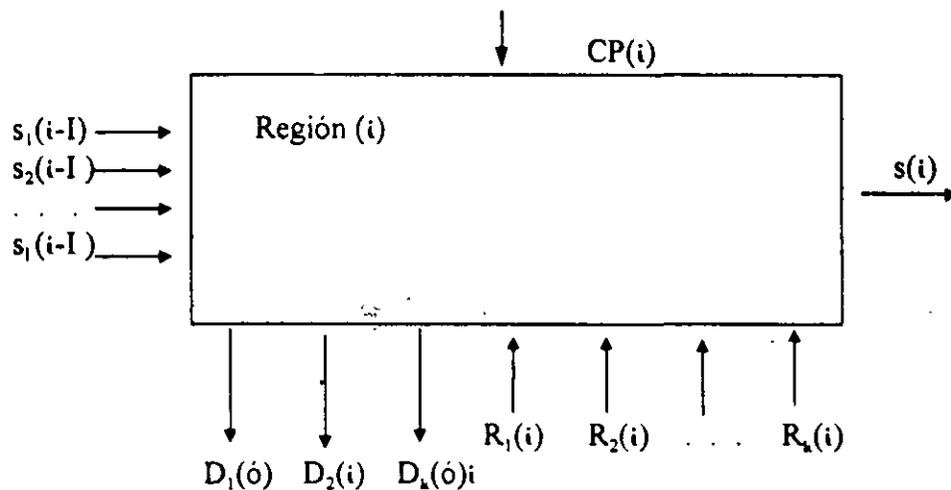


Figura 1. Diagrama para el balance hidráulico

En el manejo de la ecuación (2) se debe considerar que:

- ✓ Se aplica de aguas arriba a aguas abajo, de tal forma que en la primera región ($i = 1$) se tiene que $S(i - 1) = 0$.
- ✓ Las demandas para generación hidroeléctrica no se incluyen, dado que para ese caso $D_K(1) = R_K(1) \forall K$.
- ✓ En el término $CP(i)$ se incluye el escurrimiento superficial y la recarga de los acuíferos generada por la lluvia; cuando existen embalses en la región, se resta la evaporación neta (evaporación menos lluvia).
- ✓ En muchas ocasiones, los volúmenes de demanda y de retorno no se miden directamente por lo que se estiman a partir de las láminas de riego y dotaciones por habitante, en el primer caso, y de porcentajes de retorno, en el segundo.

De acuerdo con la ecuación (2) la disponibilidad relativa del agua, en términos de la cantidad, puede expresarse como:

$$Pa(i) = \frac{S(i) + \sum_k D_k(i)}{D_k(i)} \quad (3)$$

De tal forma que

Si $Pa(i) \geq 1.4$ la disponibilidad es abundante y $a = 1$

Si $0.7 \leq Pa(i) < 1.4$ la disponibilidad está en equilibrio con las demandas y $a = 2$

$Pa(i) < 0.7$ la disponibilidad es escasa y $a = 3$

La ecuación de balance (2) se aplica para promedios anuales, y no considera las variaciones dentro del año ni la posibilidad de que se presenten periodos de sequía, por lo que los valores límite (1.4 y 0.7) podrían modificarse en función de la capacidad de almacenamiento disponible en la región y la variabilidad interanual de las lluvias.

Para calcular el término "b1" del índice de disponibilidad *ID2*, primero se determina el índice de Potencial de Uso (*PU*)³, con ayuda de una simple hoja de cálculo.

En ella se tiene almacenados los valores de los diversos parámetros que la normatividad establece para definir la calidad requerida para un uso determinado. El cálculo del *PU* se basa en comparar los valores de cada parámetro *I* medido en una región *PM(I)* con lo establecido por la norma *PN(I)*⁴, para obtener un valor *RN(I)* el cual mide que tanto se aleja uno de otro de acuerdo con

$$PM(I) \leq PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ establece un máximo admisible} \Rightarrow RN(I) = 1 \quad (4)$$

$$PM(I) > PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ establece un máximo admisible} \Rightarrow RN(I) = PM(I) / PN(I) \quad (5)$$

$$PM(I) \leq PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ es un mínimo admisible} \Rightarrow RN(I) = PN(I) / PM(I) \quad (6)$$

$$PM(I) > PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ es un mínimo admisible} \Rightarrow RN(I) = 1 \quad (7)$$

$$PM(I) > 0 \text{ y } PN(I) \text{ debe ser ausente (cero)} \Rightarrow RN(I) = PM(I) \quad (8)$$

La Tabla 1, contiene algunos ejemplos de la aplicación del cálculo de *RN(I)*.

Tabla 1. Ejemplos del calculo de RN (I)

Parámetro	Valor promedio medido	Valor en norma RN (I)	Condición aplicada	Valor de RN (I)
As	0.02 mg/L	Máximo de 0.05 mg/L	$PM(I) \leq PN(I)$	1
As	0.2 mg/L	máximo de 0.05 mg/L	$PM(I) > PN(I)$	$\frac{PM(I)}{PN(I)} = \frac{0.2}{0.05} = 4$
O ₂	2 mg/L	mínimo de 4 mg/L	$PM(I) \leq PN(I)$	$\frac{PN(I)}{PM(I)} = \frac{4}{2} = 2$
O ₂	6 mg/L	mínimo de 4 mg/L	$PM(I) > PN(I)$	1
Grasas y aceites	10 mg/L	ausente	$PM(I) > 0$ y $PN(I) = 0$	10

El PU se obtiene a partir de los valores de $RN(I)$ calculados de acuerdo con.

$$PU = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RN(I) \quad (9)$$

donde

n : número de parámetros medidos en una región

Cabe mencionar, que por un lado el método permite variar n , (número y tipo de parámetros) de manera que se consideren criterios federales, la legislación local, o bien, los parámetros de interés para un análisis específico y, por otro, que su valor no necesariamente es igual al total de parámetros que establece una norma.

Al calcular el PU se tienen dos posibilidades

- a) $PU = 1$ Implica que a partir de la información disponible el agua es apta para el uso que se le pretende dar.
- b) $PU > 1$ Indica que el agua no cumple con los criterios de calidad y mientras mayor sea su valor más se aleja de las condiciones deseadas.

Durante el cálculo del PU , el programa desarrollado destaca aquellos parámetros por los cuales el PU se aleja de 1 así como los parámetros para los cuales $RN(I)$ es >1 .

Esto permite evaluar si existen problemas específicos, aún cuando el promedio sea cercano o igual a 1. Además, con esta información se puede establecer si es posible controlar el problema mediante tratamiento del agua. A partir de este razonamiento se asigna un valor al término " b " como sigue

$b = 1$, si el agua cumple con la calidad requerida tal como está ($PU = 1$) y por tanto no requiere tratamiento.

$b = 2$, si el tratamiento requerido es simple y económico (filtración por ejemplo), en función de los parámetros que hacen que el PU se aleje de 1.

$b = 3$, si se requiere un proceso de tratamiento costoso (ósmosis inversa por ejemplo), en función de los parámetros que determinen que el PU sea >1 .

Finalmente, se establece los valores posibles del ID en función de a y b , de acuerdo con la Tabla 2.

Tabla 2. Índice de disponibilidad (ID)
basado en la cantidad, calidad y uso del agua

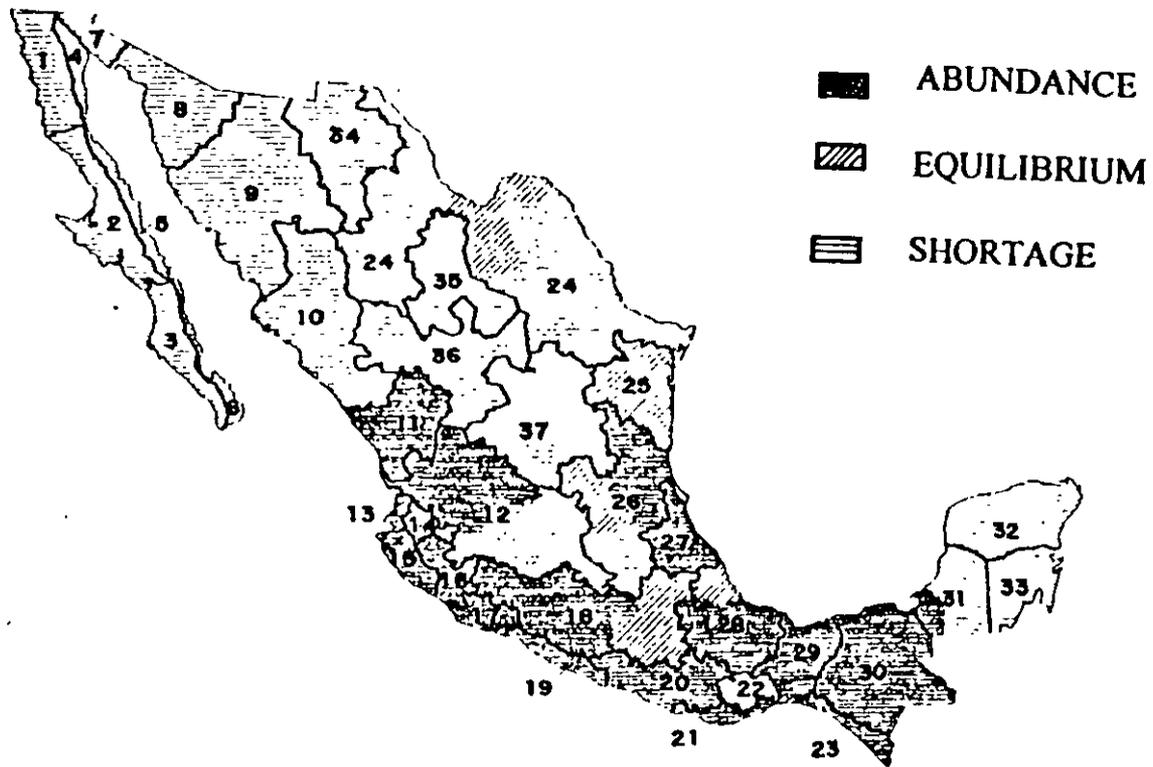
Cantidad (a)	Calidad (b)		
	Buena 1	Requiere trata- miento simple y económico 2	Requiere tratamiento costoso 3
1 (Abundante)	11	12	13
2 (Equilibrio)	21	22	23
3 (Escasez)	31	32	33

Las principales limitaciones en la calidad del agua corresponden a los casos situados en la última columna de la Tabla 2. Para el nivel (1,3) lo más fácil puede ser cambiar de fuente de abastecimiento, dado que hay abundancia de agua, mientras que para los niveles (2,3) y (3,3) se debe evaluar la factibilidad económica de aplicar un tratamiento costoso contra importar agua de otra cuenca.

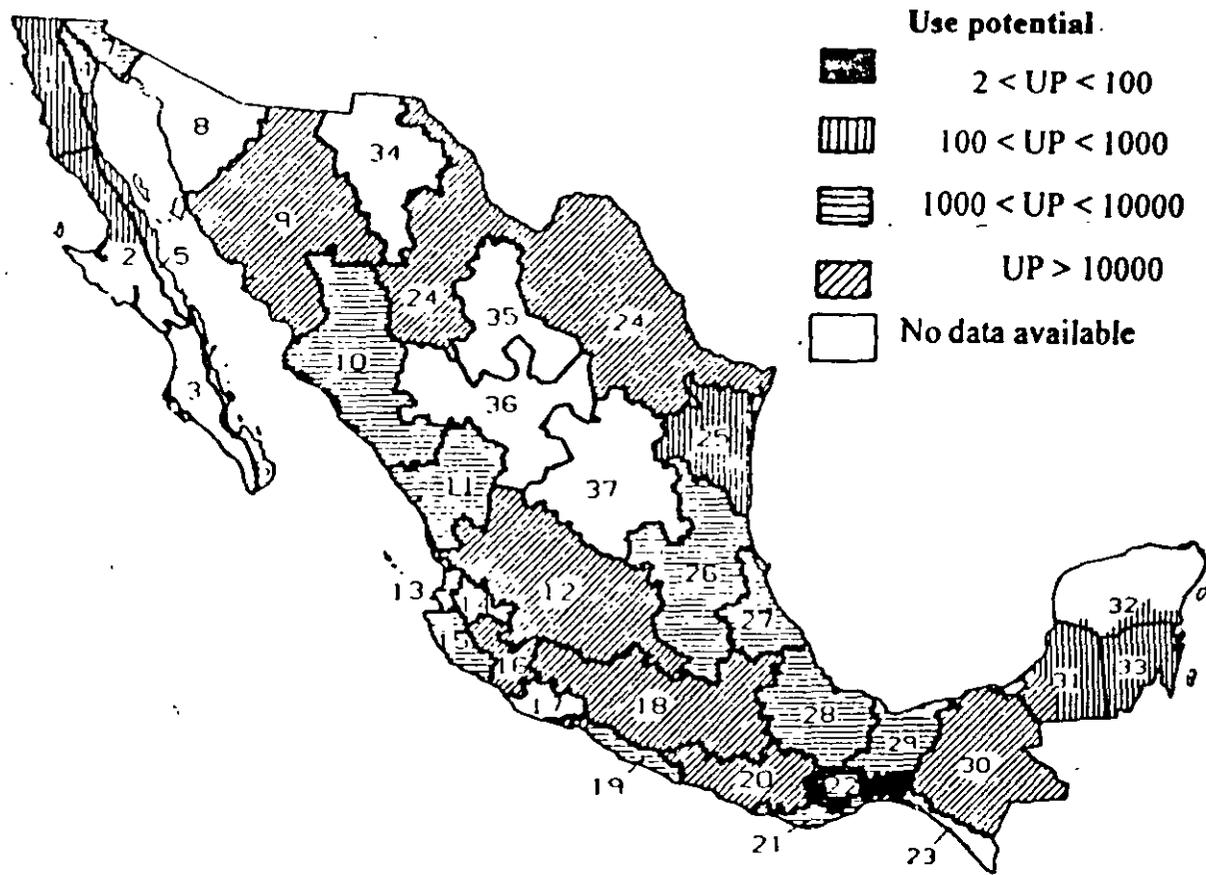
APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DE MÉXICO

México se divide en 37 regiones hidrológicas en las cuales al utilizar la ecuación 2 se obtiene la distribución del recurso del Mapa 1. Este mapa muestra que en varias regiones del norte del país el agua es escasa mientras que al sur hay abundancia.

Para evaluar la calidad se calculó el Índice de Potencial de Uso, PU , para cada región empleando para ello los datos de la Red Nacional de Monitoreo y los Criterios Ecológicos de Uso del Agua (Diario Oficial de diciembre de 1989) que, sin tener carácter obligatorio, se emplean en México para clasificar el posible uso del agua según su calidad. Estos criterios toman en cuenta los usos y número de parámetros de la Tabla 3.



Map 1. Hydraulic Balance for Mexican Hydrological Regions



Map 2. Use potential index for water supplies in surface water

Tabla 4. Usos que se da al agua en las diferentes regiones

Región	Cantidad	"a"	PU agua consumo humano				"b"
			Superficial		Subterránea		
			valor	tipo	Valor	tipo	
01	Escasez	3	105	P04, SAAM	486	CF	3
02	Escasez	3	SD	---	SD	---	3
03	Escasez	3	SD	---	SD	---	--
04	Escasez	3	SD	---	SD	---	3
05	Escasez	3	SD	---	SD	---	3
06	Escasez	3	SD	---	6	CF	2
07	Escasez	3	2200	CF	SD	---	3
08	Escasez	3	SD	---	SD	---	--
09	Escasez	3	50730	CF	SD	---	3
10	Escasez	3	1300	CF	SD	---	3
11	Abundante	1	3130	CF	155	CF, P04	3
12	Abundante	1	77 x 10 ⁴	CF, P04	128	CF	3
13	Abundante	1	4180	CF, S04, SS	SD	---	3
14	Abundante	1	4220	CF	SD	---	3
15	Abundante	1	1250	CF	380	CF	3
16	Disponibili- dad	1	13100	CF	450	CF	3
17	Abundante	1	SD	---	SD	---	--
18	Abundante	1	7 x 10 ⁹	CF, NIT	10	CF	3
19	Abundante		9650	CF, CI	1	---	3
20	Abundante	1	72930	CF	1	---	2
21	Abundante	1	2800	CF, CI	SD	---	3
22	Escasez Equilibrio	3 1	11	CI	SD	---	1
23	Abundante	1	SD	---	SD	---	--
24	Escasez	3	2 x 10 ⁷	CF, P04	SD	---	3

Tabla 4. Usos que se da al agua en las diferentes regiones

Región	Cantidad	"a"	PU agua consumo humano				"b"
			Superficial		Subterránea		
			valor	tipo	Valor	tipo	
	Equilibrio	2					
25	Equilibrio	2	190	CF, Ni, Al	SD	---	3
26	Equilibrio Escasez	2 3	17 x 10 ²	CF, COL, Hg Al NIT Ni	SD	---	3

	Abundante	1					
32	Escasez	3	SD	---	300	CF	--
33	Escasez	3	106	CF	4	SO ₄	3
34	Escasez	3	SD	---	1	---	1
35	Escasez	3	SD	---	SD	---	--
36	Escasez	3	SD	---	8	F	2
37	Escasez	3	SD	---	12	CF	2

Al: Aluminio

COL: Color

SD: Sin datos para calcularlo

As: Arsénico

F: Fluor

SD: Sólidos disueltos

B: Boro

NAT: Nitratos

SO₄: Sulfatos

CF: Coliformes fecales

Ni: Níquel

SS: Sólidos suspendidos

Cl: Cloruros

NIT: Nitritos

CO: Conductividad

PO₄: Fosfatos

Tabla 5. Parámetros que rebasaron el Criterio Ecológico para uso de los cuerpos superficiales como fuente de abastecimiento.

Parámetro	Valor del criterio mg/l	Número de veces en que se excede RN (I)
Coliformes fecales	1000 NMP/100 ml	13 900
Color aparente	75	3123
Grasas y aceites	0	10
SAAM	0.5	1.2
Aluminio	0.02	61
Fierro	0.3	2
Mercurio	0.001	500
Níquel	0.01	50

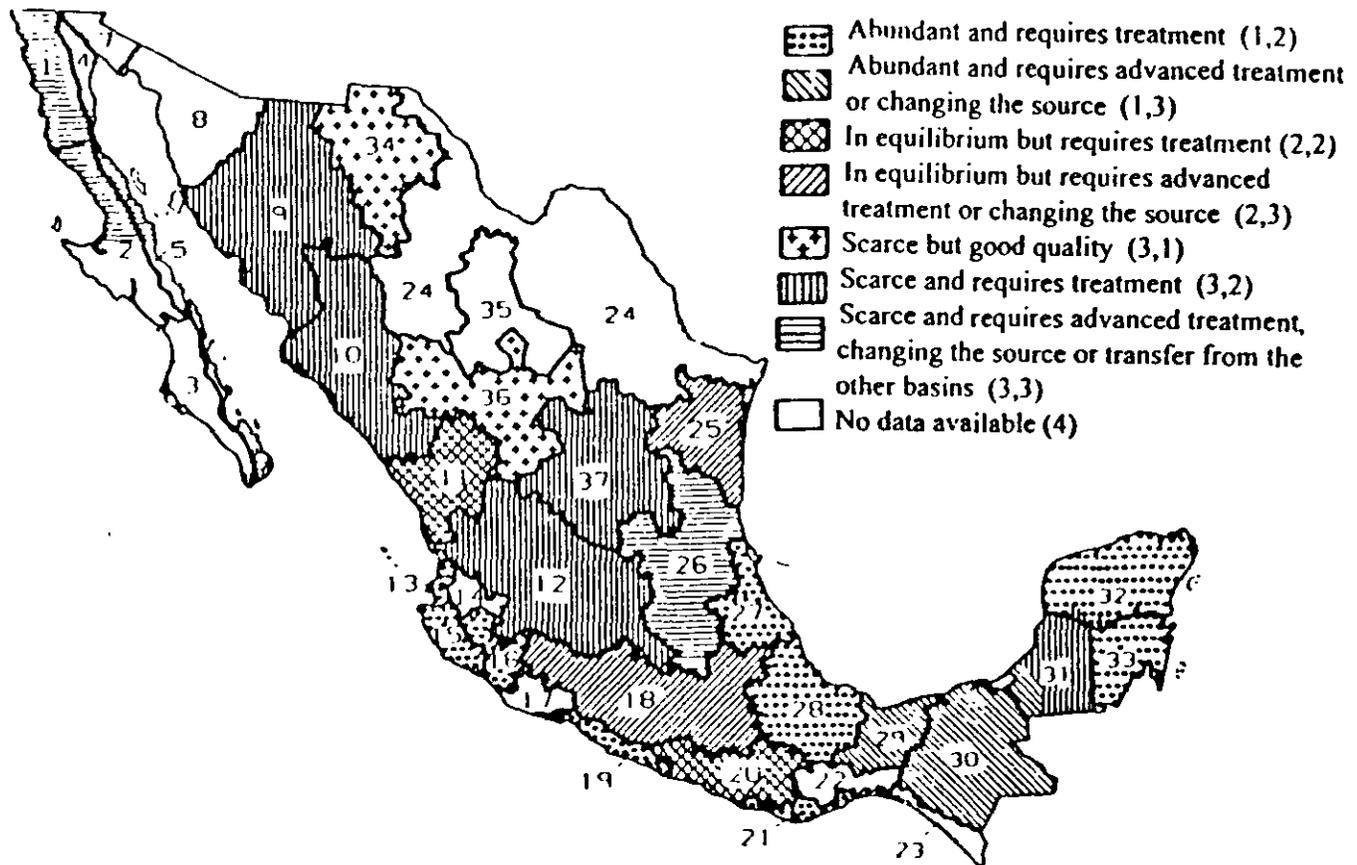
Otro ejemplo, lo constituye la región 16 (Armería Coahuayana), donde el *PU* tuvo un valor de 13 100, siendo el único parámetro que excede el Criterio de Uso de los coliformes fecales (CF). En este caso, según la Tabla 4, la región tiene disponibilidad abundante de agua y por tanto $a=1$ y dado que el tratamiento para control del problema es un simple sistema de desinfección (como puede ser la cloración) se le asigna a "*b*" un valor de 2.

En el Mapa 3 se muestra cómo cambia la disponibilidad del agua al considerar, tanto de la cantidad como la calidad para abastecimiento.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

De los mapas 1 y 3 se concluye, a primera vista que para algunas regiones del norte aún cuando no hay suficiente agua en algunas regiones ésta si es de calidad adecuada, mientras que en el sur -a pesar de que hay abundancia- su disponibilidad se limita por la necesidad del tratamiento.

Por otra parte, al analizar con mayor detalle la información obtenida durante el cálculo del *PU* se pudo establecer cuál es la problemática nacional en materia. La fig. 2 muestra los problemas más frecuentes en los cuerpos de agua superficiales y subterráneos para suministro. En ambos casos el problema principal lo constituye la contaminación microbiológica. Además, se puede establecer que aunque difiere mucho la cantidad de datos disponibles de los cuerpos de agua superficiales en relación con los subterráneos, sistemáticamente los primeros son de calidad notoriamente inferior a los segundos. De hecho, son muy escasos los cuerpos superficiales aptos para abastecimiento de consumo humano e incluso su disponibilidad para uso en riego es limitada. Las Figs. 3 y 4 destacan



Map 3. Availability Index (AI) for drinking water sources based on quantity and quality of water

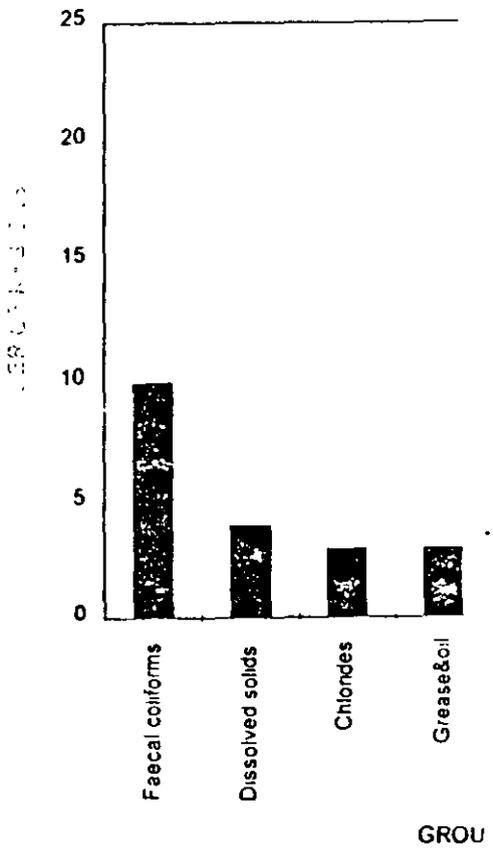
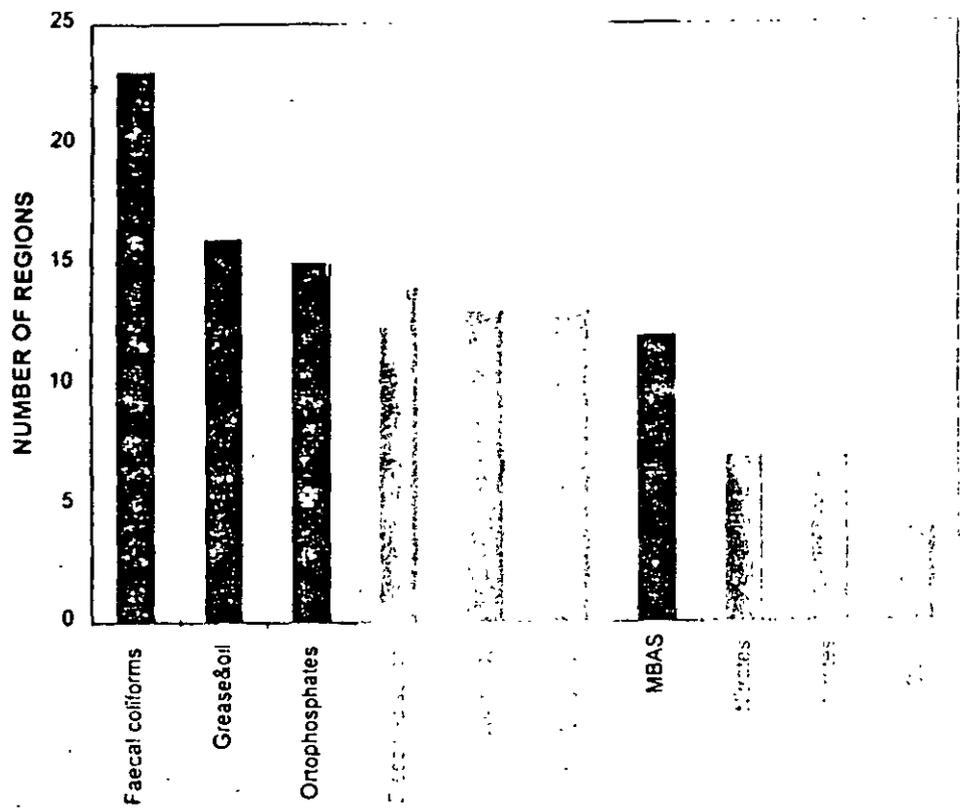


Figure 1.1: Pollutants most frequently detected in surface and groundwater sources for

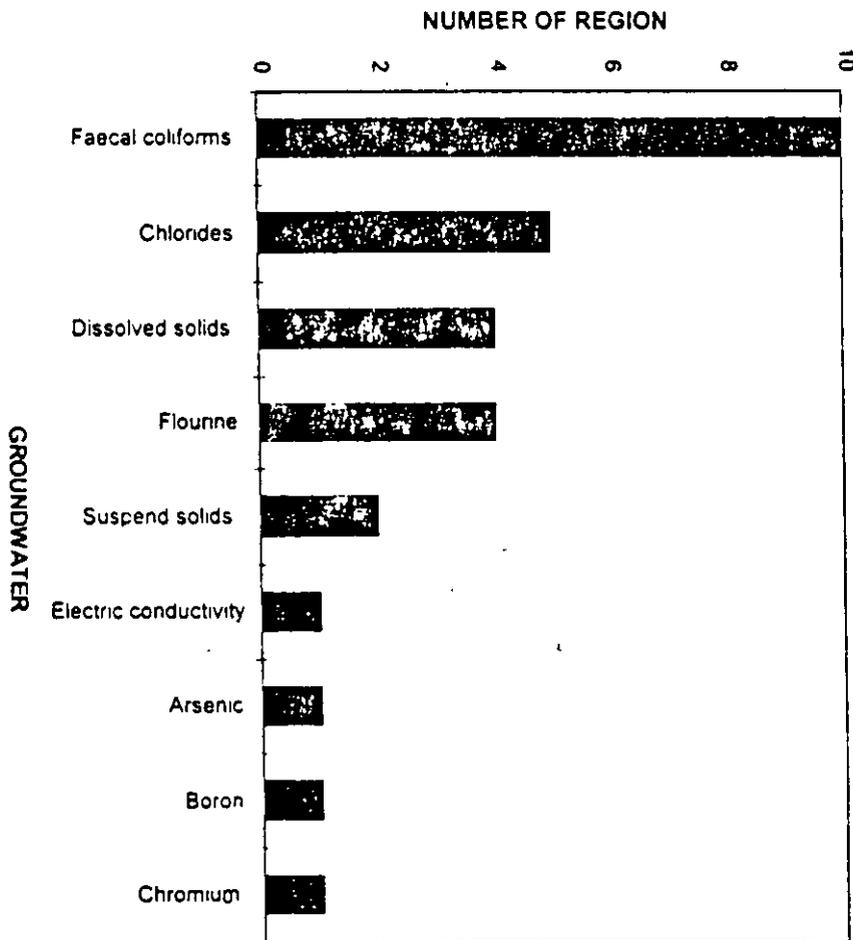
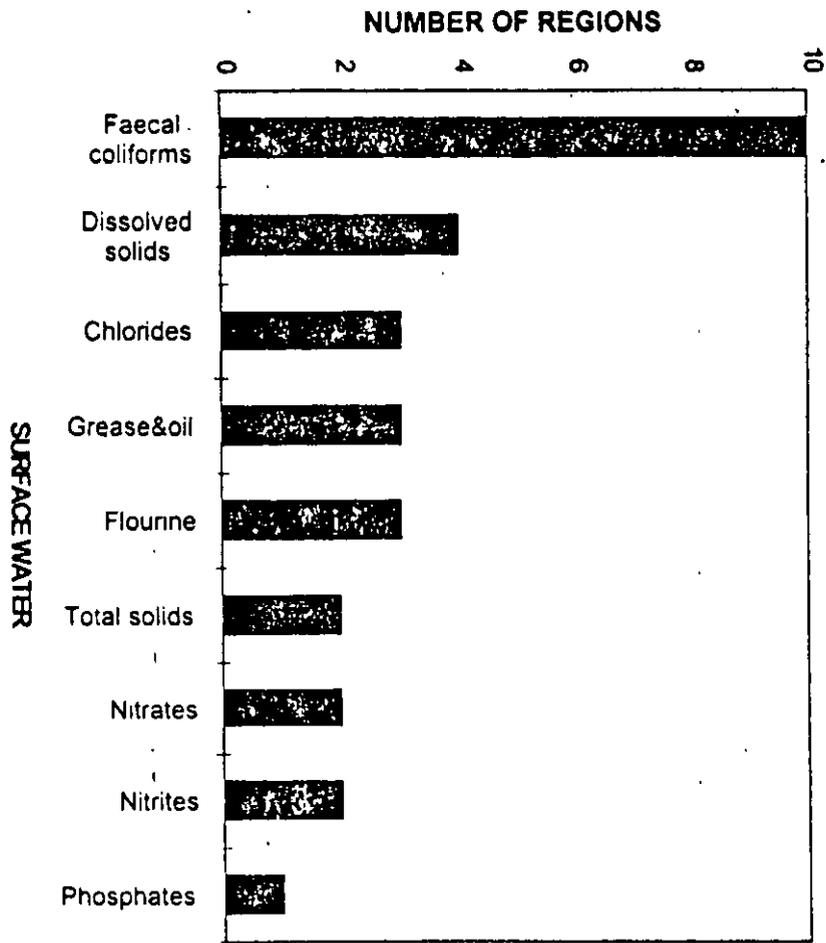
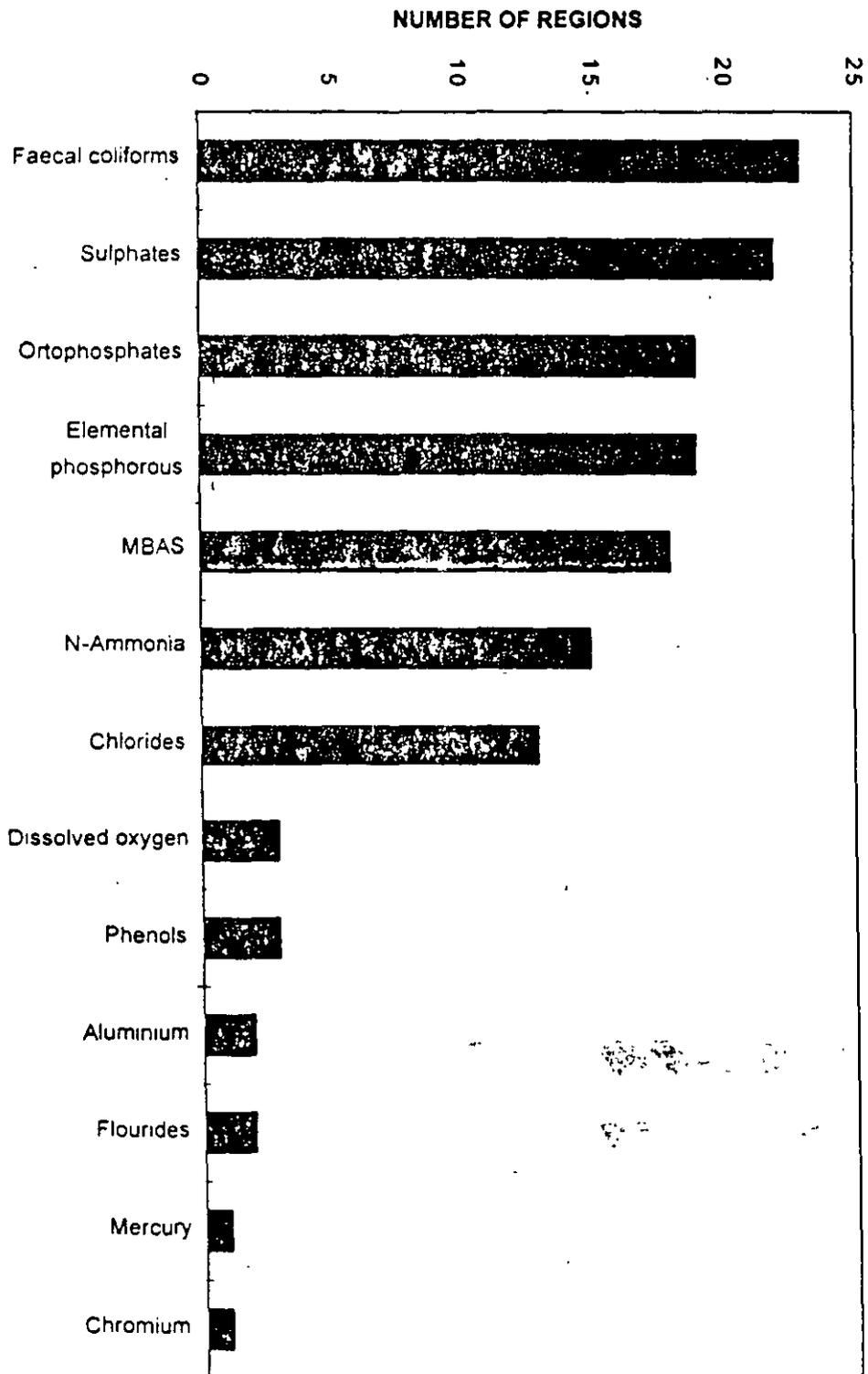


Figure 3. Parameters most frequently exceeded in surface and groundwater sources for irrigation

Figure 4. Parameters most frequently exceeded in surface water sources for aquatic life protection



los parámetros que limitan la disponibilidad del agua para uso agrícola y protección ecológica de la vida acuática; nuevamente el problema principal es de tipo microbiológico.

Para evaluar el problema del agua a nivel país se efectuó, a partir de los índices desarrollado y el análisis de los principales usos del agua por región, varios mapas que combinan diversa información. El Mapa 4 contiene las regiones con escasez de agua y, donde además existe problema de contaminación de las principales fuentes de abastecimiento para las cuales debe haber programas severos de control de la contaminación por descargas. También presenta los lugares con escasez en cantidad donde se emplea un gran volumen de agua para riego a partir de fuentes que también son empleadas con fines municipales. En esta situación, se propone motivar un ahorro de agua para fines agrícolas y liberar agua para el consumo humano. Así como, para las zonas donde hay industria y escasez, se recomienda desarrollar y/o implantar programas de reúso y reciclamiento del agua en esta actividad.

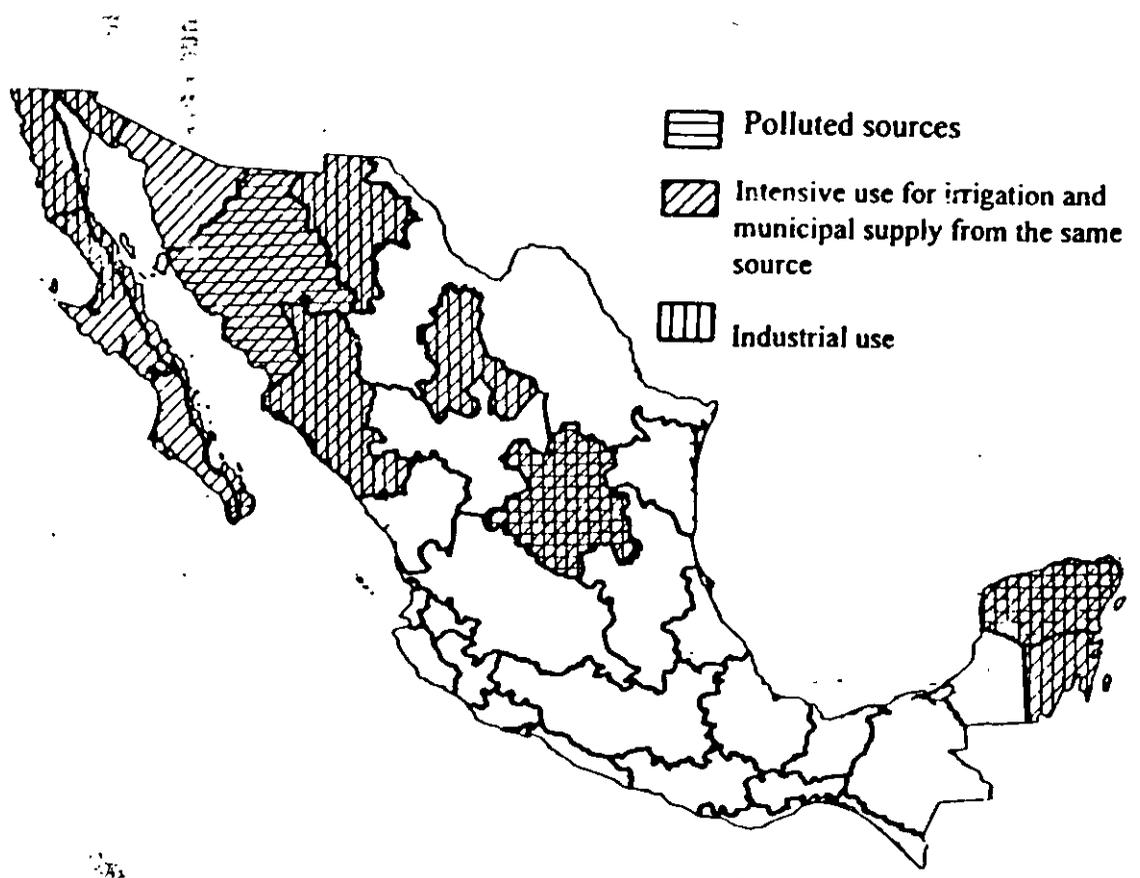
El Mapa 5 muestra la situación del agua subterránea en el país. Este mapa combina las zonas donde el abastecimiento doméstico es predominantemente de acuíferos contaminados y sobreexplotados, en los cuales se debería tomar medidas de control muy estrictas en lo que se refiere a la preservación de cantidad y calidad (control estricto de descargas y acuíferos y restricciones de permiso de explotación, etc).

Además, destaca las zonas donde se emplea agua subterránea para riego e industria y, donde el abastecimiento doméstico se hace a partir de las mismas fuentes o de cuerpos superficiales de mala calidad. Si lo anterior se conjunta con acuíferos sobreexplotados, se concluye la necesidad de desarrollar e implantar programas específicos de uso eficiente. En este mapa también se señalan las regiones donde se requiere conocer el balance hidráulico del acuífero.

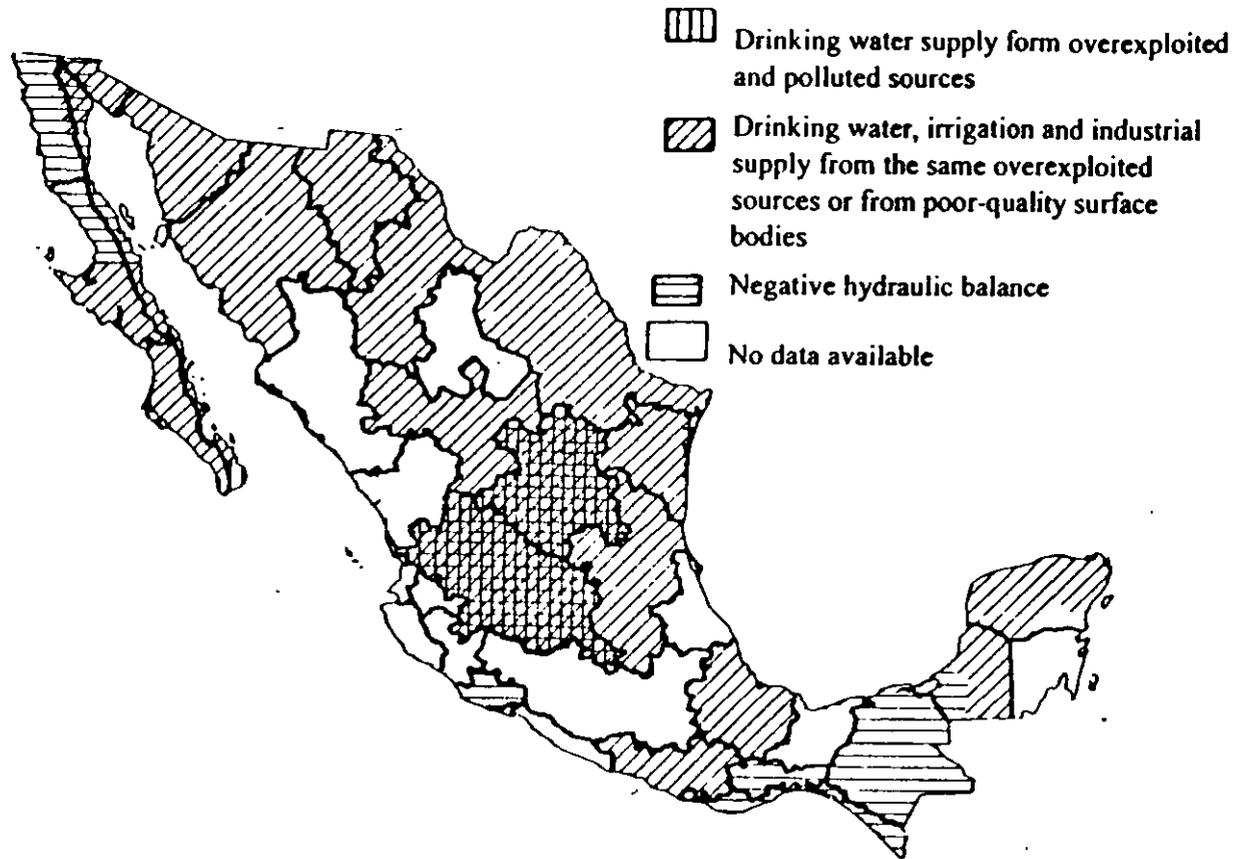
CONCLUSIONES

En general, los resultados de este trabajo permiten un planteamiento del problema global de la cantidad y calidad del agua en México de manera que se puede contribuir a formular una política ordenada del aprovechamiento y uso racional del agua. En efecto, al establecer dónde y cuáles son los principales problemas de contaminación del agua así como cuáles son los conflictos cantidad-calidad-uso se puede definir una jerarquización para atender los problemas. Esta información no es posible obtenerla a partir de los balances hidráulicos regionales o de los mapas tradicionales de contaminación en (Demanda Biológica de Oxígeno pero si Demanda Química de Oxígeno), del *PU* y del *ID* se pueden derivar.

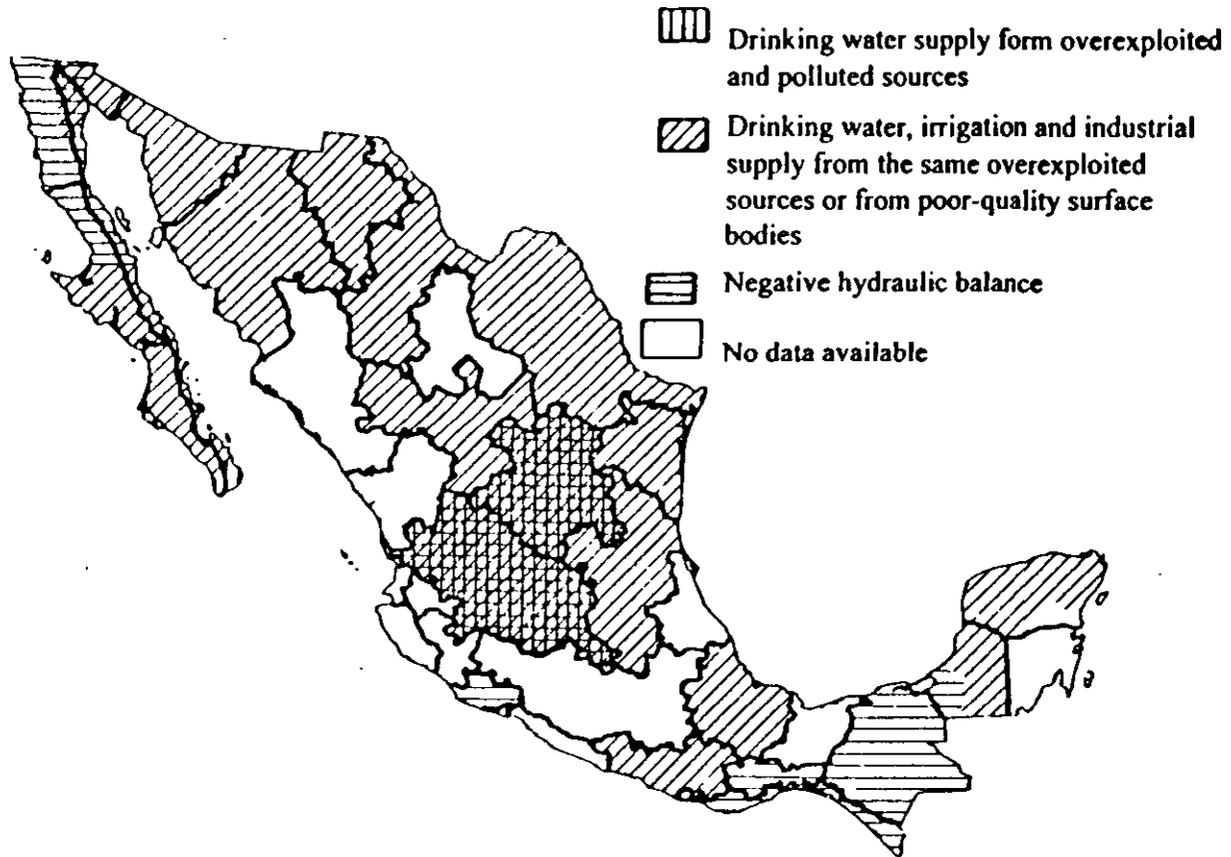
En particular, con la información analizada, se concluye que para México las medidas por adoptar en forma constante, efectiva y urgente para mejorar la calidad del agua para en consumo human son: protección a las fuentes de abastecimiento y



Map 4. Regions where conflicts arise due to shortage, quality problems and uses of water supplies



Map 5. Status of overexploited aquifers, taking into account water quality problems



22

Map 5. Status of overexploited aquifers, talking into account water quality problems

desinfección; para evitar los efectos negativos por el empleo de agua contaminada en riego se requiere: información a los agricultores del estado del agua para que adopten medidas de protección durante el riego y en su vida diaria y de restricción de riego de cultivos de consumo crudo con este tipo de agua.

Al confirmar que son los acuíferos los cuerpos que tienen mejor calidad del agua, aunado a la visualización de los problemas de sobreexplotación que sufren en muchas regiones, se reconoce que se debe cambiar el patrón de consumo cuando se comparten la fuente de suministro el riego, la industria y los municipios. El objetivo es dejar el agua subterránea (de mejor calidad) para consumo humano. Es importante destacar que la agricultura (que tiene eficiencias de empleo del agua de 50% y que usa el 76% del agua extraída del subsuelo) y la industria (que tiene capacidad para pagar el acondicionamiento del agua) son quienes más debieran desarrollar programas de uso eficiente y de reúso.

Además conociendo los problemas del país, (elevado índice de enfermedades diarreicas) el índice desarrollado representa la situación general del país por lo que se concluye que las actividades debieran orientarse a atacar, en primer lugar el problema microbiológico de contaminación antes de atender otros problemas que al ir copiando normatividad y programas de otros países se han vuelto menester prioritario en el país.

Por último, en cuanto al método desarrollado se concluye que éste permite, a partir de la información disponible, establecer prioridades para un manejo integral del acuífero. Incluso puede ser fácilmente adaptado a las condiciones de otro país con sencillas modificaciones, para ello basta consultar la normatividad respectiva para introducirla en la base de datos, o incluso, en caso de no tener criterios para el uso, emplear los aquí propuestos.

BIBLIOGRAFÍA

Horton, R.K. 1965. "An Index Number System for Rating Water Quality", *Journal of Water Pollution Central Federation*, Vol. 37.

Dinius, S. H. 1987. "Design of an index of water quality", *Water Resources Bulletin* Vol. 23 No. 5, pp. 833-843.

Landwehr, J.M. 1979. "A Statistical view of a class of Water Quality indices", *Water Resources Research*, Vol. 15 no. 2, pp. 460-468.

Jiménez, B y Ramos J. 1995. "Estudio de la Disponibilidad de Agua en México en Función del Uso, Calidad y Cantidad", Vol. 1 y 2. Elaborado para la Comisión Nacional del Agua, proyecto 3320 Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.

Crabtree R., Cluckie D., Forster C. 1987. "Percentile estimation for Water Quality Data". *Water Research* Vol. 21 No. 5 pp. 583-590.

Postel S., 1992. "Last Oasis, Facing Water Scarcity" WW. Norton & Company, 191 pp.

Disponibilidad del Agua en México en Función de la Cantidad, Calidad y Usos

Blanca Jiménez Cisneros

INTRODUCCIÓN

México dispone de 5125 m³/hab. por año y de acuerdo con Postel (1992) no se clasifica como un país con escasez (2000 m³/hab por año). Sin embargo, México como muchos otros países, sufre de escasez severa en varias cuencas hidrológicas debido a dos factores: a) el deterioro de la calidad, el cual limita el empleo del agua y, b) el defasamiento espacial y temporal entre la oferta y la demanda. En este trabajo aborda el primer problema y se plantea una metodología para calcular la disponibilidad en términos de su cantidad y la calidad.

El índice de disponibilidad (*ID*) consta de dos términos (a, b), donde el primero refleja la cantidad y el segundo el grado de tratamiento requerido por un agua para darle el uso deseado en función de su calidad. El parámetro b, se evalúa con ayuda de otro índice denominado Potencial de Uso (*PU*) que mide qué tanto y por qué se aleja el agua de la calidad deseada.

Al emplear el *ID* fácilmente se observa cómo se modifica la disponibilidad del agua obtenida a partir de los balances hidráulicos y se tiene una idea clara de las necesidades de tratamiento por región hidrológica para un uso dado. Adicionalmente, al calcular el índice de Potencial de Uso se logran identificar algunos problemas generados por los conflictos entre la cantidad y la calidad para ciertos fines.

Además, la metodología propuesta para el cálculo del *PU* tiene la ventaja de no requerir datos de parámetros predeterminados, iguales para todo el país o región, con periodos largos y uniformes de muestreo. El cálculo del índice es sencillo, lo que hace a la metodología muy útil para países en desarrollo.

ANTECEDENTES

Para preservar el agua en cantidad y calidad es necesario conocer cuánta agua hay, cómo se usa y en qué estado se encuentra. De esta información derivan las políticas de administración, las necesidades de infraestructura de tratamiento y las de importación de agua de una cuenca a otra, cuando en la zona no hay suficiente o es de mala calidad.

Durante la década de los 60's se hicieron muchos esfuerzos para clasificar los cuerpos de agua de acuerdo con su calidad en una forma ágil y confiable. Este fue el origen de los denominados "Índices de Calidad" (Horton, 1965, Landwehr, 1979 y Crabtree *et al.*, 1987).

En general, estos índices se caracterizan por emplear un número limitado y específico de parámetros, combinándolos entre ellos sin ningún sustento físico, químico o biológico. La dificultad de aplicarlos en forma universal para representar problemas prácticos hizo que hoy en día estén casi abandonados. A pesar de ello, y sobre todo en países donde la falta de infraestructura y programas de saneamiento ha deteriorado la calidad de muchos cuerpos de agua, es todavía necesario contar con un método para evaluar la cantidad disponible de agua tomando en cuenta su calidad. Los métodos de administración del agua empleados en países avanzados requieren una gran cantidad de datos, la medición de los mismos parámetros en todo el territorio así como frecuencias uniformes de muestreo durante periodos prolongados. Emplean además complejos modelos matemáticos. Estos requerimientos son difíciles de cumplir en países en desarrollo, en los que se sigue acostumbrando establecer la disponibilidad del agua sólo en términos de su cantidad, sin tomar en cuenta que la calidad limita su empleo como desafortunadamente sucede en la práctica.

La necesidad de tener una idea clara de la disponibilidad efectiva del agua llevó a desarrollar un índice que tomara en cuenta la calidad a partir de la información disponible (Jiménez y Ramos, 1995). Este método es sencillo y ofrece un enfoque racional para el manejo del recurso de manera que en un futuro se puedan emplear modelos matemáticos más completos y de mayor precisión

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE DISPONIBILIDAD

El índice de disponibilidad para un determinado uso se define como

$$ID = (a, b) \quad (1)$$

donde

- a:** cantidad de agua renovable para una región hidrológica.
- b:** clasificación del agua según el tratamiento requerido para adecuar su calidad al uso que se le pretende dar.

Para calcular "a" se emplea la ecuación de balance que se basa en la figura 1

$$S(i) = \sum_j S_j(i-1) + T(i-1) + CP(i) - \sum_k D_k(i) - T(i) + \sum_k R_k(i) \quad (2)$$

donde

(i) : designa la región en estudio;

$(i-1)$: las regiones cuyas descargas ingresan a la región (i) ;

$S(i)$: el excedente de volumen disponible en la región (i)

$T(i-1)$: Transformaciones certificadas de volúmenes de agua desde otras regiones a la región (i) ;

$CP(i)$: el volumen que ingresa por cuenca propia a la región (i)

$T(i)$: Transferencias desde la región (i) hacia otras regiones debidos a compromisos contraídos;

$D_k(i)$: las demandas para el uso k en la región (i) ;

$R_k(i)$: los retornos correspondientes al uso k en la región (i) .

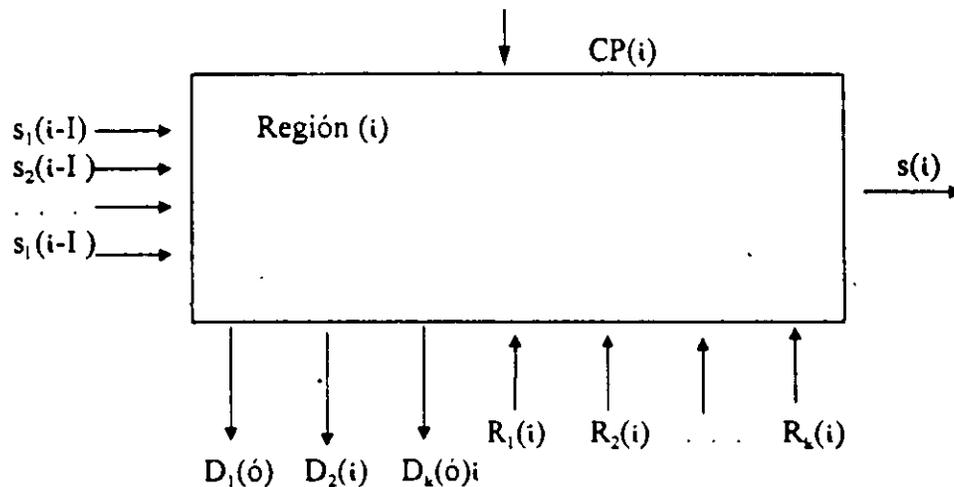


Figura 1. Diagrama para el balance hidráulico

En el manejo de la ecuación (2) se debe considerar que:

- ✓ Se aplica de aguas arriba a aguas abajo, de tal forma que en la primera región ($i = 1$) se tiene que $S(i - 1) = 0$.
- ✓ Las demandas para generación hidroeléctrica no se incluyen, dado que para ese caso $D_k(1) = R_k(1) \forall K$
- ✓ En el término $CP(i)$ se incluye el escurrimiento superficial y la recarga de los acuíferos generada por la lluvia; cuando existen embalses en la región, se resta la evaporación neta (evaporación menos lluvia).
- ✓ En muchas ocasiones, los volúmenes de demanda y de retorno no se miden directamente por lo que se estiman a partir de las láminas de riego y dotaciones por habitante, en el primer caso, y de porcentajes de retorno, en el segundo.

De acuerdo con la ecuación (2) la disponibilidad relativa del agua, en términos de la cantidad, puede expresarse como:

$$Pa(i) = \frac{S(i) + \sum_k D_k(i)}{D_k(i)} \quad (3)$$

De tal forma que

Si $Pa(i) \geq 1.4$ la disponibilidad es abundante y $a = 1$

Si $0.7 \leq Pa(i) < 1.4$ la disponibilidad está en equilibrio con las demandas y $a = 2$

$Pa(i) < 0.7$ la disponibilidad es escasa y $a = 3$

La ecuación de balance (2) se aplica para promedios anuales, y no considera las variaciones dentro del año ni la posibilidad de que se presenten periodos de sequia, por lo que los valores límite (1.4 y 0.7) podrían modificarse en función de la capacidad de almacenamiento disponible en la región y la variabilidad interanual de las lluvias.

Para calcular el término "b1" del índice de disponibilidad *ID2*, primero se determina el índice de Potencial de Uso (*PU*)³, con ayuda de una simple hoja de cálculo.

En ella se tiene almacenados los valores de los diversos parámetros que la normatividad establece para definir la calidad requerida para un uso determinado. El cálculo del *PU* se basa en comparar los valores de cada parámetro *I* medido en una región *PM(I)* con lo establecido por la norma *PN(I)*⁴, para obtener un valor *RN(I)* el cual mide que tanto se aleja uno de otro de acuerdo con

$$PM(I) \leq PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ establece un máximo admisible} \Rightarrow RN(I) = 1 \quad (4)$$

$$PM(I) > PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ establece un máximo admisible} \Rightarrow RN(I) = PM(I) / PN(I) \quad (5)$$

$$PM(I) \leq PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ es un mínimo admisible} \Rightarrow RN(I) = PN(I) / PM(I) \quad (6)$$

$$PM(I) > PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ es un mínimo admisible} \Rightarrow RN(I) = 1 \quad (7)$$

$$PM(I) > 0 \text{ y } PN(I) \text{ debe ser ausente (cero)} \Rightarrow RN(I) = PM(I) \quad (8)$$

La Tabla 1, contiene algunos ejemplos de la aplicación del cálculo de *RN(I)*.

Tabla 1. Ejemplos del cálculo de *RN(I)*

Parámetro	Valor promedio medido	Valor en norma <i>RN(I)</i>	Condición aplicada	Valor de <i>RN(I)</i>
As	0.02 mg/L	Máximo de 0.05 mg/L	$PM(I) \leq PN(I)$	1
As	0.2 mg/L	máximo de 0.05 mg/L	$PM(I) > PN(I)$	$\frac{PM(I)}{PN(I)} = \frac{0.2}{0.05} = 4$
O ₂	2 mg/L	mínimo de 4 mg/L	$PM(I) \leq PN(I)$	$\frac{PN(I)}{PM(I)} = \frac{4}{2} = 2$
O ₂	6 mg/L	mínimo de 4 mg/L	$PM(I) > PN(I)$	1
Grasas y aceites	10 mg/L	ausente	$PM(I) > 0$ y $PN(I) = 0$	10

El PU se obtiene a partir de los valores de $RN(I)$ calculados de acuerdo con:

$$PU = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RN(I)_i \quad (9)$$

donde

n : número de parámetros medidos en una región

Cabe mencionar, que por un lado el método permite variar n , (número y tipo de parámetros) de manera que se consideren criterios federales, la legislación local, o bien, los parámetros de interés para un análisis específico y, por otro, que su valor no necesariamente es igual al total de parámetros que establece una norma.

Al calcular el PU se tienen dos posibilidades

- a) $PU = 1$ Implica que a partir de la información disponible el agua es apta para el uso que se le pretende dar.
- b) $PU > 1$ Indica que el agua no cumple con los criterios de calidad y mientras mayor sea su valor más se aleja de las condiciones deseadas.

Durante el cálculo del PU , el programa desarrollado destaca aquellos parámetros por los cuales el PU se aleja de 1 así como los parámetros para los cuales $RN(I)$ es >1 .

Esto permite evaluar si existen problemas específicos, aún cuando el promedio sea cercano o igual a 1. Además, con esta información se puede establecer si es posible controlar el problema mediante tratamiento del agua. A partir de este razonamiento se asigna un valor al término " b " como sigue

$b = 1$, si el agua cumple con la calidad requerida tal como está ($PU = 1$) y por tanto no requiere tratamiento.

$b = 2$, si el tratamiento requerido es simple y económico (filtración por ejemplo), en función de los parámetros que hacen que el PU se aleje de 1.

$b = 3$, si se requiere un proceso de tratamiento costoso (ósmosis inversa por ejemplo), en función de los parámetros que determinen que el PU sea >1 .

Finalmente, se establece los valores posibles del ID en función de a y b , de acuerdo con la Tabla 2.

Tabla 2. Índice de disponibilidad (ID)
basado en la cantidad, calidad y uso del agua

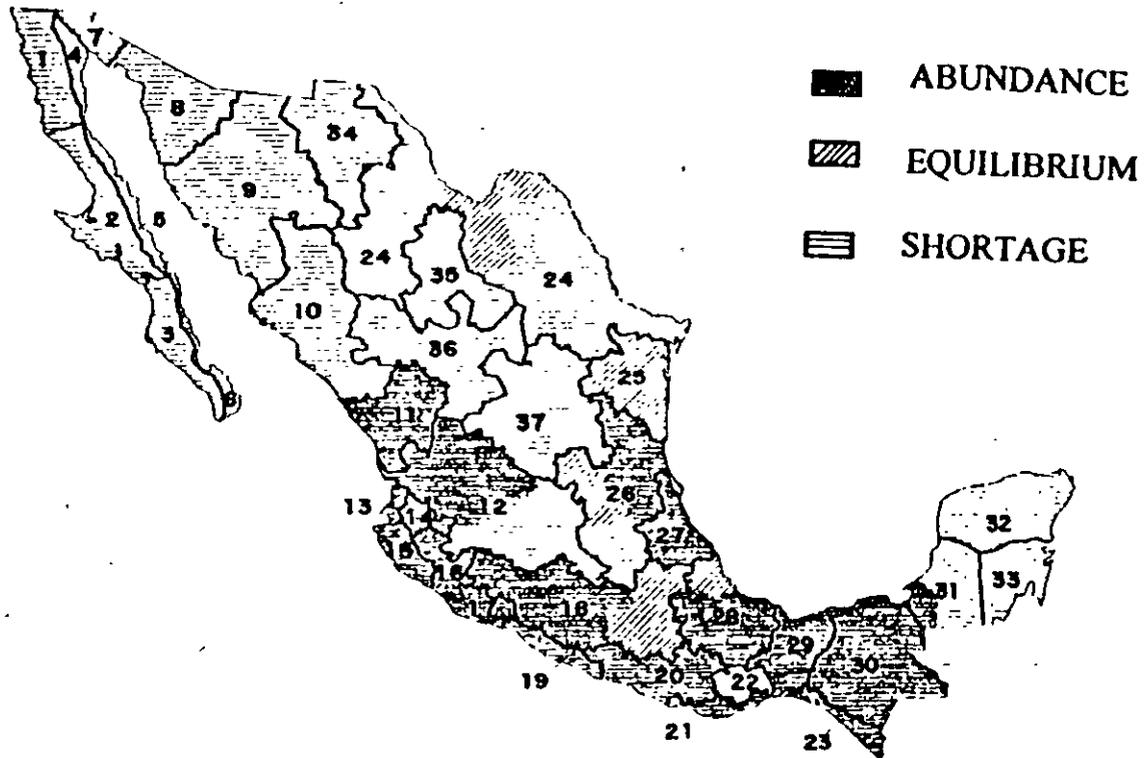
Cantidad (a)	Calidad (b)		
	Buena	Requiere tratamiento simple y económico	Requiere tratamiento costoso
	1	2	3
1 (Abundante)	11	12	13
2 (Equilibrio)	21	22	23
3 (Escasez)	31	32	33

Las principales limitaciones en la calidad del agua corresponden a los casos situados en la última columna de la Tabla 2. Para el nivel (1,3) lo más fácil puede ser cambiar de fuente de abastecimiento, dado que hay abundancia de agua, mientras que para los niveles (2,3) y (3,3) se debe evaluar la factibilidad económica de aplicar un tratamiento costoso contra importar agua de otra cuenca.

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DE MÉXICO

México se divide en 37 regiones hidrológicas en las cuales al utilizar la ecuación 2 se obtiene la distribución del recurso del Mapa 1. Este mapa muestra que en varias regiones del norte del país el agua es escasa mientras que al sur hay abundancia.

Para evaluar la calidad se calculó el Índice de Potencial de Uso, PU , para cada región empleando para ello los datos de la Red Nacional de Monitoreo y los Criterios Ecológicos de Uso del Agua (Diario Oficial de diciembre de 1989) que, sin tener carácter obligatorio, se emplean en México para clasificar el posible uso del agua según su calidad. Estos criterios toman en cuenta los usos y número de parámetros de la Tabla 3.

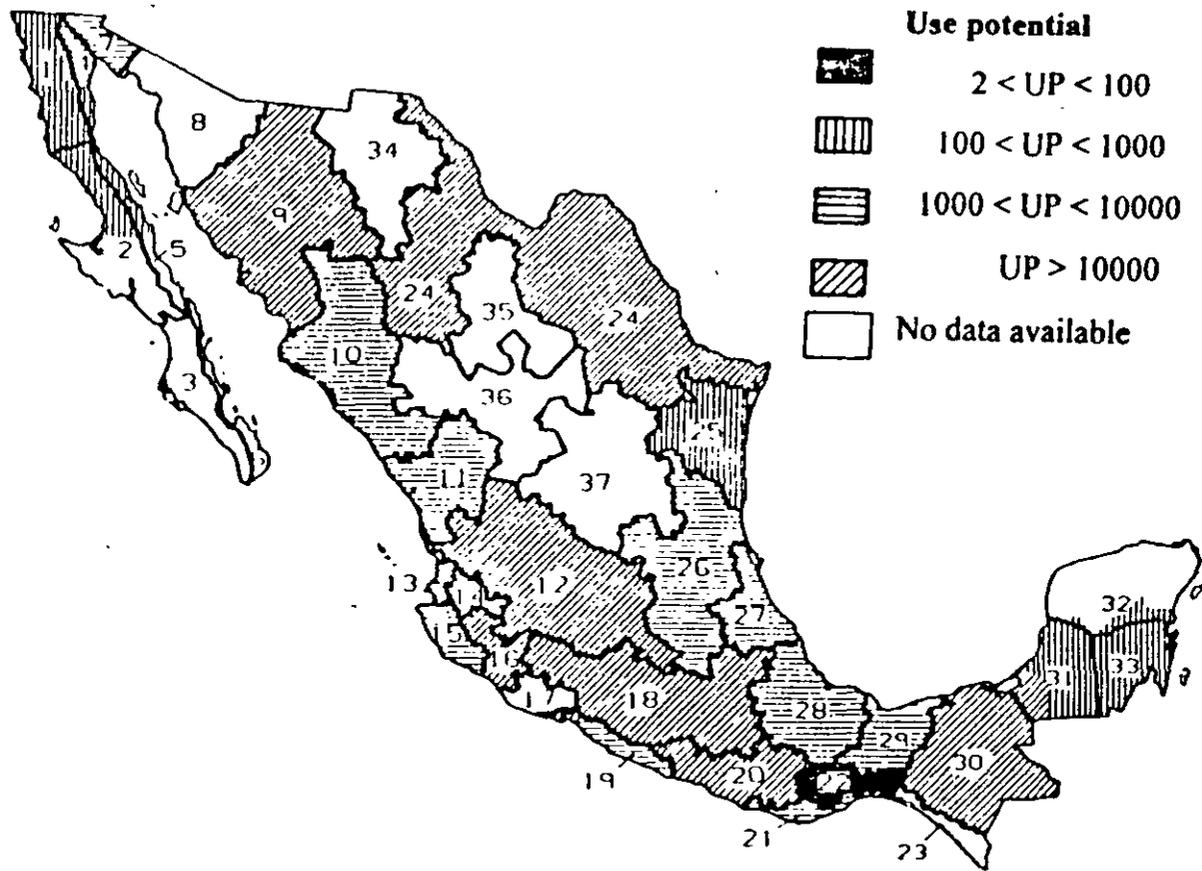


Map 1. Hydraulic Balance for Mexican Hydrological Regions

Tabla 3. Usos y número de parámetros que se establecen en los Criterios Ecológicos de Uso del Agua (Diario Oficial de la Federación del 13 de diciembre de 1989)

U s o		No. de Parámetros
Fuente de abastecimiento de agua potable		113
Recreativo con contacto primario		14
Riego agrícola		33
Pecuario		20
Protección de la vida acuática	Dulce	106
	Agua marina	99

Como ejemplo, el Mapa 2 muestra el valor del Potencial de Uso para abastecimiento en cuerpos de aguas superficiales. La Tabla 4 muestra los valores de "a" y "b" obtenidos en cada región a partir del Mapa 1 y de los análisis de los valores del *PU* para abastecimiento de agua potable. A continuación citaremos dos ejemplos de cálculo de "a" y "b". En la región 26 (Alto Pánuco), al calcular el *PU* se obtuvo un valor de 2 200 como resultado promedio de los valores de *RN (I)*. Entre los parámetros para los cuales *RN (I)* fue >1 destacan los coliformes fecales (CF), el mercurio (Hg) el aluminio (Al), los nitritos y el níquel (Ni) por no cumplir con el criterio de uso. La Tabla 5 muestra el valor del *RN* para cada uno de los compuestos. Del Mapa 2 se establece que en cuanto a cantidad esta región se clasifica como en "equilibrio", por tanto $a=2$, y al considerar que el tratamiento para potabilizar el agua dado los contaminantes presentados requeriría el empleo de procesos complejos se le asigna un valor a "b" de 3. Así, su uso queda limitado -a pesar de la disponibilidad en cantidad- por la posibilidad de pagar el costo de tratamiento para adecuar la calidad.



Map 2. Use potential index for water supplies in surface water

Tabla 4. Usos que se da al agua en las diferentes regiones

Región	Cantidad	"a"	PU agua consumo humano				"b"
			Superficial		Subterránea		
			valor	tipo	Valor	tipo	
01	Escasez	3	105	P04, SAAM	486	CF	3
02	Escasez	3	SD	---	SD	---	3
03	Escasez	3	SD	---	SD	---	--
04	Escasez	3	SD	---	SD	---	3
05	Escasez	3	SD	---	SD	---	3
06	Escasez	3	SD	---	6	CF	2
07	Escasez	3	2200	CF	SD	---	3
08	Escasez	3	SD	---	SD	---	--
09	Escasez	3	50730	CF	SD	---	3
10	Escasez	3	1300	CF	SD	---	3
11	Abundante	1	3130	CF	155	CF, P04	3
12	Abundante	1	77 x 104	CF, P04	128	CF	3
13	Abundante	1	4180	CF, S04, SS	SD	---	3
14	Abundante	1	4220	CF	SD	---	3
15	Abundante	1	1250	CF	380	CF	3
16	Disponibili- dad	1	13100	CF	450	CF	3
17	Abundante	1	SD	---	SD	---	--
18	Abundante	1	7 x 10 ⁹	CF, NIT	10	CF	3
19	Abundante		9650	CF, CI	1	---	3
20	Abundante	1	72930	CF	1	---	2
21	Abundante	1	2800	CF, CI	SD	---	3
22	Escasez Equilibrio	3 1	11	CI	SD	---	1
23	Abundante	1	SD	---	SD	---	--
24	Escasez	3	2 x 10 ⁷	CF, P04	SD	---	3

Tabla 4. Usos que se da al agua en las diferentes regiones

Región	Cantidad	"a"	PU agua consumo humano				"b"
			Superficial		Subterránea		
			valor	tipo	Valor	tipo	
	Equilibrio	2					
25	Equilibrio	2	190	CF, Ni, Al	SD	---	3
26	Equilibrio	2	17 x 10 ²	CF, COL, Hg, Al, NIT, Ni	SD	---	3
	Escasez	3					
27	Abundante	1'	6350	CF	SD	---	3
28	Abundante	1	5090	CF	SD	---	3
	Escasez	3					
29	Abundante	1	1660	CF, NIT, NAT	SD	---	3
30	Abundante	1	78 x 10 ⁶	CF, NIT	1	---	2
31	Escasez	3	250	CF, NIT	3	Cl, SD	3
	Abundante	1					
32	Escasez	3	SD	---	300	CF	--
33	Escasez	3	106	CF	4	SO ₄	3
34	Escasez	3	SD	---	1	---	1
35	Escasez	3	SD	---	SD	---	--
36	Escasez	3	SD	---	8	F	2
37	Escasez	3	SD	---	12	CF	2

Al: Aluminio

COL: Color

SD: Sin datos para calcularlo

As: Arsénico

F: Fluor

SD: Sólidos disueltos

B: Boro

NAT: Nitratos

SO₄: Sulfatos

CF: Coliformas fecales

Ni: Níquel

SS: Sólidos suspendidos

Cl: Cloruros

NIT: Nitritos

CO: Conductividad

PO₄: Fosfatos

Tabla 5. Parámetros que rebasaron el Criterio Ecológico para uso de los cuerpos superficiales como fuente de abastecimiento.

Parámetro	Valor del criterio mg/l	Número de veces en que se excede RN (l)
Coliformes fecales	1000 NMP/100 ml	13 900
Color aparente	75	3123
Grasas y aceites	0	10
SAAM	0.5	1.2
Aluminio	0.02	61
Fierro	0.3	2
Mercurio	0.001	500
Níquel	0.01	50

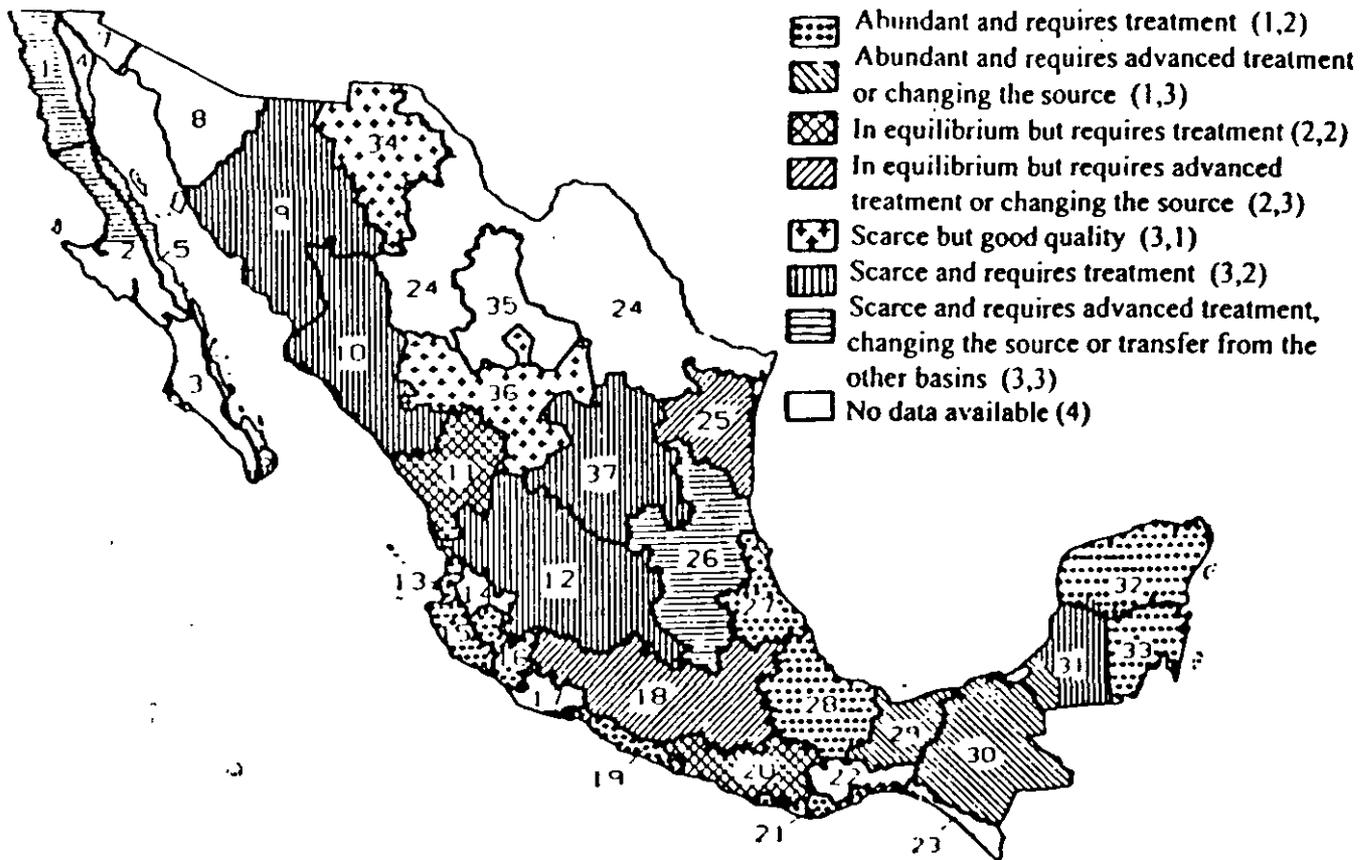
Otro ejemplo, lo constituye la región 16 (Armería Coahuayana), donde el *PU* tuvo un valor de 13 100, siendo el único parámetro que excede el Criterio de Uso de los coliformes fecales (CF). En este caso, según la Tabla 4, la región tiene disponibilidad abundante de agua y por tanto $a=1$ y dado que el tratamiento para control del problema es un simple sistema de desinfección (como puede ser la cloración) se le asigna a "b" un valor de 2.

En el Mapa 3 se muestra cómo cambia la disponibilidad del agua al considerar, tanto de la cantidad como la calidad para abastecimiento.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

De los mapas 1 y 3 se concluye, a primera vista que para algunas regiones del norte aún cuando no hay suficiente agua en algunas regiones ésta si es de calidad adecuada, mientras que en el sur -a pesar de que hay abundancia- su disponibilidad se limita por la necesidad del tratamiento.

Por otra parte, al analizar con mayor detalle la información obtenida durante el cálculo del *PU* se pudo establecer cuál es la problemática nacional en materia. La fig. 2 muestra los problemas más frecuentes en los cuerpos de agua superficiales y subterráneos para suministro. En ambos casos el problema principal lo constituye la contaminación microbiológica. Además, se puede establecer que aunque difiere mucho la cantidad de datos disponibles de los cuerpos de agua superficiales en relación con los subterráneos, sistemáticamente los primeros son de calidad notoriamente inferior a los segundos. De hecho, son muy escasos los cuerpos superficiales aptos para abastecimiento de consumo humano e incluso su disponibilidad para uso en riego es limitada. Las Figs. 3 y 4 destacan



Map 3. Availability Index (AI) for drinking water sources based on quantity and quality of water

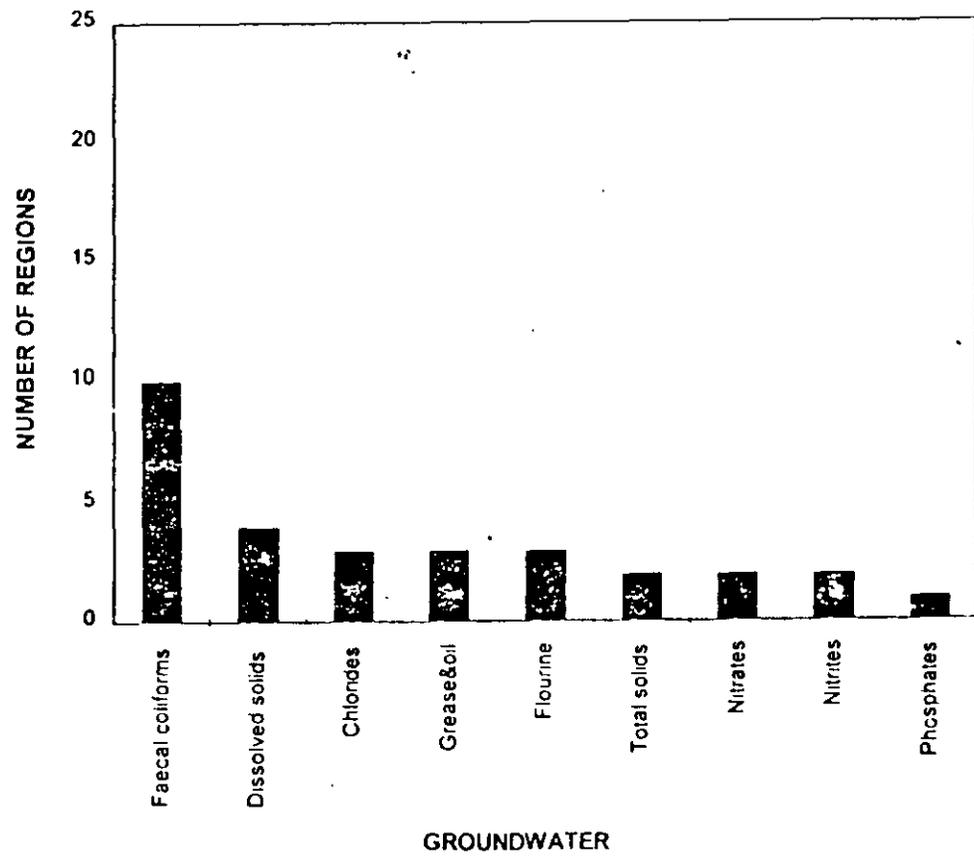
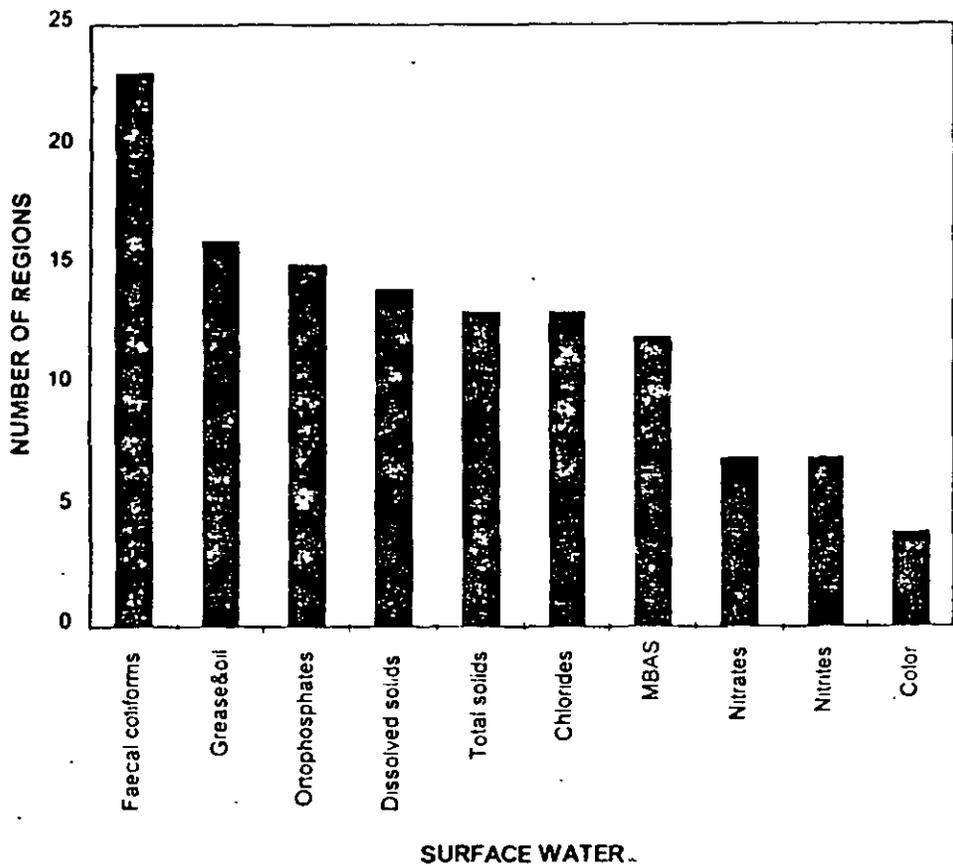


Figure 2. Parameters most frequently exceeded in surface and groundwater sources for drinking water

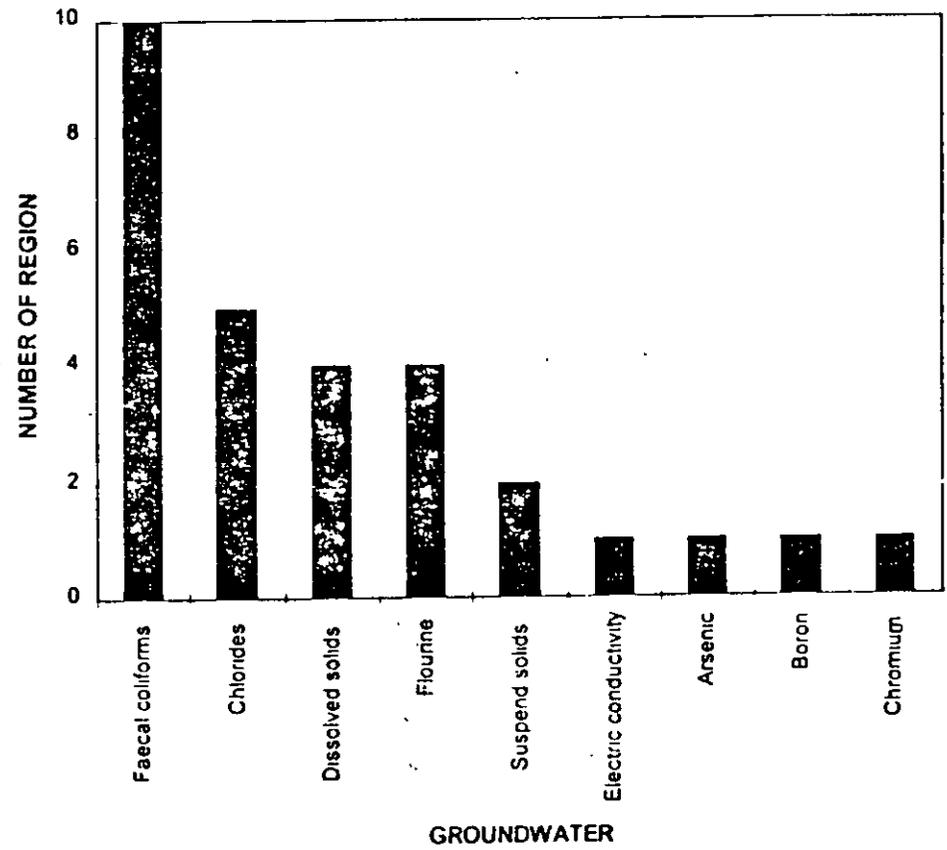
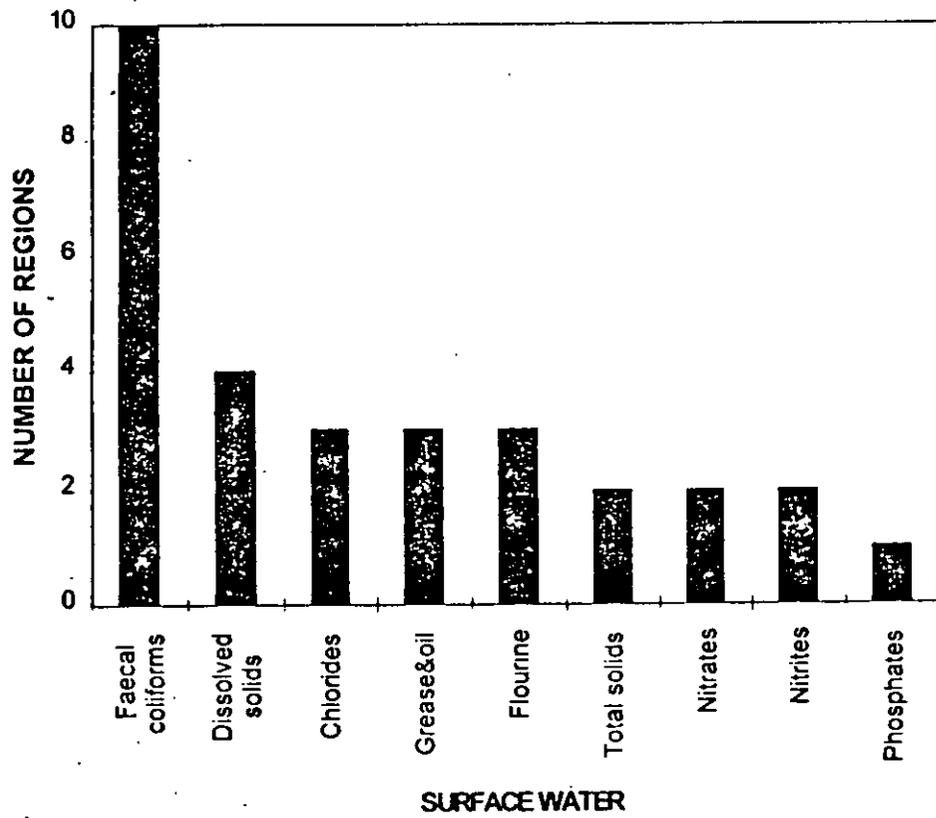


Figure 3. Parameters most frequently exceeded in surface and groundwater sources for irrigation

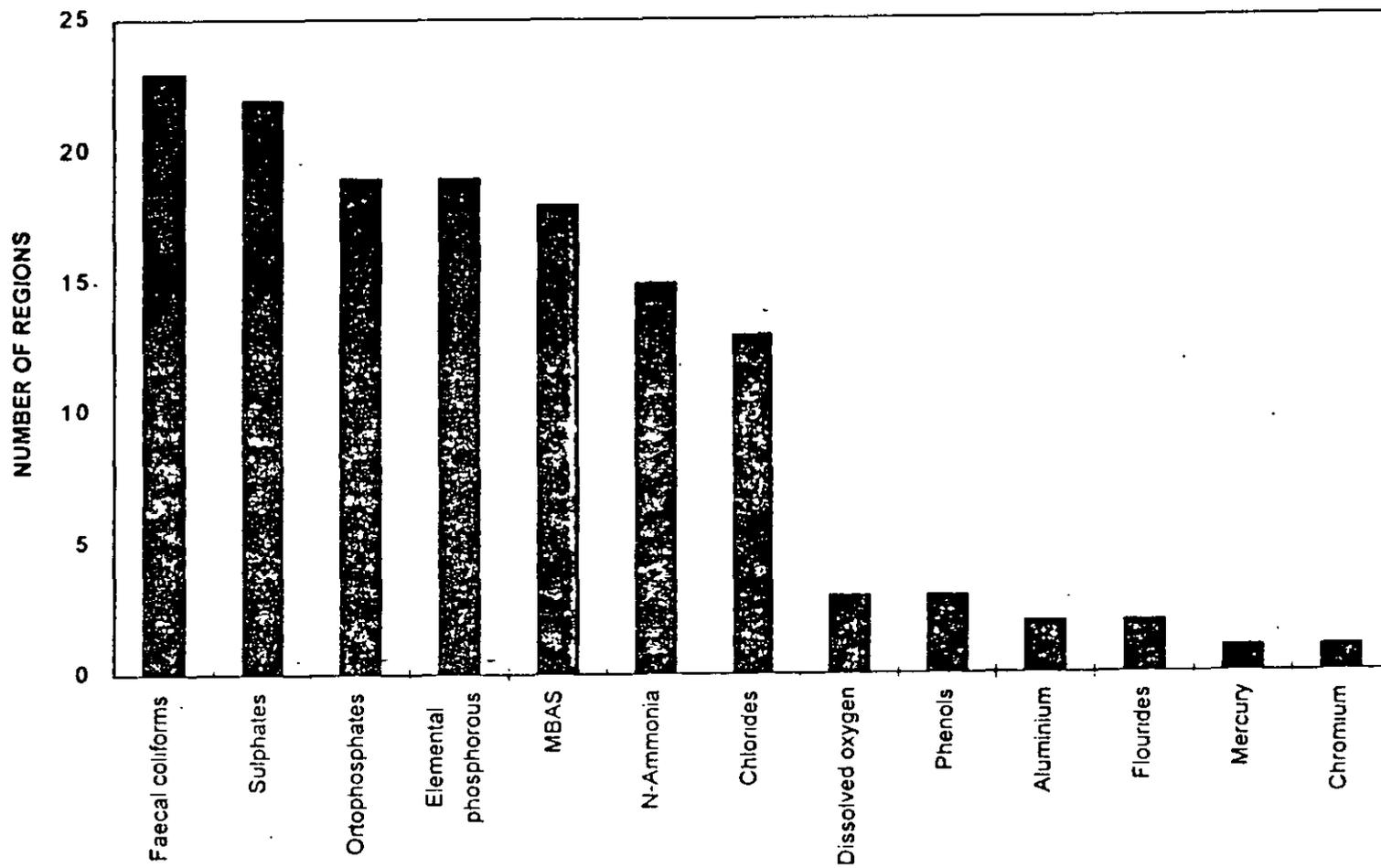


Figure 4. Parameters most frequently exceeded in surface water sources for aquatic life protection

los parámetros que limitan la disponibilidad del agua para uso agrícola y protección ecológica de la vida acuática; nuevamente el problema principal es de tipo microbiológico.

Para evaluar el problema del agua a nivel país se efectuó, a partir de los índices desarrollado y el análisis de los principales usos del agua por región, varios mapas que combinan diversa información. El Mapa 4 contiene las regiones con escasez de agua y, donde además existe problema de contaminación de las principales fuentes de abastecimiento para las cuales debe haber programas severos de control de la contaminación por descargas. También presenta los lugares con escasez en cantidad donde se emplea un gran volumen de agua para riego a partir de fuentes que también son empleadas con fines municipales. En esta situación, se propone motivar un ahorro de agua para fines agrícolas y liberar agua para el consumo humano. Así como, para las zonas donde hay industria y escasez, se recomienda desarrollar y/o implantar programas de reúso y reciclamiento del agua en esta actividad.

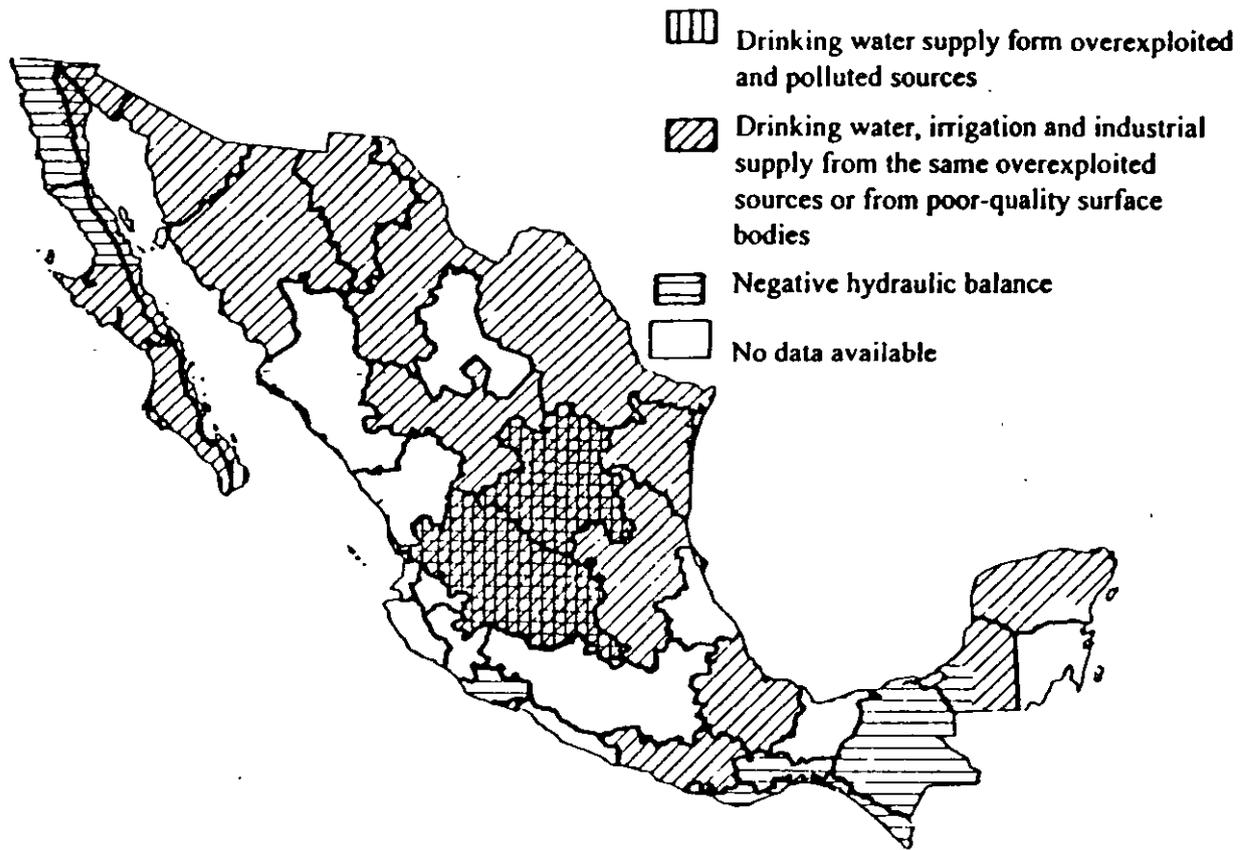
El Mapa 5 muestra la situación del agua subterránea en el país. Este mapa combina las zonas donde el abastecimiento doméstico es predominantemente de acuíferos contaminados y sobreexplotados, en los cuales se debería tomar medidas de control muy estrictas en lo que se refiere a la preservación de cantidad y calidad (control estricto de descargas y acuíferos y restricciones de permiso de explotación, etc).

Además, destaca las zonas donde se emplea agua subterránea para riego e industria y, donde el abastecimiento doméstico se hace a partir de las mismas fuentes o de cuerpos superficiales de mala calidad. Si lo anterior se conjunta con acuíferos sobreexplotados, se concluye la necesidad de desarrollar e implantar programas específicos de uso eficiente. En este mapa también se señalan las regiones donde se requiere conocer el balance hidráulico del acuífero.

CONCLUSIONES

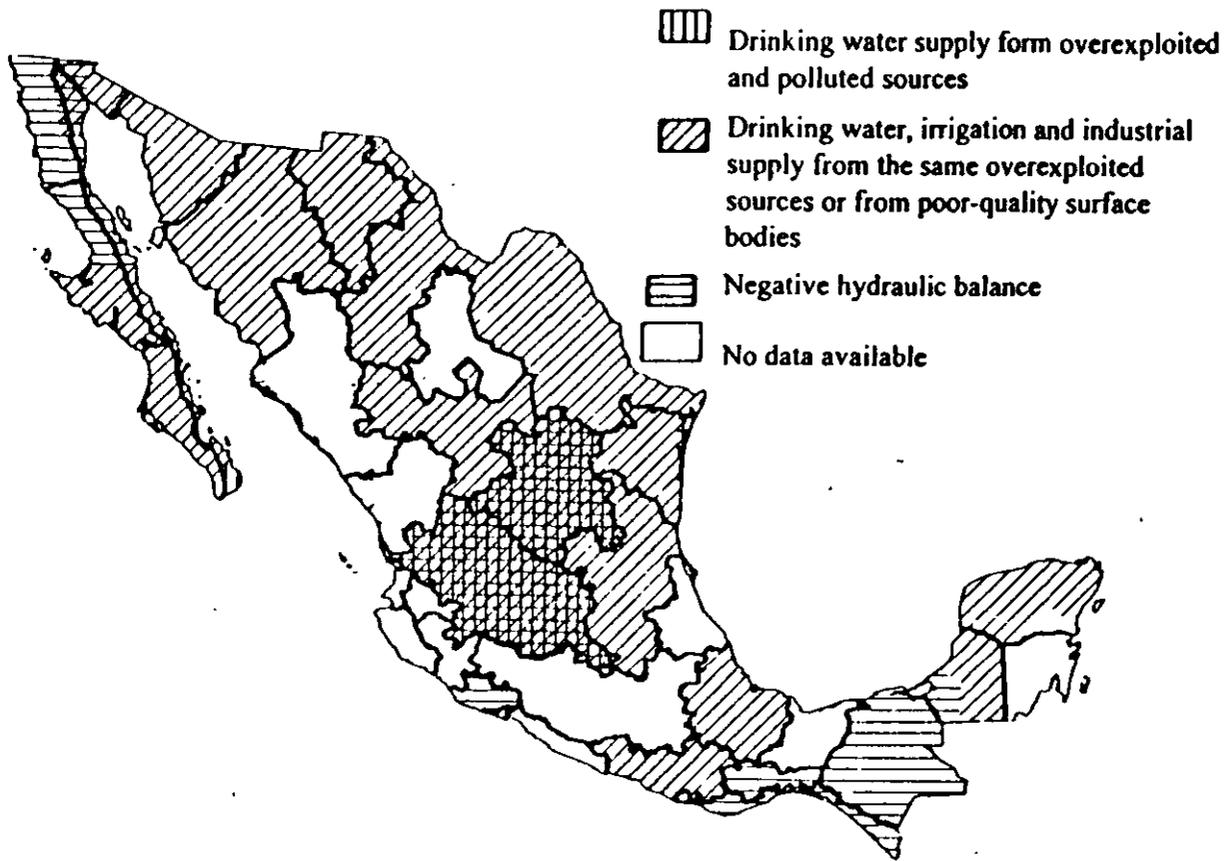
En general, los resultados de este trabajo permiten un planteamiento del problema global de la cantidad y calidad del agua en México de manera que se puede contribuir a formular una política ordenada del aprovechamiento y uso racional del agua. En efecto, al establecer dónde y cuáles son los principales problemas de contaminación del agua así como cuáles son los conflictos cantidad-calidad-uso se puede definir una jerarquización para atender los problemas. Esta información no es posible obtenerla a partir de los balances hidráulicos regionales o de los mapas tradicionales de contaminación en (Demanda Biológica de Oxígeno pero si Demanda Química de Oxígeno), del *PU* y del *ID* se pueden derivar.

En particular, con la información analizada, se concluye que para México las medidas por adoptar en forma constante, efectiva y urgente para mejorar la calidad del agua para en consumo humano son: protección a las fuentes de abastecimiento y



43

Map 5. Status of overexploited aquifers, taking into account water quality problems



44

Map 5. Status of overexploited aquifers, talking into account water quality problems

desinfección; para evitar los efectos negativos por el empleo de agua contaminada en riego se requiere: información a los agricultores del estado del agua para que adopten medidas de protección durante el riego y en su vida diaria y de restricción de riego de cultivos de consumo crudo con este tipo de agua.

Al confirmar que son los acuíferos los cuerpos que tienen mejor calidad del agua, aunado a la visualización de los problemas de sobreexplotación que sufren en muchas regiones, se reconoce que se debe cambiar el patrón de consumo cuando se comparten la fuente de suministro el riego, la industria y los municipios. El objetivo es dejar el agua subterránea (de mejor calidad) para consumo humano. Es importante destacar que la agricultura (que tiene eficiencias de empleo del agua de 50% y que usa el 76% del agua extraída del subsuelo) y la industria (que tiene capacidad para pagar el acondicionamiento del agua) son quienes más debieran desarrollar programas de uso eficiente y de reúso.

Además conociendo los problemas del país, (elevado índice de enfermedades diarreicas) el índice desarrollado representa la situación general del país por lo que se concluye que las actividades debieran orientarse a atacar, en primer lugar el problema microbiológico de contaminación antes de atender otros problemas que al ir copiando normatividad y programas de otros países se han vuelto menester prioritario en el país.

Por último, en cuanto al método desarrollado se concluye que éste permite, a partir de la información disponible, establecer prioridades para un manejo integral del acuífero. Incluso puede ser fácilmente adaptado a las condiciones de otro país con sencillas modificaciones, para ello basta consultar la normatividad respectiva para introducirla en la base de datos, o incluso, en caso de no tener criterios para el uso, emplear los aquí propuestos.

BIBLIOGRAFÍA

Horton, R.K. 1965. "An Index Number System for Rating Water Quality", *Journal of Water Pollution Central Federation*, Vol. 37.

Dinius, S. H. 1987. "Design of an index of water quality", *Water Resources Bulletin* Vol. 23 No. 5, pp. 833-843.

Landwehr, J.M. 1979. "A Statistical view of a class of Water Quality indices", *Water Resources Research*, Vol 15 no. 2, pp. 460-468.

Jiménez, B y Ramos J. 1995. "Estudio de la Disponibilidad de Agua en México en Función del Uso, Calidad y Cantidad", Vol. 1 y 2. Elaborado para la Comisión Nacional del Agua, proyecto 3320 Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.

Crabtree R., Cluckie D., Forster C. 1987. "Percentile estimation for Water Quality Data". *Water Research* Vol. 21 No. 5 pp. 583-590.

Postel S., 1992. "Last Oasis, Facing Water Scarcity" WW. Norton & Company, 191 pp.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

**MÓDULO II:
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**TEMA :
CALIDAD DEL AGUA EN MÉXICO**

**DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE – OCTUBRE 1999**

CALIDAD DEL AGUA EN MEXICO

DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS

1. INTRODUCCION

Existen aproximadamente 1'458,000,000 km³ de agua en la Tierra de los cuales el 93% es salada, el 2% se encuentra congelada en los polos y sólo una pequeña parte está disponible a nuestras necesidades.

La renovación natural del recurso agua se realiza a través del ciclo hidrológico, en el cual del 100% de la precipitación, 28% cae en la tierra y 72% en el mar.

- Del 28 % que cae:

- * 7% se percola a los acuíferos
- * 8% va al mar por escurrimientos y el
- * 13% restante, regresa a la atmósfera por evaporación (de los cuerpos de agua superficiales) y evapotranspiración (de la cubierta vegetal).

Aparte de las condiciones climáticas, la distribución y abundancia del recurso en el Mundo depende de la geología, orografía, tipo de suelo y cubierta vegetal. El resultado es que la distribución mundial del agua útil es muy desigual. Por si fuese poco, la carencia de infraestructura adecuada para el aprovechamiento del agua acrecenta las diferencias. En efecto, mientras 3 400 millones de personas cuentan con una dotación de apenas 50 L/d (se considera que el requerimiento para las necesidades básicas oscila entre 20 y 50 L) en países desarrollados el consumo puede fácilmente sobrepasar los 400 L/hab.d

2. DISPONIBILIDAD

La disponibilidad del agua tiene que ver no sólo con la cantidad, también es criterio que la calidad sea acorde con el uso que se persigue. En la antigüedad, la calidad del agua se calificaba sólo por su aspecto, sabor y olor. Actualmente los avances científico-técnicos han repercutido en técnicas analíticas y procesos capaces de identificar y de remover una amplia lista de contaminantes, a grado tal, que es posible lograr la calidad "potable" con la depuración de aguas residuales. Sin embargo, tales conocimientos aún no se plasman en una aplicación generalizada de instalaciones industriales o municipales suficientes y eficientes ni tampoco en políticas integrales que busquen:

- La conservación del recurso (agua superficial y subterránea),
- La preservación de su calidad,
- Su uso eficiente (Reuso, ahorro y recirculación del agua).

queda aún mucho por lograr en términos de la calidad tanto en el Tercer Mundo como en los países desarrollados, sin duda, con matices diferentes. En el sentido más amplio, los retos para el próximo siglo abarcan desde el suministro de agua microbiológicamente aceptable hasta el desarrollo de sofisticadas técnicas de control para contaminantes complejos y de daño a largo plazo.

2.1 Cantidad y calidad del agua en México

México cuenta 5,125 m³ de agua renovable/hab.año, cifra que no da mucha información. En cambio, el índice de escasez que considera la disponibilidad en términos de sus usos sitúa al país en un nivel de **disponibilidad comprometida por su distribución temporal y espacial así como por problemas de contaminación**. Este índice refleja sin duda la situación que vivimos. El MAPA 1 muestra la disponibilidad del agua superficial como lo calcula la CNA para las regiones hidrológicas en que se divide al país.

La FIG 1 muestra como se explota el agua subterránea y la superficial para los diversos fines. El empleo de acuíferos representa el 27 % de la extracción total y es muy notorio que el sector que más la emplea es el riego (76 % del total). Normalmente, este tipo de agua es considerado de muy alta calidad y se prefiere preservar para el consumo humano. Sobre todo, cabría cuestionarse que use tanta agua de buena calidad para riego con eficiencias muy bajas (del orden del 50 %).

Las aguas superficiales son por lo general menos duras, tienen mayor concentración de oxígeno (que ayuda a la eliminación de Fe y Mn) y no contienen ácido sulfhídrico. En contrapartida, son fácilmente contaminables, tienen alta actividad biológica, color y turbiedad, sólidos en suspensión y flotantes. Su calidad varía en épocas de avenidas y tienen mayor probabilidad de contener materia orgánica que favorecerá la formación de organoclorados durante la desinfección con cloro.

El agua subterránea, por encontrarse protegida, es de calidad más uniforme, el contenido de color y compuestos orgánicos es bajo y no es corrosiva. Sus desventajas principales son su accesibilidad, el contenido de H₂S y que generalmente es dura aunque poco corrosiva. En ocasiones puede además contener por disolución del medio en el que está contenida, metales pesados.

Las aguas subterráneas, comparadas con las aguas superficiales contienen sólidos disueltos, cloruros, alcalinidad, dureza y nitratos. Sin embargo, se caracterizan por tener concentraciones menores de color, turbiedad, nitrógeno amoniacal, DBO, coliformes, sólidos coloidales y sólidos suspendidos.

3. CONTAMINACION DEL AGUA

3.1 Conceptos generales

El agua tiene una composición precisa (H_2O), y por lo tanto es fácil identificar los compuestos ajenos a ella. Sin embargo, la definición de sus contaminantes se dificulta. Es un hecho que el agua rara vez se encuentra en forma pura. En general, se considera como contaminante al exceso de materia o energía (calor) que provoque daño a los humanos, animales, plantas y bienes, o bien, que perturbe negativamente las actividades que normalmente se desarrollan cerca o dentro del agua. De esta forma, la definición de contaminación del agua queda íntimamente ligada al uso al cual se le destina.

A pesar de la dificultad en la definición, es claro que el exceso de contaminación en un cuerpo de agua provoca el abatimiento de oxígeno, la muerte y descomposición de la flora y fauna, impide su uso en industrias o ciudades y deteriora el paisaje. El origen de la contaminación son los desechos urbanos e industriales, los drenados de la agricultura y de minas, la erosión, los derrames de sustancias tóxicas, los efluentes de plantas depuradoras, los lodos de potabilizadoras, la ruptura de drenajes, el lavado de la atmósfera, etc.

Como se puede observar, el problema del agua es complejo: para poder hacer uso de ella se requiere exista tanto en la calidad adecuada como en la cantidad suficiente durante un período determinado y en una época del año definida.

Los usos que se pueden dar al agua son muchos y se clasifican en:

- 1) Consumo humano (bebida, cocina y procesamiento de alimentos)
- 2) Limpieza personal
- 3) Cultivo de peces, mariscos o cualquier otro tipo de vida acuática
- 4) Agricultura
- 5) Industria
- 6) Usos municipales (riego de jardines, lavado de coches, fuentes de ornato, lavado de calles e instalaciones públicas)
- 7) Usos recreativos (natación, velleo, etc.)
- 8) Transporte de desechos

3.2 Clasificación de las descargas de contaminantes

Existen tres tipos de descargas de agua de desecho: las puntuales, las dispersas y las accidentales. Las primeras corresponden a las redes de drenaje y es posible localizarlas geográficamente y cuantificarlas y caracterizarlas. Las descargas puntuales se pueden controlar fácilmente ya que es posible conducir las a una planta de tratamiento o zona de reuso.

Las descargas dispersas provienen de diversos puntos y es muy difícil evaluarlas en cuanto a volumen y calidad. Las últimas, las accidentales, son prácticamente imposibles de cuantificar pues como su nombre lo indica ocurren en forma espontánea. Estas contaminan los cuerpos de agua a través de interacciones complejas entre las sustancias aplicadas o depositadas sobre el suelo y el ciclo hidrológico. Son de origen: urbano, agrícola y atmosférico.

Las de origen urbano son generadas por extensas áreas impermeables o semi-impermeables, como calles, coberturas de edificios, estacionamientos y otras, sobre las cuales se depositan residuos contaminantes generados en las ciudades. La principal descarga dispersa de origen urbano es la lluvia.

Las descargas dispersas de origen agrícola llevan implícitos procesos que ocurren entre las sustancias químicas del agua de riego y el suelo como el consumo de sustancias por organismos presentes en el terreno y liberación de metabolitos por parte de estos.

El control es muy difícil y está asociado con políticas adecuadas de cultivo y de dotación de infraestructura a los asentamientos humanos. Es decir, al desarrollo de políticas acordes de uso del agua y del suelo.

Por último, las descargas accidentales, como los derrames de PEMEX, son de control muy difícil, su estudio y estrategias para enfrentarlo deben ser determinadas a partir de estudios de simulación.

3.3 Principales contaminantes

Los componentes o impurezas que caracterizan la calidad del agua, pueden estar presentes en alguna de las siguientes tres formas:

Materia suspendida.- corresponde a moléculas suspendidas de diámetro equivalente a 1 - 100 microm

Materia disuelta.- corresponde a moléculas o iones disueltos de diámetro equivalente a 10^{-5} - 10^{-3} μ

Materia coloidal.- corresponde a materia suspendida con características, en algunos casos, similares a la materia disuelta, con diámetro equivalente a 10^{-3} - 1μ

La TABLA 1 muestra datos típicos de los constituyentes encontrados en el agua residual doméstica; dependiendo de las concentraciones constituyentes, el agua residual se clasifica como de concentración alta, media o baja.

TABLA 1 COMPOSICION TIPICA DE LAS AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN DOMESTICO

COMPUESTO	C O N C E N T R A C I O N		
	MINIMA	PROMEDIO	MAXIMO
Sólidos totales, mg/L	350	720	1200
Sólidos disueltos	250	500	850
Fijos	145	300	525
Volátiles	105	200	325
Suspendidos totales	100	220	350
Fijos	20	55	75
Volátiles	80	165	275
Sólidos sedimentables, ml/L	5	10	20
DBO5, mgO ₂ /L	110	220	400
DQO, mgO ₂ /L	250	500	1000
COT, mgC/L	80	160	290
Nitrógeno total, mgN/L	20	40	85
Orgánico	8	15	35
Amoniacal	12	25	50
Fósforo total	4	8	15
Alcalinidad mgCaCO ₃ /L	510	100	200
Grasas, mg/L	20	100	150

Adaptado de Metcalf & Eddy, Inc. 1979.

3.4 Características físicas

Entre las propiedades físicas se encuentra el color, olor, sabor, temperatura, turbiedad, contenido de sólidos y conductividad.

- **Color.** El color verdadero se define como el color producido por sustancias disueltas y se aplica para agua potable. El color aparente está dado por los sólidos en suspensión. El método que se utiliza con mayor frecuencia es el de la escala Pt-Co (platino-cobalto).

La coagulación seguida por sedimentación es el método más apropiado para la remoción del color. La dosificación del coagulante depende de la concentración inicial del color y del pH óptimo (generalmente ácido).

- **Conductividad.** La conductividad representa la capacidad de una solución para transmitir una corriente eléctrica. Su valor depende del tipo de iones involucrados, sus concentraciones, el estado de oxidación de los mismos, el porcentaje de cada uno y de la temperatura. En general, las soluciones de ácidos, bases y sales son buenos conductores pero, las de compuestos orgánicos lo son escasa o nulamente. La conductividad de electrólitos (no la metálica) es muy dependiente de la temperatura, aproximadamente $1.9\%/^{\circ}\text{C}$.

- **Olor.** Es un parámetro que proporciona información sobre el estado del agua y puede provocar rechazo por el consumidor.

- **Sabor.** El sabor al igual que el olor, tiene su origen por la presencia de minerales (metales y sales del suelo) o por productos finales de las reacciones biológicas. Los compuestos inorgánicos producen sabor pero no olor, en cambio, los orgánicos producen ambos, (Ejemplo: el petróleo y los sulfuros producto de la descomposición biológica). El sabor es un parámetro de agua potable medido por catadores.

- **Sólidos.** Se entiende por sólido todo residuo que queda después de la evaporación a 103°C . Los procesos tradicionales de eliminación de sólidos suspendidos son la desarenación, sedimentación y filtración. Para el caso especial de los sólidos suspendidos orgánicos se emplean procesos secundarios (floculación-coagulación y sistemas biológicos), los que teóricamente eliminan entre el 90 y 95% de los mismos. Los sólidos suspendidos interfieren con la desinfección del efluente, protegiendo en ellos a los organismos patógenos por lo que su correcto control implica un tratamiento terciario (coagulación-floculación después de un biológico o filtración terciaria).

Los sólidos disueltos totales (SDT) en el agua comprenden sustancias inorgánicas (calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica. Los SDT en el agua potable proceden de fuentes naturales, aguas residuales, escorrentías urbanas y desechos industriales. Las concentraciones de los SDT en el agua varían considerablemente en diferentes regiones geológicas, debido a la distinta solubilidad de los minerales.

No se dispone de datos confiables sobre los posibles efectos en la salud de la ingestión de SDT en el agua para consumo humano y no se propone un valor guía basado en criterios sanitarios. Sin embargo,

la presencia de altas concentraciones de los SDT puede causar quejas en los consumidores.

- **Temperatura.** Influye sobre las tasas de crecimiento biológico, las reacciones químicas, la solubilidad de los contaminantes o compuestos requeridos (sólidos, líquidos o gases, principalmente O_2) y en el desarrollo de la vida. Es importante recordar que en un líquido a mayor temperatura mayor solubilidad de un sólido pero menor la de un gas y esto es el motivo

por el cual la contaminación térmica acaba con la vida aerobia de un cuerpo de agua, al eliminar el oxígeno disuelto del agua. La temperatura del agua residual es generalmente más alta que en la del agua potable, debido a la adición de agua caliente procedente de casas y actividades industriales.

- **Turbiedad.** La turbiedad es el parámetro que mide qué tanto la luz es absorbida o dispersada por la materia suspendida (sedimentable y coloidal) del agua. La turbiedad no es un análisis cuantitativo de los sólidos suspendidos. En las aguas superficiales se debe en gran parte a la presencia de arcilla y otros minerales. El intervalo en tamaños de la mayor parte de estas partículas es del orden de 0.2 a 5 μ , es decir, que corresponden a una escala superior a la de los verdaderos coloides. La coagulación de estas suspensiones se realiza con relativa facilidad, una vez que se ha determinado el pH adecuado.

3.5 Características químicas

- **Acido sulfhídrico (sulfuro de hidrógeno).** El ácido sulfhídrico es un gas de olor desagradable, a huevos podridos, que se percibe incluso con concentraciones muy bajas, inferiores a 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el aire. Se forma por hidrólisis de sulfuros en el agua. Sin embargo, la concentración del ácido sulfhídrico en el agua para consumo humano se reduce debido a que los sulfuros se oxidan fácilmente en el agua aireada.

La toxicidad aguda del ácido sulfhídrico es considerable para los seres humanos cuando estos lo absorben por inhalación; hay irritación ocular con concentraciones de 15 a 30 mg/m^3 . Aunque no se dispone de datos sobre la toxicidad por vía oral, es poco probable que pueda consumirse una dosis perjudicial de ácido sulfhídrico en el agua para consumo humano. Por consiguiente, no se propone un valor guía basado en criterios sanitarios. No obstante, en el agua potable no deben ser detectables el sabor ni el olor de este compuesto.

- **Alcalinidad.** La alcalinidad expresa la capacidad que tiene un agua para mantener su pH a pesar de recibir una solución ácida o alcalina. Corresponde principalmente a los hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y NH_4^+ , siendo los más comunes los de calcio y magnesio. Cuando el agua contiene boratos, fosfatos o silicatos también son medidas por este método, de ahí que la prueba sea considerada como global. La alcalinidad se determina mediante la titulación con un ácido (H_2SO_4 , 0.02N) y el resultado se expresa como mgCaCO_3/L .

- **Carbono orgánico total.** El carbono presente en la materia orgánica se encuentra en varios estados de oxidación que reaccionan de manera diferente a la prueba de DBO o de DQO. En efecto, la DQO y DBO dependen del estado de oxidación de la materia orgánica en cambio el COT evalúa el contenido total de C. La medición se hace por liberación del carbono orgánico y su transformación en CO_2 . El CO_2 formado es detectado por infrarrojo. Se puede medir el carbono total (TC) si se incluye el contenido original de CO_2 en la muestra y sobre la fracción de COT se puede diferenciar la soluble de la no disuelta.

- **Cloro residual.** La cloración del agua de abastecimiento o de agua tratada tiene por objeto destruir o desactivar microorganismos patógenos. Un segundo efecto, importante sobretudo en agua de abastecimiento, es mejorar la calidad global por la reacción del cloro con el nitrógeno amoniacal, fierro, manganeso, sulfuros y algunos compuestos orgánicos. El cloro libre (principalmente HOCl y OCl) así como el combinado (cloraminas) se determina por la formación de un compuesto amarillo con ortotoluidina, el cual se mide a 435 o 490 nm en un espectrofotómetro. Para medir cloro residual en forma aproximada existen dispositivos muy sencillos como los empleados en albercas.

- **Cloruro.** El cloruro presente en el agua para consumo humano procede de fuentes naturales, de las aguas residuales y de los efluentes industriales, de la escorrentía urbana que contiene sales utilizadas para deshelar y de intrusiones salinas. La principal fuente de exposición humana a este compuesto es la sal agregada a las comidas, cuya ingesta es por lo general mucho mayor que la procedente del agua potable.

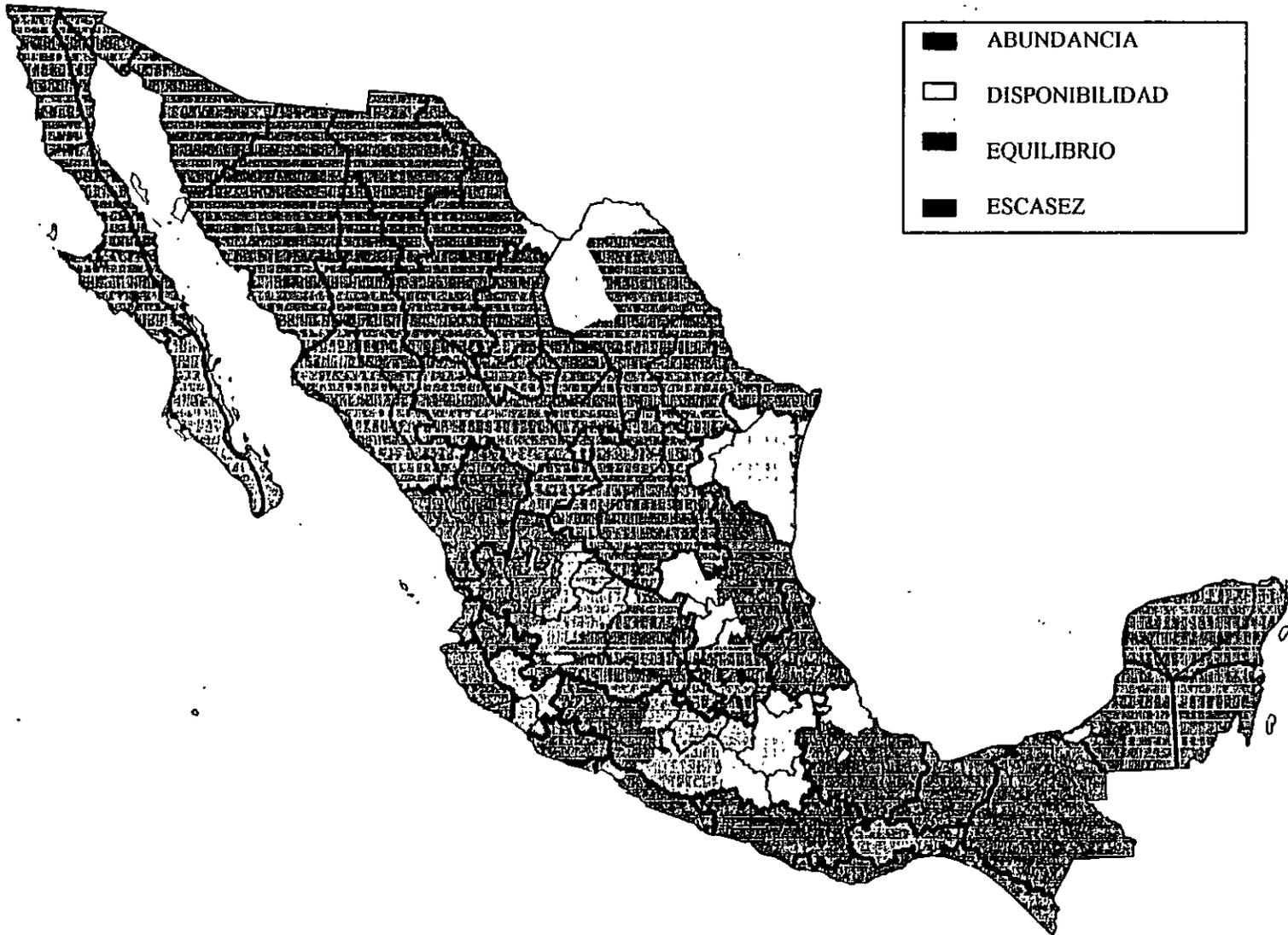
La excesiva concentración de cloruro eleva la tasa de corrosión de los metales del sistema de distribución, en función de la alcalinidad del agua y puede hacer que aumenten las concentraciones de metales en ésta.

No se propone un valor guía basado en sistemas sanitarios para el cloruro presente en agua potable. No obstante, en concentraciones superiores a 250 mg/L pueden alterar el sabor del agua.

- **Demanda biológica de oxígeno (DBO).** La demanda biológica de oxígeno es una medida de la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica en el agua a 20°C y en 5 días. Sólo evalúa la demanda ejercida por la fracción carbonada, la de los sulfuros y del ión ferroso y excluye la fracción nitrogenada. La DBO no mide un compuesto en especial sino todos los biodegradables por vía aerobia y se expresa en mgO₂/L. Un agua de calidad potable tiene una DBO promedio mensual del orden de 0.75 a 1.5 mgO₂/L, el agua residual doméstica oscila entre 200 a 300 mgO₂/L y algunos efluentes industriales de 1 a 2 g/L (rastros, ingenios, etc.).

El parámetro de la DBO es importante para el tratamiento de agua residual, los resultados DBO se utilizan para determinar:

- 1) la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente,
- 2) el tamaño de las instalaciones de tratamiento de agua residual y,
- 3) medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento.



MAPA 1 BALANCE HIDRAULICO POR REGION HIDROLOGICA

- **Demanda química de oxígeno (DQO).** Es una medida de la concentración de sustancias que en un agua pueden ser atacadas por un oxidante fuerte ($K_2Cr_2O_4$) a altas temperaturas ($\approx 700^\circ C$). La DQO no siempre guarda una relación con la DBO, aunque en general es mayor.

- **Dureza.** La dureza del agua es causada por calcio y magnesio disueltos en ella. Generalmente, se expresa por la cantidad equivalente de carbonato cálcico.

La dureza es función del pH y la alcalinidad. Una dureza superior a 200 mg/L puede dar lugar a incrustaciones, en particular en sistemas de calefacción. Las aguas blandas con una dureza inferior a unos 100 mg/L, tienen una baja capacidad de amortiguación y pueden resultar más corrosivas para las tuberías.

No se propone para la dureza un valor guía basado en criterios sanitarios. No obstante, el grado de dureza del agua puede influir en la aceptación de ésta por el consumidor, debido a sus efectos sobre el sabor y la aparición de incrustaciones.

- **Fenoles.** Los fenoles causan problemas de sabor en el agua, especialmente cuando ésta es clorada. Se producen principalmente por operaciones industriales y aparecen en el agua residual proveniente de ellas. En consecuencia, la prueba de fenoles se emplea para definir si un efluente tiene vertidos industriales. Los fenoles pueden ser biológicamente oxidados en concentraciones del orden de 500 mg/L.

- **Fluoruro.** El flúor representa aproximadamente 0.3 g/kg de la corteza terrestre. Sus compuestos inorgánicos se utilizan en la reducción de aluminio y la fabricación y utilización de fertilizantes fosfatados, que contienen hasta un 4% de flúor.

La exposición al fluoruro presente en el agua para consumo humano depende considerablemente de circunstancias naturales. En el agua no tratada, las concentraciones son, por lo común, inferiores a 1.5 mg/L, pero en las zonas ricas en minerales que contienen flúor, las aguas subterráneas pueden contener unos 10 mg/L. Este compuesto se agrega también en ocasiones al agua potable para prevenir la caries dental.

Tras su ingestión en el agua, los fluoruros solubles se absorben fácilmente a través del tracto intestinal. En 1987, el Centro de Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) clasificó los fluoruros inorgánicos en el grupo 3. En 1984 se indicó como valor guía 1.5 mg/L. Las concentraciones superiores a ese valor llevan consigo un riesgo creciente de fluorosis dental y concentraciones muchos mayores provocan fluorosis esquelética. El valor es superior al recomendado para fluoración artificial del abastecimiento de agua.

- **Grasas y aceites.** La grasa animal y los aceites son compuestos (ésteres) de alcohol o glicerol (glicerina) y ácidos grasos.

Son químicamente muy semejantes ya que se componen de carbono, hidrógeno y oxígeno, en diversas proporciones. Las grasas son uno de los compuestos orgánicos más estables y no se descomponen fácilmente por la acción de las bacterias. Sin embargo, los ácidos minerales y el

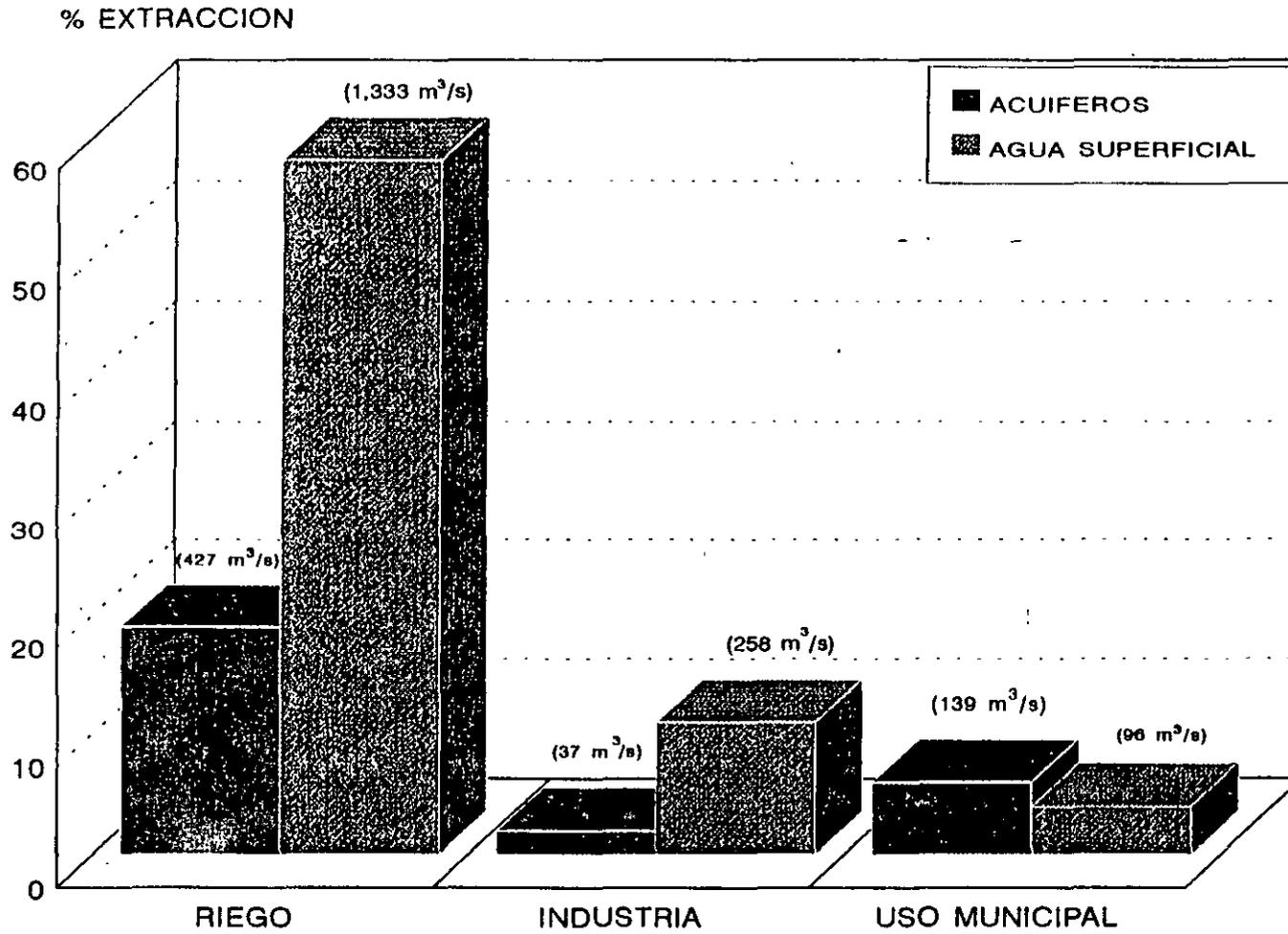


FIG 1 Empleo nacional del agua por los sectores agrícola, industrial y municipal y explotación de los acuíferos

hidróxido de sodio las atacan, dando como resultado la formación de glicerina y ácido graso o sus sales alcalinas.

- **Nitrato y nitrito.** Los nitratos y nitritos son iones presentes en la naturaleza que forman parte del ciclo del nitrógeno. En las aguas superficiales y subterráneas, las concentraciones de nitratos naturales ascienden generalmente a unos pocos miligramos por litro. En muchas aguas subterráneas, se ha observado en numerosas ocasiones, debido a la intensificación de las prácticas agrícolas, un aumento de las concentraciones de nitratos, que pueden llegar a varios centenares de miligramos por litro. En algunos países hasta el 10% de la población puede estar expuesto a concentraciones de nitratos superiores a 50 mg/L en el agua para consumo humano.

Por lo común, cuando las concentraciones en el agua potable son inferiores a 10 mg/L, la principal fuente de la ingesta total de nitratos serán las verduras. Cuando las concentraciones son superiores a 50 mg/L, el agua será la fuente principal.

El valor guía de nitrógeno como nitrato es de 10 mg/L. No obstante, el valor no debe expresarse sobre esta base sino sobre la del propio nitrato, que es la entidad química que puede perjudicar la salud, por lo que se establece un valor guía para el nitrato de 50 mg/L.

Dado que recientemente se han obtenido datos que indican la presencia de nitritos en algunos sistemas de abastecimiento de agua, se llegó a la conclusión de que debía proponerse un valor guía para el nitrito.

- **Oxígeno disuelto.** La concentración de oxígeno disuelto (OD) es un parámetro importante para evaluar la calidad del agua. Sirve como indicador del efecto producido por los contaminantes oxidables, de la capacidad para mantener vivos peces u otros organismos aerobios y de la capacidad autodepuradora de un cuerpo receptor.

- **pH.** No se propone un valor guía basado en sistemas sanitarios para éste parámetro, aunque valores superiores a 11 tienen relación con la irritación ocular y agravación de trastornos cutáneos. Aunque el pH no tiene, por lo común efectos directos en los consumidores, es uno de los parámetros operacionales más importantes de la calidad del agua.

- **Sulfato.** Los sulfatos están presentes en forma natural en diversos minerales y se utilizan comercialmente sobre todo en la industria química. Se descarga en el agua a través de los desechos industriales y de los depósitos atmosféricos; sin embargo, es común concentraciones mayores en las aguas subterráneas.

El sulfato es uno de los aniones menos tóxicos; sin embargo, en grandes concentraciones, se ha observado catarsis, deshidratación e irritación gastrointestinal. No se propone un valor guía basado en criterios sanitarios para el sulfato.

La presencia de sulfato en el agua potable puede causar también un sabor perceptible y contribuir a la corrosión de los sistemas de distribución.

- **Sustancias activas al azul de metileno (SAAM).** Las sales alcalinas de las grasas son conocidas como jabones y, como en el caso de las grasas, son estables. Los jabones comunes se hacen por saponificación de grasas con hidróxido sódico. Son solubles en agua, pero en presencia de los constituyentes de la dureza, las sales sódicas se transforman en sales cálcicas y magnésicas de ácidos grasos, también conocidas como jabones minerales, que son insolubles y precipitan.

Los principales problemas que provocan estos compuestos son la producción de espuma y la impartición de sabor a concentraciones muy bajas. Por ello, el estándar de 0.5 mg/L representa un factor de seguridad de 15,000 veces en relación con su toxicidad.

- **Sustancias extractables con cloroformo.** Los compuestos extractables con cloroformo corresponden al contenido de materia orgánica en el agua. Esta prueba se emplea como un primer cribado para separar insecticidas clorados, nitrobenzenos y éteres aromáticos. Cuando se tienen concentraciones superiores a 0.2 mg/L, el olor y el sabor del agua son de mala calidad. Es una prueba poco usada que ha sido sobrepasada por métodos más modernos y precisos.

3.6 Metales

Son un grupo de elementos situados en los grupos I, II III y parte del IV de la Tabla periódica. En la determinación de metales es frecuente emplear el término disueltos, cuando el análisis se efectúa sobre el filtrado a 0.45μ y sin acidificar, en caso contrario se habla de metales suspendidos. Por metales totales se entiende la detección en una muestra no filtrada y sujeta a una digestión fuerte. Por último, los metales extractables en ácidos se refiere a la determinación efectuada en una muestra no filtrada y tratada con un ácido mineral caliente. Los metales principales son los siguientes:

- **Aluminio.** El aluminio es un elemento abundante y difundido, que representa alrededor del 8% de la corteza terrestre. En el tratamiento del agua utilizada para el abastecimiento público se usan ampliamente compuestos de aluminio, y la presencia de éste en el agua para consumo humano se debe con frecuencia a deficiencias del control y el funcionamiento del proceso. La exposición de los seres humanos puede producirse por diversas vías, y probablemente corresponde al agua potable menos del 5% de la ingesta total.

El metabolismo del aluminio en los seres humanos no es bien conocido pero, al parecer, el aluminio inorgánico se absorbe mal y la mayor parte del absorbido se, excreta rápidamente en la orina.

En algunos estudios, se ha observado una relación entre la presencia de aluminio en el agua para consumo humano y la aparición de lesiones cerebrales características de la enfermedad de Alzheimer. No se recomienda un valor guía basado en los efectos sanitarios. No obstante, una concentración de aluminio de 0.2 mg/L permite llegar a una solución de transacción entre la necesidad práctica de utilizar sales de aluminio para el tratamiento del agua y la conveniencia de evitar la coloración del agua distribuida.

- **Arsénico.** El arsénico está ampliamente distribuido por toda la corteza terrestre y se utiliza comercialmente, sobre todo en agentes aleadores. El presente en el agua procede de la disolución de minerales y minas, de efluentes industriales y de la atmósfera; en algunas zonas, las concentraciones que existen en las aguas subterráneas son elevadas, resultado de la erosión. Se estima que la ingesta diaria media de arsénico inorgánico en el agua es similar a la procedente de los alimentos.

Está demostrado que el arsénico inorgánico es carcinógeno para los seres humanos, y el CIIC lo ha clasificado en el grupo 1. En poblaciones que consumen agua con altas concentraciones de arsénico, se ha observado una incidencia relativamente elevada de cáncer de la piel y posiblemente de otros tipos, que aumenta con la dosis y la edad.

A fin de reducir la concentración de este contaminante carcinógeno, se ha establecido un valor guía provisional para el arsénico en el agua potable de 0.01 $\mu\text{g/L}$.

- **Bario.** El bario está presente en varios compuestos que forman parte de la corteza terrestre y se utiliza en aplicaciones industriales muy diversas; el que se encuentra en el agua procede principalmente de fuentes naturales. En general, la principal fuente de exposición al bario son los alimentos; no obstante, en la zonas donde el agua contiene concentraciones elevadas de este elemento, una parte importante de la ingesta total puede proceder del agua para consumo humano.

El valor guía para el bario en agua potable es de 0.7 mg/L.

- **Boro.** El boro se utiliza principalmente en materiales estructurales. Los compuestos de boro se usan en algunos detergentes y procesos industriales y llegan al agua en los efluentes industriales y domésticos. Las concentraciones de boro que suelen hallarse en el agua para consumo humano son inferiores a 1 mg/L, pero se han observado niveles superiores, debido a la presencia de boro natural. Se estima que la ingesta diaria total se sitúa entre 1 y 5 mg/L. Cuando se administra en forma de borato o ácido bórico, el boro se absorbe rápida y casi completamente a través del tracto gastrointestinal.

Si se asigna el 10% de la Ingesta Diaria Total (IDT) al agua potable, se obtiene un valor guía de 0.3 mg/L. No obstante, debe señalarse que la ingesta de boro procedente de los alimentos no es bien conocida y que al parecer, el tratamiento del agua para consumo humano no elimina adecuadamente este elemento.

- **Hierro.** El hierro es uno de los metales más abundantes de la corteza terrestre. Se encuentra en las corrientes naturales, en concentraciones que varían de 0.5 a 50 mg/L. También puede estar presente en el agua para consumo humano debido a la utilización de coagulantes de hierro o a la corrosión de las tuberías de acero y hierro fundido durante el proceso de distribución.

El hierro es un elemento indispensable de la nutrición humana. Sin embargo, la posible acumulación de un volumen excesivo de hierro en el organismo, marca una ingesta diaria

tolerable máxima provisional (IDTMP) de 0.8 mg/kg de peso corporal, que se aplica al hierro de todas las fuentes con excepción de los óxidos de hierro utilizados como colorantes y los suplementos de hierro administrados durante el embarazo y la lactancia o por razones clínicas concretas. La asignación del 10% de esta IDTMP al agua potable proporciona un valor de unos 2 mg/L, que no representa un riesgo para la salud. Por lo general concentraciones inferiores afectan ya al sabor y la apariencia del agua.

No se propone un valor guía basado en criterios sanitarios para el hierro presentes en el agua potable.

- **Manganeso.** El manganeso es uno de los metales más abundantes en la corteza terrestre y, por lo general, se presenta junto con el hierro. Las concentraciones de manganeso disuelto en las aguas subterráneas y superficiales pobres en oxígeno pueden alcanzar varios miligramos por litro. En presencia de oxígeno, el manganeso forma óxidos insolubles que pueden provocar la aparición de depósitos no deseables y causar problemas de color en los sistemas de distribución. La ingesta diaria de manganeso procedente de los alimentos es de 2 a 9 mg para los adultos.

El manganeso es un oligo elemento indispensable, requiriéndose diariamente de 30 a 50 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de peso corporal. Su tasa de absorción puede variar considerablemente según la ingesta efectiva, la forma química y la presencia de otros metales, como el hierro y el cobre, en el régimen de alimentación. En los lactantes y los animales jóvenes se han detectado tasa de absorción muy altas.

No hay datos convincentes que indiquen la aparición de efectos tóxicos en los seres humanos debido al consumo de manganeso en el agua para consumo humano, pero sólo se dispone de estudios limitados.

La ingesta del manganeso puede llegar a 20 mg diarios sin efectos perjudiciales aparentes. Con una ingesta de 12 mg diarios, un adulto que pese 60 kg recibirá 0.2 mg diarios /kg de peso corporal. Si se asigna el 20% de la ingesta al agua potable y se aplica un factor de incertidumbre de 3 para tener en cuenta el posible aumento de biodisponibilidad del manganeso procedente del agua, se obtiene un valor de 0.4 mg/L.

- **Molibdeno.** La concentración de molibdeno en el agua para consumo humano es generalmente inferior a 0.01mg/L. No obstante en las zonas próximas a minas, se ha notificado la presencia de concentraciones de hasta 200 $\mu\text{g}/\text{L}$. La ingesta alimentaria de esta sustancia es aproximadamente de 0.1 mg diarios por persona. Se considera que el molibdeno es un elemento indispensable, del que los adultos necesitan, según las estimaciones, de 0.1 a 0.3 mg diarios.

No se dispone de datos sobre la carcinogenicidad del molibdeno por vía oral. Como el molibdeno es un elemento indispensable, se considera un factor de 3 lo que proporciona un valor guía de 0.07 mg/L.

- **Níquel.** La concentración de este metal en el agua para consumo humano es generalmente inferior a 0.02 mg/L. La contribución del níquel liberado por grifos y accesorios puede ser hasta de 1 mg/L. En casos especiales de liberación de depósitos naturales o industriales del suelo, la concentración en el agua para consumo humano puede ser incluso mayor. La ingesta alimentaria diaria media es normalmente de 0.1 a 0.3 mg de níquel, pero puede alcanzar 0.9 mg si se consumen determinados artículos alimenticios.

Si se asigna al agua potable el 10% de la IDT, se obtiene un valor guía basado en criterios sanitarios de 0.02 mg/L que debe proporcionar protección suficiente para las personas sensibles al níquel.

- **Sodio.** Prácticamente todos los alimentos (que son la principal fuente de exposición cotidiana) y el agua para consumo humano contienen sales de sodio (por ejemplo, cloruro sódico). Aunque las concentraciones típicas de sodio en el agua consumida son inferiores a 20 mg/L, en algunos países pueden ser mucho mayores. Las concentraciones de sales de sodio en el aire, son por lo común, bajas en comparación con las que se encuentran en los alimentos o en el agua. Debe señalarse que algunos ablandadores del agua pueden aumentar apreciablemente el contenido de sodio en ésta.

No se ha podido llegar a una conclusión firme sobre la posible relación entre el contenido de sodio en el agua potable y la hipertensión. Por lo tanto, no se propone un valor guía basado en criterios sanitarios. Sin embargo, las concentraciones superiores a 200 mg/L pueden dar lugar a un sabor inaceptable.

3.7 Componentes orgánicos

3.7.1 Alcanos clorados

- **Tetracloruro de carbono.** El tetracloruro de carbono se utiliza principalmente para producir refrigerantes de clorofluorocarbono y se libera en el aire y el agua durante la fabricación y el uso de éstos. Aunque los datos de que se dispone sobre su concentración en alimentos son limitados, se prevé que la ingesta de tetracloruro de carbono procedente del aire resultará mucho mayor que la absorbida con los alimentos o el agua para consumo humano. Las concentraciones de esta última son generalmente inferiores a 5 µg/L.

El tetracloruro de carbono ha sido clasificado por el CIIC en el grupo 2B. Puede metabolizarse en sistemas microsómicos, produciendo un radical triclorometilo que se une a macromoléculas, iniciando la peroxidación de los lípidos y destruyendo las membranas celulares. Se ha demostrado que causa tumores hepáticos y de otro tipo en ratas, ratones y hamsters tras la exposición por vía oral o subcutánea o por inhalación.

- **Diclorometano.** El diclorometano o cloruro de metileno se utiliza ampliamente como disolvente para muchos propósitos, en partículas para descafeinar el café y para decapar la pintura. La exposición resultante de su presencia en el agua para consumo humano es insignificante comparada con la de otras fuentes.

La toxicidad aguda del diclorometano es reducida. En un estudio de absorción por inhalación de los ratones se demostró en forma concluyente la carcinogenicidad, mientras que otro realizado con el agua sólo proporcionó elementos de juicio favorables a la existencia de ésta. El CIIC ha clasificado el diclorometano en el grupo 2B; no obstante, el conjunto de los datos parece indicar que este compuesto no es un carcinógeno genotóxico y que no se forman *in vivo* metabolitos genotóxicos en cantidades relevantes.

- **1,1-Dicloroetano.** El 1,1-dicloroetano se utiliza como intermediario químico y disolvente. Se dispone de datos limitados que indican que puede estar presente en el agua para consumo humano en concentraciones de hasta 10 µg/L. No obstante, dada la generalización del uso de este compuesto y su consiguiente aparición en los desechos, su presencia en las aguas subterráneas puede aumentar.

Los mamíferos metabolizan rápidamente el 1,1-dicloroetano, produciendo ácido acético y diversos compuestos clorados. La toxicidad aguda es relativamente reducida y sólo se dispone de datos sobre la toxicidad en estudios a corto y a largo plazo.

Dada la limitación de los datos existentes sobre toxicidad y carcinogenicidad, se llegó a la conclusión de que no se debía proponer un valor guía.

- **1,2-Dicloroetano.** El 1,2-dicloroetano se utiliza principalmente como intermediario en la producción de cloruro de vinilo y otros productos químicos y en menor medida, como disolvente. Se han hallado en el agua para consumo humano en concentraciones de hasta unos pocos microgramos por litro. Está también presente en el aire de las zonas urbanas.

El CIIC ha clasificado el 1,2-dicloroetano en el grupo 2B. Se ha demostrado que esta sustancia provoca en animales de laboratorio varios tipos de tumores, en particular del hemangiosarcoma, que suele ser relativamente raro; los datos disponibles en su conjunto indican una posible genotoxicidad. No existen estudios adecuados a largo plazo que puedan servir de base a una IDT.

- **1,1,1-Tricloroetano.** El 1,1,1-tricloroetano solo se ha descubierto en una porción reducida de las aguas superficiales y subterráneas, por lo general en concentraciones inferiores a 20 µg/L. En unos pocos casos, se han observado concentraciones mucho mayores. La exposición a este compuesto parece ir en aumento.

El 1,1,1-tricloroetano se absorbe con rapidez a través de los pulmones y el tracto gastrointestinal, pero solo se metaboliza en pequeñas cantidades -aproximadamente el 6% en los seres humanos y el 3% en los animales de experimentación. La exposición a altas

concentraciones puede producir esteatosis hepática (hígado graso) tanto en seres humanos como en animales de laboratorio.

Se recomienda realizar estudios adecuados sobre la toxicidad por vía oral, a fin de obtener datos aceptables para la determinación de un valor guía.

3.7.2 Plaguicidas

Se reconoce que los productos de la degradación de plaguicidas pueden representar un problema en el agua para consumo humano. No se tienen guías de toxicidad de esos productos, ya que los datos disponibles sobre su identidad, su presencia y su actividad biológica son insuficientes.

- **Alacloro**. El alacloro es un hierbicida que se utiliza para controlar las hierbas anuales y numerosas malezas de hoja ancha en los cultivos de maíz y en varios otros, antes y después de su aparición. Desaparece del suelo principalmente por volatilización, fotodegradación y biodegradación y en muchos de los productos se han identificado en el suelo. Se ha detectado la presencia de este compuesto en aguas subterráneas y superficiales. Se ha detectado también en el agua para consumo humano, concentraciones inferiores a 2 $\mu\text{g/L}$.

Los datos experimentales disponibles no permiten llegar a una conclusión sobre la genotoxicidad del alacloro, aunque se ha demostrado que unos de sus metabolitos es mutagénico.

El valor guía para el agua potable correspondiente a un riesgo adicional de cáncer durante toda la vida de 10^{-5} es de 20 $\mu\text{g/L}$.

- **Clordano**. El clordano es un insecticida de amplio espectro que se utiliza desde 1947. En los últimos tiempos su uso está limitado cada vez más en muchos países, y ahora se emplea sobre todo para destruir termitas mediante inyección superficial en el suelo.

El clordano es una mezcla de estereoisómeros, con predominio de las formas *cis* y *trans*. Es muy resistente a la degradación, muy inmóvil en el suelo y pasa muy fácilmente a las aguas subterráneas, donde sólo se ha encontrado en raras ocasiones. Desaparece fácilmente por liberación en la atmósfera.

El CIIC reevaluó el clordano en 1991, llegando a la conclusión de que su carcinogenicidad no está suficientemente demostrada en el caso de los seres humanos pero sí en los animales, por lo que lo clasificó en el grupo 2B.

Aunque las concentraciones de clordano en los alimentos han ido disminuyendo, la sustancia es muy persistente y muestra gran potencial de bioacumulación.

- **DDT**. La estructura del DDT permite varias formas isoméricas distintas, y los productos comerciales están constituidos principalmente por *p,p'*-DDT. En algunos países, se ha restringido e incluso prohibido la utilización de este compuesto, pero en otros es utilizado tanto en la agricultura como en la lucha antivectorial. El DDT es un insecticida persistente, estable en la mayor parte de las condiciones ambientales; la sustancia y algunos de sus metabolitos son resistentes a la descomposición completa por los microorganismos presentes en el suelo.

En pequeñas dosis, el DDT y sus metabolitos son absorbidos casi por entero por los seres humanos, tras su ingestión o inhalación, y se acumulan en los tejidos adiposos y la leche.

El CIIC ha llegado a la conclusión de que la carcinogenicidad del DDT no está suficientemente demostrada en el caso de los seres humanos pero sí en los animales de experimentación (grupo 2B), ya que se ha observado la aparición de tumores hepáticos en ratas y ratones expuestos a él.

Como los lactantes y los niños pueden verse expuestos en cantidades de sustancias químicas mayores en relación con su peso corporal y dada la inquietud ante la bioacumulación del DDT, el valor guía se calculó a partir de la hipótesis de que un niño de 10 kg bebe un litro de agua diario. Además como la exposición al DDT por vías distintas al agua es considerable, se asignó al agua potable un valor guía de 2 $\mu\text{g/L}$ para el DDT y sus metabolitos presentes en el agua para consumo humano.

Este valor guía sobrepasa la solubilidad del DDT en el agua, que es de 1 $\mu\text{g/L}$. No obstante, las pequeñas cantidades de partículas que contiene el agua pueden absorber una cierta cantidad de este producto, por lo que el valor guía de 0.02 $\mu\text{g/L}$ podría alcanzarse en determinadas circunstancias.

Conviene mencionar que, como en el caso de todos los plaguicidas, el valor guía recomendado para el DDT presente en el agua potable se ha establecido para la proteger la salud de los seres humanos y puede no ser suficiente para la protección del medio ambiente, la fauna y la flora acuáticas.

- **Acido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D)**. El 2,4-D es un herbicida clorofenóxido utilizado para el control de las malezas de hoja ancha. Su vida media antes de la biodegradación varía de unos días a 6 semanas en el suelo, mientras que en agua, oscila entre una y varias semanas. Datos limitados obtenidos durante actividades de vigilancia indican que las concentraciones en el agua para consumo humano no sobrepasan, por lo general, unos pocos microgramos por litro. El 2,4-D rara vez se encuentra en los alimentos.

El CIIC ha clasificado los herbicidas clorofenóxidos en el grupo 2B. Aunque en uno de los estudios realizados con seres humanos se observó una tendencia marginalmente significativa al aumento del riesgo adicional de linfomas distintos del de Hodgkin con la mayor duración a la exposición a herbicidas clorofenóxidos, no es posible evaluar el potencial carcinógeno del 2,4-D *per se* sobre la base de los datos epidemiológicos disponibles.

- **Lindano.** El lindano (γ -hexaclorociclohexano, γ -HCH) es un insecticida utilizado desde hace mucho tiempo. Aparte de sus usos agrícolas en plantas y animales, se emplea también en salud pública y como preservante de la madera.

El lindano es un compuesto persistente con una afinidad por el agua relativamente baja y una reducida movilidad en el suelo; se volatiliza lentamente en la atmósfera. Es un contaminante ambiental ubicuo, que se ha detectado también en el agua. La exposición de los seres humanos, que tiene lugar a través de los alimentos, está disminuyendo. El valor guía es, pues, de 2 $\mu\text{g/L}$.

3.8 Determinación de organismos patógenos

El análisis de organismos patógenos en el agua se realiza de dos formas: utilizando un organismo indicador, o bien, detectando algún micorganismo específico. El primer caso es el más común como parámetro de control. Un indicador debe estar presente cuando estén presentes patógenos y ausente siempre que estén ausentes los patógenos. El indicador tradicional son las bacterias coliformes y en particular las fecales. Hay bacterias coliformes de origen fecal (humano) y las no fecales (tierra), sólo las fecales son indicadores para agua residual, y todas las bacterias coliformes para agua potable (incluye fecales).

Los coliformes fecales son un componente normal de la flora y fauna del intestino humano, donde se encuentran en grandes cantidades, ya que no son patógenos. Son microorganismos indicadores porque su presencia revela la contaminación del agua con heces fecales y la posible existencia de patógenos. Se escogieron debido a que los patógenos son menos abundantes en el agua residual, no siempre encuentran en el agua su habitat ideal y, su manipulación es menos peligrosa para el analista. Así, su presencia sugiere la existencia de otras bacterias, virus o protozoarios perniciosos para el ser humano.

4. NORMATIVIDAD RELATIVA A LA CALIDAD DEL AGUA

El término calidad del agua es un concepto abstracto que sólo adquiere sentido cuando se listan parámetros y se les asocia un valor para definirla. La amplia combinación de compuestos y valores que se pueden considerar hace que en la práctica se formen conjuntos en función del uso (Criterios Ecológicos y Norma de agua potable), origen (NOM de descargas) o destino (CPDs).

En México, la normatividad que se relaciona con la calidad del agua se muestra en la TABLA 2 a la cual se deben añadir los tratados y convenciones internacionales que básicamente se limitan a la contaminación de mar con hidrocarburos y los acuerdos derivados del Tratado de Libre Comercio que, en pocas palabras, se resumen que cada país debe cumplir con su propia normatividad. Lo anterior, para México, tiene implicaciones muy serias.

TABLA 2 NORMATIVIDAD MEXICANA PARA LA PREVENCION Y CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AGUA

DEPENDENCIA ENCARGADA DE LA PUBLICACION	INSTRUMENTO REGULATORIO	FECHA DE EXPEDICION
SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS	LEY DE CONTRIBUCION DE MEJORAS POR OBRAS PUBLICAS FEDERALES DE INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA	ENERO DE 1991
	LEY DE AGUAS NACIONALES	DICIEMBRE DE 1992
	LEY FEDERAL DE DERECHOS EN MATERIA DE AGUA	FEBRERO DE 1993
SECRETARIA DE DESARROLLO SOCIAL	LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE	ENERO DE 1988
	NORMAS OFICIALES MEXICANAS REFERENTES A LA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES	DICIEMBRE 13 DE 1993 ENERO 11 DE 1995
SECRETARIA DE SALUD	LEY FEDERAL DE PROTECCION AL AMBIENTE	ENERO DE 1982
	REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE SALUD EN MATERIA DE CONTROL SANITARIO DE ACTIVIDADES, ESTABLECIMIENTOS, PRODUCTOS Y SERVICIOS	ENERO DE 1988

La definición de las propiedades que debe tener un agua para reconocerle una cierta calidad y por tanto destinarla a un uso se establece en:

a) Para suministro

- Los Criterios Ecológicos de Uso del Agua, y
- El Reglamento de la Ley General de salud en Materia de Control sanitario en su título tercero relativo a agua de consumo humano

b) Para fines de saneamiento

- Las Normas oficiales Mexicanas referentes a las descargas, y
- Las Condiciones particulares de descarga (CPDs)

Para mejorar la calidad del agua, estos cuatro instrumentos deben estar relacionados (Los parámetros medidos con mayor frecuencia en la Red Nacional de Monitoreo), sin embargo, la falta de visión en forma integral de la normatividad mexicana hace que -a pesar de que el agua sea una sola- es prácticamente imposible asegurar que se mejore la calidad para los usos por

medio del control de la calidad en las descargas. En efecto, es el doble empleo que damos a los cuerpos de agua como fuente de abastecimiento y transporte de contaminantes que hace que sea útil emplear parámetros comunes en la regulación de los usos y las descargas para poder ligar la evolución de la calidad.

Los instrumentos de la FIG 2 son los medios con los que cuenta México para evaluar y medir la calidad del agua así como para establecer de qué manera inciden las políticas de saneamiento en su mejora. Los parámetros establecidos son tales (o deberían ser tales) que si se cumpliesen no habría problemas de contaminación.

4.1 Normatividad según el empleo

4.1.1 Calidad del agua en función de sus usos

El listado que define la calidad del agua en función de sus usos está dado por los Criterios Ecológicos de Uso del Agua de 1989 que han servido como guía para el establecimiento de normas y políticas. Cabe mencionar que los criterios de Calidad del agua son similares a los que la EPA establece como metas a largo plazo (*goal*) y que se basan en conocimientos CIENTIFICOS y no tecnológicos por lo que en Estados Unidos no tienen aplicación directa. Se observa cuales son los usos que se reconocen:

1. Fuente Abastecimiento de Agua Potable.
2. Recreativo con Contacto Primario.
3. Riego Agrícola.
4. Pecuario.
5. Protección de la Vida Acuática:
 - 5.1 Agua Dulce.
 - 5.2 Agua Marina (Áreas Costeras).

Una primera observación revela que: los Criterios no son norma, es decir, no son obligatorios y no tienen efecto alguno sobre otras leyes y además, no son congruentes con los diversos usos que define la Ley (TABLA 3). De hecho, no hay correspondencia en ella misma. Situación que se agrava al incluir el análisis de la normatividad regional (Ej., En el D.F. se establece un uso "hospitalario", para el cual no se tiene definida calidad alguna).

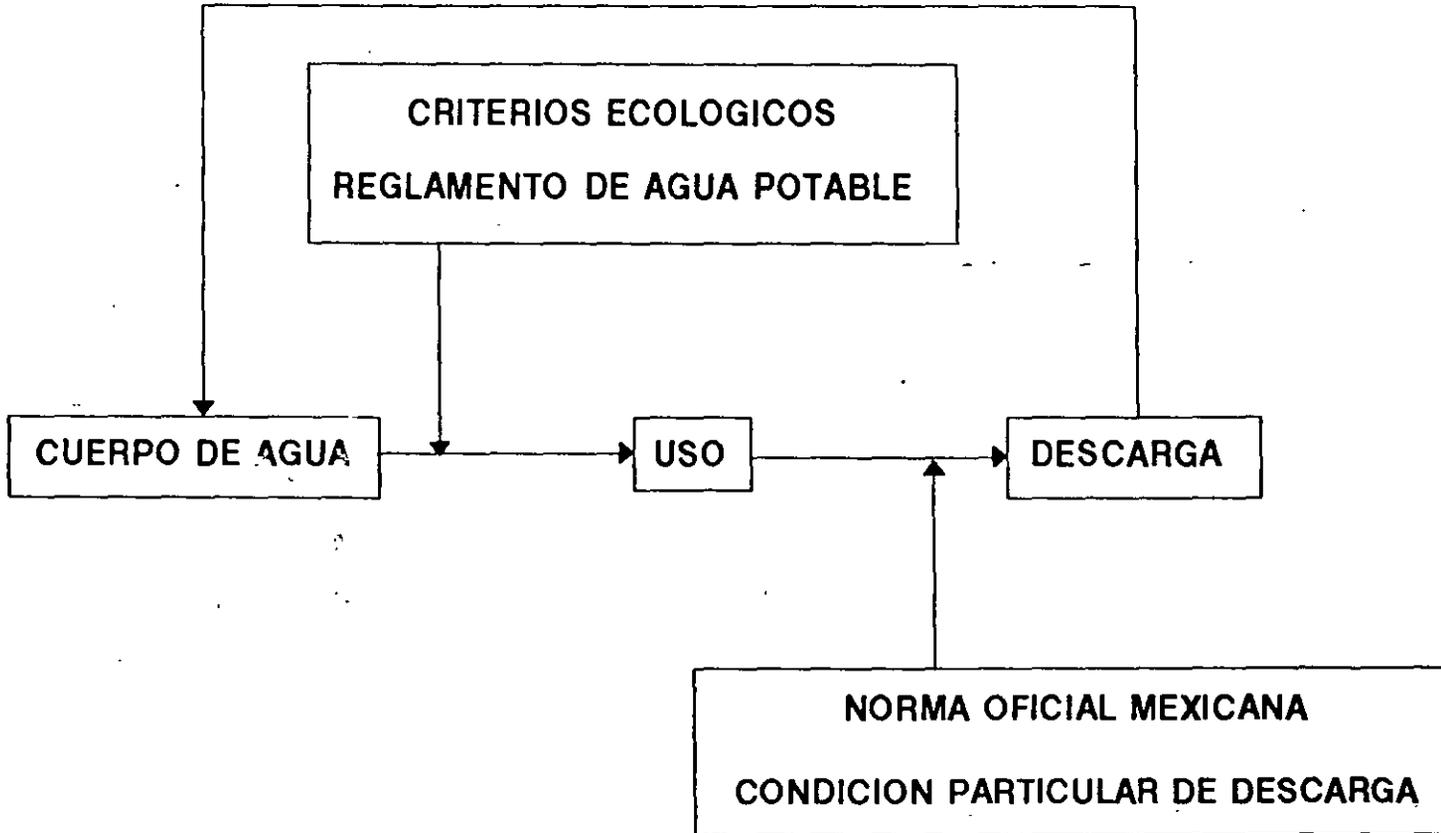


FIG 1 Usos y descargas del agua y su normatividad

**TABLA 3 USOS DEL AGUA EN LOS DIFERENTES INSTRUMENTOS
REGULATORIOS**

Usos del agua reconocidos en la literatura	Ley Federal de Aguas (11 de enero de 1972)	Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (13 de diciembre de 1989)	Ley de Aguas Nacionales (1 de diciembre de 1992)
1. Consumo humano 2. Agricultura 3. Municipal (riego de áreas verdes, lavado de calles, fuentes de ornamento, lavado de maquinaria de servicio, etc.) 4. Industria 5. Recreación - Con contacto primario - Con contacto secundario 6. Acuicultura 7. Protección ecológica 8. Abastecimiento pecuario 9. Transporte de desechos 10. Navegación 11. Generación de energía eléctrica 12. Control de avenidas	1. Usos Domésticos 2. Servicios Públicos Urbanos 3. Abrevaderos de Ganado 4. Riego de Terrenos: Ejidales y Comunales y de Propiedad Privada 5. Industrias: 5.1 Generación de Energía Eléctrica para Servicio Público 5.2 Otras Industrias 6. Acuicultura 7. Generación de Energía Eléctrica para Servicio Privado 8. Lavado y Entarquinamiento de Terrenos 9. Otros	1. Fuente Abastecimiento de Agua Potable 2. Recreativo con Contacto Primario 3. Riego Agrícola 4. Pecuario 5. Protección de la Vida Acuática: 5.1 Agua Dulce 5.2 Agua Marina (Áreas Costeras)	1. Público Urbano 2. Agrícola 3. Generación de Energía Eléctrica 4. Otras Actividades Productivas

Por otra parte, en cuanto al agua dan el mismo peso e importancia a parámetros realmente limitativos del uso como a los recomendables. Por ejemplo, la turbiedad y el mercurio. Además, el valor numérico de varios de los parámetros no considera la posibilidad de aplicar alguna tecnología para remediarlo. Por ejemplo, no es necesario limitar la concentración de Fe a 0.3 mg/L en agua para preparar agua potable cuando existen sistemas de potabilización que remueven concentraciones mayores a un costo accesible.

La congruencia con los parámetros y valores estipulados en la norma de agua potable no fue reusada. Por ejemplo, los criterios ecológicos para suministro de agua potable limitan el contenido de cianuro a 0.02 y la norma de agua potable a 0.05, lo que hace suponer que alguna de los dos tiene un defecto.

Además, no consideran las condiciones propias del país. En cuerpos de agua limpios de países de climas fríos el contenido de N y de P es bajo. En cambio, en México, existen cuerpos de agua no contaminados y con condiciones ecológicas sanas que tienen concentraciones mayores que las establecidas en los criterios. Algo similar ocurre con el boro.

4.1.2 Calidad del agua potable

Técnicamente, la definición de la "potabilidad de un agua" es un aspecto complicado y se refiere a CERTIFICAR la ausencia del riesgo de enfermedad a largo o corto plazo en el ser humano. La OMS señala que existen más de 70,000 compuestos sintéticos, por los que es imposible y probablemente innecesario regularlos todos. La mayor parte de las legislaciones en

el Mundo consideran entre 70 y 120 compuestos. La selección de ellos se basa, en los países con capacidad económica, en la frecuencia y concentración de los contaminantes en sus cuerpos de agua. En otros países, como es el caso de México, la selección se efectúa mediante revisiones bibliográficas. Actualmente, la norma de agua potable en México esta siendo revisada. La TABLA 4 muestra la comparación de los criterios para Estados Unidos, Canadá, la Organización Mundial de la Salud, la Comunidad Económica Europea, Rusia y con la norma mexicana actualmente vigente así como la propuesta de modificación. Se observa que, si no se toma en cuenta los tóxicos sintéticos, la nuestra es la más completa y estricta. Cabría preguntarse si no es este un esfuerzo de sobrelegislación dado que en la práctica muchos de estos parámetros ni siquiera se miden para certificar la potabilidad de un agua.

TABLA 4 RESUMEN COMPARATIVO DE LOS ESTANDARES SECUNDARIOS DE (EUA, CANADA, CEE y la OMS.

PARAMETRO REGULADO	MEXICO	ESTADOS UNIDOS	CANADA	O.M.S.	Comunidad Económica Europea	Rusia
Alcalinidad Total <como CaCO ₃ >	400.0	-	-	-		
Aluminio	0.2	-	-	-	0.2	--
Arsénico	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	--
Bario	1.0	1.0	1.0	-	0.1 ⁽¹⁾	--
Cadmio	0.005	0.01	0.005	0.005	0.005	0.001
Cianuro <como CN->	0.05	-	-	0.05	--	0.1
Cloro Libre en Agua Clorada	0.2	-	-	-		
Cloro Libre en Agua Sobre Clorada	1.0	-	-	-		
Cromo Hexavalente	0.05	0.05	0.05	0.05	0.005	0.1/0.5 ⁽¹⁾
Demanda Biológica de oxígeno	--	--	--	--	--	3.0
Dureza de Calcio <como CaCO ₃ >	300.0	-	-	-	--	--
Fenoles o Compuestos Fenólicos	0.001	-	-	0.002	0.5	1.0
Fierro	0.3	0.3	-	1.0	0.3	0.5
Fluoruros <como F>	1.5	4.0	1.5	1.5	1.5-0.7 ⁽²⁾	1.5
Magnesio	125.0	-	-	150.0		
Manganeso	0.15	0.05	-	0.5	0.5	--
Mercurio	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0005
Nitratos <como N>	5.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
Nitritos <como N>	0.05	-	-	-	0.1	1.0
Nitrógeno Protéico	0.1	-	-	-		
Oxígeno Consumido en Medio Acido	3.0	-	-	-		

PARAMETRO REGULADO	MEXICO	ESTADOS UNIDOS	CANADA	O.M.S.	Comunidad Económica Europea	Rusia
Sulfatos <como SO ₄ -2>	250.0	250.0	-	400.0	25 ⁽¹⁾	500
Subst. Activas al Azul de Metileno	0.5	-	-	1.0	0.5	0.5
Carbón Extractable en Cloroformo	0.3	-	-	0.5		
Carbón Extractable en Alcohol	1.5	-	-	-		
Coliformes Totales (NMP/100 ml)	2.0	<1.0	10.0	0.0	0.0	-
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	0.0	-	0.0	0.0	0.0	
pH (unidades características)	6.9-8.5	6.5-8.5	-	6.5-9.2	6.5-8.5	-
Plata	-	0.05	0.05	-		
2,4 D	-	0.1	0.1	0.001		
Endrín	-	0.0002	0.0002	-		
Lindano	-	0.0004	0.004	0.0003		
Metoxicloro	-	0.1	0.1	0.003		
Pesticidas totales	-	-	0.1	-	0.5	-
Toxafeno	-	0.005	0.005	-		
2,4,5 TP silvex	-	0.01	0.01	-		
Trihalometanos	-	0.1	0.35	0.03(a)		
Partículas β y act. fotónica (mrem)	-	4.0	-	1.0(b)		
Partículas alfa (pCi/l)	-	15.0	-	0.1(b)		
Radio 226-228 (pCi/l)	-	5.0	1.0(b)	-		
Benceno	-	0.005	-	0.01		
Tetracloruro de carbono	-	0.005	-	0.003		
1,1 Dicloroetileno	-	0.007	-	0.003		
1,2 Dicloroetano	-	0.005	-	0.01		
p-Diclorobenceno	-	0.075	-	-		
1,1,1 Tricloroetano	-	0.2	-	-		
Tricloroetileno	-	0.005	-	0.03		
Cloruro de vinilo	-	0.002	-	-		

(a). Sólo cloroformo

(b). Bq/l

NOTA: Las unidades de los parámetros están en mg/l, a menos que se especifique alguna otra.

(1) Valor guía

(5) en función de la temperatura

(8) Como Cr (III) y Cr (IV)

Olor

- parámetro subjetivo
- información sobre el estado del agua.

- agua supuestamente potable rechazada por mal olor.

- agua residual
olor diferente si fresca o en descomposición
se debe al H_2S formado por reducción de sulfatos y sulfitos.

TABLA 2.3. PRINCIPALES COMPUESTOS QUE CAUSAN MAL OLOR

COMPUESTO	FORMULA CONDENSADA	DESCRIPCION DEL OLOR
Aminas	CH_3NH_2 , $(CH_3)_3N$	Pescado
Amoníaco	NH_3	Amoníaco
Diaminas	$NH_2(CH_2)_4NH_2$	Pescado descompuesto
Acido sulfhídrico	H_2S	Huevos podridos
Mercaptanos	CH_3SH , $CH_3(CH_2)_3SH$	Zorrillo
Sulfuros Orgánicos	$(CH_3)_2$, CH_3SSCH_3	Basura podrida
Escatol	$C_8H_7NHCH_3$	Fecal

FUENTE: SAWYER, (1978).

Características para describir un olor

- Carácter: Con lo que lo asocia
 - Detectabilidad: A que dilución con aire puro ya no es perceptible.
 - Apeatabilidad: Qué tan desagradable es.
 - Intensidad: Qué tan fuerte es.
- Evaluado por personas y no con aparatos
 - Resultados subjetivos
 - Difícil coleccionar y preservar muestras.

Color

- Agua potable indicación rápida de la calidad.

en agua de abastecimiento originado por

fierro

manganeso

sustancias húmicas

plancton

microalgas

- Agua residual
procesos industriales (textil, pinturas, alimentos, etc).

- Método escala Pt-Co (platino-cobalto).

Temperatura

- Influye sobre
tasas de crecimiento biológico
vida acuática
reacciones químicas
solubilidad de los contaminantes o compuestos requeridos.

- EN UN LÍQUIDO A MAYOR TEMPERATURA MAYOR SOLUBILIDAD DE UN SÓLIDO PERO MENOR LA DE UN GAS.

Conceptos generales

Elemento

- Expresión más simple de una sustancia que guarda todas las propiedades de ella.
- Existen 105
- TIENEN el mismo número atómico.

Ión

- Atomo o conjunto de ellos cargados eléctricamente
- Se comportan como grupo con propiedades específicas
- En estado cristalino o solución.

iones

- + cationes
- aniones.

Molécula

- Partícula neutra
- Dos o más átomos químicamente ligados
- EJ. O₂, N₂, Cl₂ y H₂.

Evaluación de la contaminación

TÉCNICAS EMPLEADAS

- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
 - American Public Health Association
 - American Society of Civil Engineers
 - American Water Works Association y Water Pollution Control Federation.

- Técnicas estandarizadas
- Protocolo y principio
- Precisión y sensibilidad
- Preservación de la muestra
- Principales interferencias
- Consejos prácticos referentes al tipo de agua

Composición física

color
olor
temperatura
turbiedad
contenido de sólidos suspendidos.

UNIDADES DE MEDIDA DE CONCENTRACIÓN EN SI

* mol por metro cúbico (mol/m^3)

* ingenieros ambientales

mg/l

$\mu\text{m/l}$

Concentración en porcentaje

- a) Peso/peso.
- b) Peso/volumen.
- c) Volumen/volumen.

En general, PARA

mezclas gaseosas \Rightarrow volumen/volumen

soluciones en agua \Rightarrow peso/peso

Clasificación de los contaminantes según su naturaleza

a) Agentes biológicos:

provocan enfermedades

entran al agua por heces fecales de humanos o animales más comunes

tifo

salmonelosis

disentería

cólera

b) Compuestos tóxicos o peligrosos:

proviene de los desechos líquidos y sólidos

producen quemaduras en la piel y ojos

enfermedades si son ingeridos.

En este grupo se encuentran:

ácidos

drenados ácidos de minas

desechos de la agricultura

amoníaco

arsénico

cadmio

cianuro

detergentes

plomo

mercurio

óxidos de nitrógeno

derrames de petróleo

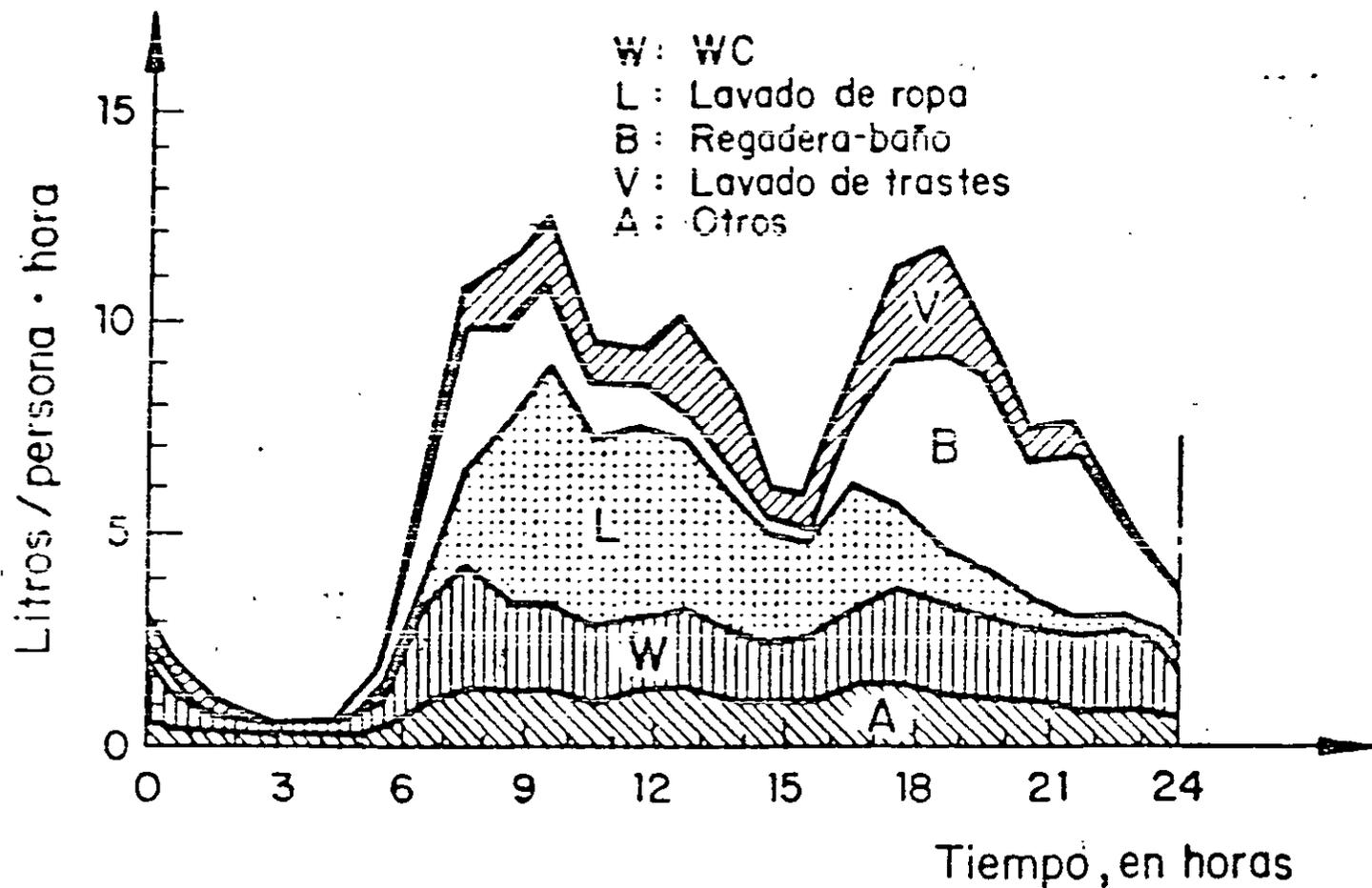
pesticidas

PVC

compuestos radiactivo desechados directamente

se forman por reacción en el agua

y una pequeña fracción se forma durante el propio tratamiento del agua (tetracloruro de carbono y cloroformo)



Evolución en un día del consumo de agua para diferentes usos en una casa habitada.

ACUIFEROS

LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS, BASUREROS Y CEMENTERIOS
(ORGANOCOLORADOS, BENZENICOS, ALIFATICOS, ACIDOS HUMICOS,
TERPENOS, TANINOS, As, Se, Ra, Cd, NITRATOS, ETC)

AGUAS SUPERFICIALES

RESIDUOS LIQUIDOS SIN TRATAR Y EFLUENTES DE PLANTA DE TRATAMIENTO
(COMPUESTOS HUMICOS DIFICILMENTE BIODEGRADABLES,)

PRECIPITACION

CONTAMINANTES DEL AIRE

(OXIDOS DE NITROGENO Y AZUFRE, Pb, POLVO, BACTERIAS, PAN, ETC)

- * LA MAYORIA SOLUBLES
- * TODOS PROHIBIDOS POR LAS NORMAS DE POTABILIZACION
- * NO SON PARAMETROS ESTANDARES DE CONTROL
- * NO SE ELIMINAN MEDIANTE METODOS TRADICIONALES

Fuentes

- ◆ desechos urbanos e industriales
 - ◆ descargas no controladas
 - ◆ campos agrícolas
 - ◆ minas
 - ◆ efluentes de plantas de tratamiento
 - ◆ drenajes rotos
 - ◆ lavado de la atmósfera
- | |
|-------|
| ríos |
| mares |
| lagos |

(01-100)

Problemática
del
Agua
≠
a la del
aire

CALIDAD

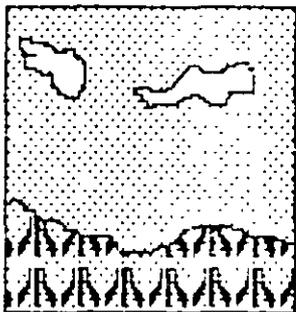
DISPONIBILIDAD

FUENTE DE
ABASTECIMIENTO

=

AGUA DE MUY ELEVADA CALIDAD

~ 1800



DIRECTO



DESINFECCION



FILTRACION



COAGULACION

TRATAMIENTO CONVENCIONAL

OBJETIVO : REMOVER PARTICULAS EN SUSPENSION

CRIBADO + COAGULACION + FILTRACION + DESINFECCION

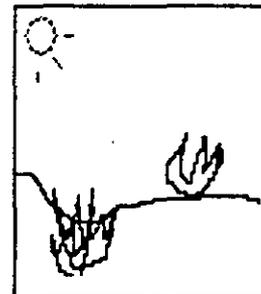
FUENTE DE
ABASTECIMIENTO

=

AGUA DISPONIBLE

TRATAMIENTO AVANZADO

OBJETIVO : REMOCION DE MATERIAL SOLUBLE



6-1009

FUENTES DE
ABASTECIMIENTO

CONVENCIONALES

SUPERFICIAL

MENOS DURAS

OD ↑

H₂S ↓

FACILMENTE CONTAMINABLES

↑ ACTIVIDAD BIOLÓGICA

COLOR Y TURBIEDAD ↑↓

FREATICAS

UNIFORME

MO ↓

H₂S ↑

NO CONVENCIONALES

AGUA DE MAR

\$\$\$

AGUAS NEGRAS

\$\$

????

*niche
over*

(pau)

Definición
de
Agua contaminada

=

f [uso,

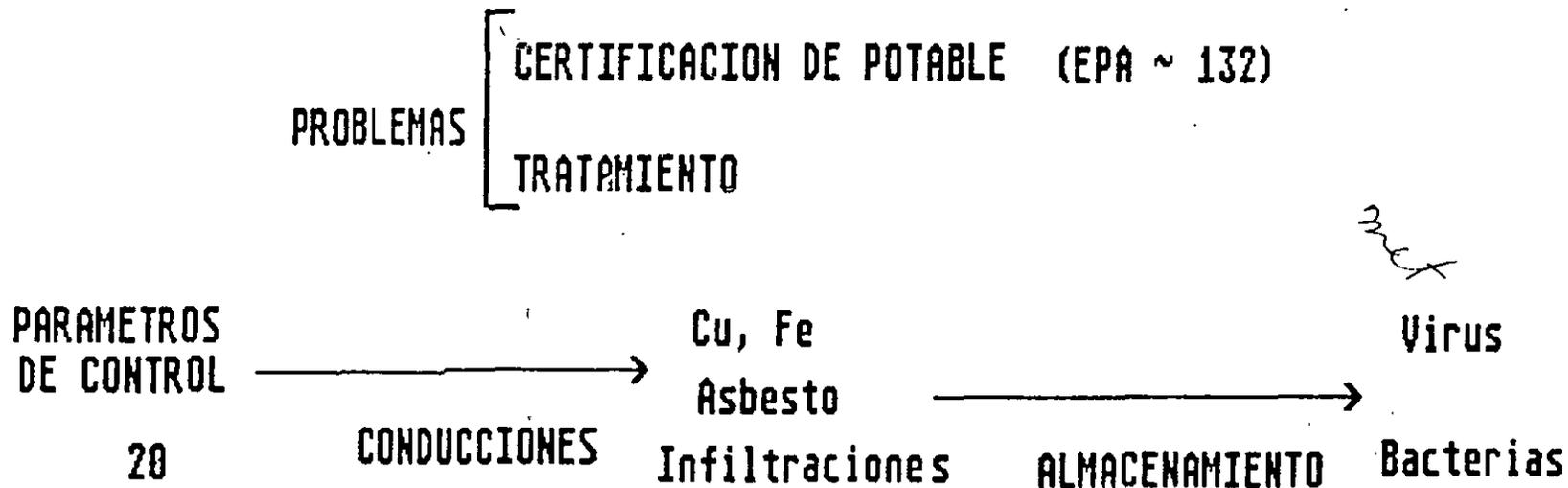
exigencias higiénicas,
avance del conocimiento y
técnicas analíticas]

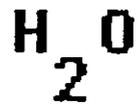
Dem - 8

EL AGUA ES EL "SOLVENTE UNIVERSAL"

DISUELVE
ARRASTRA
SUSPENDE
EMULSIONA

63 000 COMPUESTOS QUIMICOS (OMS, 1980)
+ 2000 POR AÑO





Materia

Energia

Contaminantes

Deseables

Inocuos

Gen - 1

AGUA

MUNICIPAL

ABASTECIMIENTO DOMESTICO

PRODUCCION DE AGRICOLA

CONSUMO INTERNO

EXPORTACION

INDUSTRIA

ESPARCIMIENTO

1250 M³ DE AGUA DISPONIBLE/PERSONA, AÑO

valores de uso

7 em - 2

TABLA 10 AUMENTO DE LA PRODUCTIVIDAD POR EL EMPLEO DE AGUA RESIDUAL EN RIEGO EN MEXICO

CULTIVO	RENDIMIENTO EN TON/HA		% DE CAMBIO
	AGUAS NEGRAS	AGUAS BLANCAS	
Alfalfa	120	70	71
Maíz	5	2	150
Frijol	1	1.3	-23
Trigo	3	1.8	67
Cebada	4	2.0	100
Avena de forraje	22	12.0	83
Tomate	35	18.0	94
Chile	12	7.0	71

DETERMINACIÓN DE ORGANISMOS PATÓGENOS

EL ANÁLISIS DE ORGANISMOS PATÓGENOS EN EL AGUA SE REALIZA DE DOS FORMAS:

UTILIZANDO UN ORGANISMO INDICADOR

DETECTANDO ALGÚN MICROORGANISMO ESPECÍFICO.

INDICADOR -----> PARÁMETRO DE CONTROL

UN INDICADOR DEBE ESTAR PRESENTE CUANDO ESTÉN PRESENTES PATÓGENOS Y AUSENTE SIEMPRE QUE ESTÉN AUSENTES LOS PATÓGENOS (COLIFORMES)

COLIFORMES

ORIGEN FECAL (HUMANO)

NO FECALES (TIERRA),

SÓLO LAS FECALES SON INDICADORES PARA AGUA RESIDUAL, Y TODAS LAS BACTERIAS COLIFORMES PARA AGUA POTABLE (INCLUYE FECALES).

Microbiológicas

Coliformes fecales

- Determinar si un agua es legalmente apta para consumo humano

- Coliformes fecales componente normal de la flora y fauna del intestino humano en grandes cantidades

- No son patógenos.

- Los patógenos son

- * menos abundantes en el agua residual

- * más sensibles a las condiciones ambientales

- * manipulación peligrosa para el analista.

- Microorganismos indicadores

- * su presencia revela contaminación del agua por heces fecales.

- * indica posible existencia de otras bacterias, virus o protozoarios perniciosos

- Para su determinación existen dos técnicas:

- * conteo de colonias sobre membrana

- * tubos múltiples.

- En ambos selección mediante medios específicos de cultivo e incubación a 44° C.

- DDT en algunos países prohibido, en México se sigue empleando el DDT, las ----loparafinas y el aldrín.
- Compuestos que han ayudado en el control de plagas
- Alteraciones como cáncer, mutaciones, y abortos espontáneos.

DDT

- Detuvo la epidemia del tifo en 1944 en Nápoles
- Limpió la isla de Cerdeña de los mosquitos de malaria.
- Entre 1947 y 1948 se pensó que erradicaría las moscas pero desarrollaron resistencia al producto.
 - * Como resultado se aumentaron las dosis
 - * se crearon programas de investigación para buscar otros compuestos.
 - * Se sintetizó el lindano, clordano y el dieldrín.
 - * el problema de la adaptación no fue remediado y se recurrió a otras familias (organofosfatos y carbamatos).

- Los organoclorados y en especial el DDT siguen siendo usado para combatir
 - * malaria,
 - * fiebre amarilla
 - * mal de Chagas.

- En agricultura, se emplea para control de plagas de

- * algodón
- * maíz
- * cacahuete
- * tabaco.

Pesticidas

- **Productos muy diversos y la mayor parte artificiales.**
- **Ejemplo:**
 - organoclorados (DDT, HCH, lindano, clordano, heptacloro, aldrín y dieldrín)
 - organofosforados (malatión y paratión)
 - organometálicos que son muy difíciles de biodegradar.

Los organofosforados incluyen principalmente a los fosfatos, fosfonatos y derivados azufrados. La intoxicación con estos compuestos provoca dolor de cabeza, visión borrosa, dificultad para respirar, dolor abdominal, calambres y parálisis.

Evaluación del riesgo de carcinogenicidad para los seres humanos

El CIIC considera los datos disponibles en su conjunto a fin de llegar a una evaluación global de la carcinogenicidad de un agente, una mezcla o unas circunstancias de exposición para los seres humanos.

El agente, la mezcla o las circunstancias se describen de acuerdo con la definición de una de las categorías siguientes, indicando el grupo correspondiente. La clasificación de un agente, una mezcla o unas circunstancias de exposición es una cuestión de apreciación científica, que refleja la fuerza de las pruebas resultantes de estudios con seres humanos y con animales de experimentación y de los demás datos pertinentes.

Grupo 1. El agente (o la mezcla) es carcinógeno para los seres humanos.

Las circunstancias de exposición implican exposiciones carcinógenas para los seres humanos.

Esta categoría se utiliza cuando existen *pruebas suficientes* de la carcinogenicidad para los seres humanos. Excepcionalmente, puede clasificarse en ella un agente (o una mezcla) cuando los datos referentes a seres humanos no llegan a ser suficientes pero existen *pruebas suficientes* de la carcinogenicidad en los animales de experimentación y elementos de juicio sólidos que indican que en los seres humanos expuestos, el agente (o la mezcla) actúa a través de un mecanismo de carcinogenicidad pertinente.

Grupo 2

Esta categoría comprende agentes, mezclas y circunstancias de exposición respecto de los cuales, en un extremo, las pruebas de la carcinogenicidad para los seres humanos son casi suficientes y, en el otro extremo, no se dispone de datos sobre seres humanos pero hay pruebas de la carcinogenicidad para los animales de experimentación. Los agentes, las mezclas y las circunstancias de exposición se incluyen bien en el grupo 2A (probablemente carcinógeno para los seres humanos) o en el grupo 2B (posiblemente carcinógeno para los seres humanos) sobre la base de los datos epidemiológicos y experimentales favorables a la carcinogenicidad y de otros datos pertinentes.

Grupo 2A. El agente (o la mezcla) es probablemente carcinógeno para los seres humanos.

Las circunstancias de exposición implican exposiciones probablemente carcinógenas para los seres humanos.

Esta categoría se aplica cuando existen *pruebas limitadas* de la carcinogenicidad para los seres humanos y *pruebas suficientes* de la carcinogenicidad para los animales de experimentación. En algunos casos, se puede clasificar en esta categoría un agente (o una mezcla) cuando se dispone de *pruebas insuficientes* de la carcinogenicidad para

los seres humanos y *pruebas suficientes* de la carcinogenicidad para los animales de experimentación, así como de elementos de juicio sólidos que indican que, en la carcinogénesis, actúa un mecanismo que también existe en los seres humanos. Excepcionalmente, pueden clasificarse en esta categoría un agente, una mezcla o unas circunstancias de exposición únicamente sobre la base de *pruebas limitadas* de la carcinogenicidad para los seres humanos.

Grupo 2B. El agente (o la mezcla) es posiblemente carcinógeno para los seres humanos.

Las circunstancias de exposición implican exposiciones posiblemente carcinógenas para los seres humanos.

Esta categoría comprende los agentes, las mezclas y las circunstancias de exposición respecto de los cuales existen *pruebas limitadas* de la carcinogenicidad para los seres humanos y *pruebas que no llegan a ser suficientes* de la carcinogenicidad para los animales de experimentación. Puede utilizarse también cuando hay *pruebas insuficientes* de la carcinogenicidad para los seres humanos pero *pruebas suficientes* de la carcinogenicidad para los animales de experimentación. En algunos casos, pueden clasificarse en este grupo un agente, una mezcla o unas circunstancias de exposición respecto de los cuales existen *pruebas insuficientes* de la carcinogenicidad para los seres humanos pero *pruebas limitadas* de la carcinogenicidad para los animales de experimentación, junto con otros elementos de juicio pertinentes que corroboran las pruebas.

Grupo 3. El agente (o la mezcla o las circunstancias de exposición) no puede clasificarse sobre la base de su carcinogenicidad para los seres humanos.

Esta categoría se utiliza sobre todo para los agentes, las mezclas y las circunstancias de exposición respecto de los cuales las pruebas de la carcinogenicidad son insuficientes para los seres humanos e insuficientes o limitadas para los animales de experimentación.

Excepcionalmente, se pueden clasificar en esta categoría los agentes (o las mezclas) respecto de los cuales las pruebas de carcinogenicidad son insuficientes para los seres humanos pero suficientes para los animales de experimentación, cuando existen también elementos de juicio sólidos que indican que el mecanismo de acción carcinógena que actúa en los animales de experimentación no existe en los seres humanos.

Se clasifican asimismo en esta categoría los agentes, las mezclas y las circunstancias de exposición que no quedan incluidos en otro grupo.

Grupo 4. El agente (o la mezcla) probablemente no es carcinógeno para los seres humanos.

Esta categoría se utiliza para los agentes o las mezclas respecto de los cuales *las pruebas parecen indicar una falta de carcinogenicidad* para los seres humanos y los animales de experimentación. En algunos casos, pueden clasificarse en este grupo los agentes o las mezclas respecto de los cuales se dispone de *pruebas insuficientes* de la carcinogenicidad para los seres humanos y de *pruebas que parecen indicar una falta de carcinogenicidad* para los animales de experimentación, corroboradas en forma firme y consistente por una amplia gama de otros elementos de juicio pertinentes.

• **COMPONENTES ORGANICOS**

1 ALCANOS CLORADOS

2 PLAGUICIDAS

- LOS PRODUCTOS DE LA DEGRADACION DE PLAGUICIDAS PEPRESENTAR UN PROBLEMA EN EL AGUA PARA CONSUMO HUMANO.

- NO SE TIENE GUIAS DE TOXICIDAD DE ESOS PRODUCTOS, YA QUE LOS DATOS DISPONIBLES SOBRE SU IDENTIDAD, SU PRESENCIA Y SU ACTIVIDAD BIOLOGICA SON INSUFICIENTES

En México

- En forma natural en los acuíferos de la Comarca Lagunera (estados de Coahuila y Durango)
- Concentraciones que exceden 15 veces los valores recomendados por la OMS .
- Población afectada de 400 mil campesinos.

Arsénico

- Elemento metálico de color gris.
- Nombre genérico de varios venenos como:
 - Trióxido de arsénico ($\text{As}_2 \text{O}_3$)
 - Pentóxido de As ($\text{As}_2 \text{O}_5$).
 - Arsenito de Na
 - Verde parís (mezcla de compuestos de As y Cu)
 - Arsenato básico de plomo
 - Acido cacodílico
- Compuestos muy tóxicos
- Relacionados con los pesticidas.
- Exposición crónica => a daños cardiacos.
síntomas: dolor abdominal, vómito, pérdida de apetito, debilidad, diarrea y estreñimiento alternados, neuritis, dermatitis y pérdida de cabello.
- Acción tóxica sobre enzimas.

El trióxido (arsénico blanco)

- polvo para matar roedores.

El arsenito de sodio comercial

- insecticida y herbicida
- mezcla de ortoarsenito de sodio ($\text{Na}_3 \text{AsO}_3$), metarsenito de sodio (NaAsO_2) y piroarsenito de sodio ($\text{Na}_4 \text{As}_2 \text{O}_5$).
- 5 a 50 mg provoca enfermedad
- 120 mg puede ocurrir la muerte.

- El problema

- * Se manifestó en 1953
- * Se detectó la fábrica responsable en 1959
- * Hasta 1968 los responsables admitieron culpabilidad.

Cadmio

- Se utiliza en galvanoplastia.
- peligroso para el ser humano a partir de 1 ppm.
- Se introduce en los cultivos por el riego con agua contaminada y por el empleo de tubería y tanques de almacenamiento galvanizados con zinc.
- primeros síntomas parecidos a los del reumatismo y de la neuritis.
 - * los huesos se ablandan y duelen mucho.
 - * ocurren fracturas y los pacientes se ven limitados a permanecer en cama.

Plomo

- Proviene de la contaminación atmosférica en zonas de alta densidad automovilística.
 - * El agua de lluvia puede contener hasta $40 \mu\text{g/l}$ y la bruma $300 \mu\text{g/l}$.
 - * El contenido de plomo en los océanos ha pasado de $0.01 \mu\text{g/lm}$ a 0.07 en 75 años.

Mercurio

- Su forma tóxica es el metil-mercurio que es sintetizado en la naturaleza y por el hombre a partir de mercurio inorgánico.
- Tóxico fuerte que se combina con las proteínas y las enzimas destruyendo el tejido celular y provocando parálisis.
- Afecta los sentidos y provoca la muerte.
- Dosis a partir de la cual comienzan los síntomas es de 0.5 ppm y se tienen problemas serios a partir de 6 ppm.
- Normalmente presente en el agua marina en dosis muy bajas -

- Las principales industrias contaminantes son:
 - * Papeleras que lo emplean para evitar el desarrollo de bacterias en la pulpa.
 - * Fábricas de tubos fluorescentes y de ciertos aparatos eléctricos.
 - * Fábricas de plásticos donde el Hg se emplea como catalizador.
 - * Fábricas de espejos y acabado de superficies.
 - * Industria farmacéutica.

EPISODIO AMBIENTAL

- Ocurrió en Minamata, Japón
- Muchos pescadores y gatos murieron debido a un proceso de concentración del Hg por medio de una cadena alimenticia.

METALES

ELEMENTOS DE LOS GRUPOS I, II, III, Y IV DE LA TABLA PERIODICA.

METALES DISUELTOS

CUANDO EL ANALISIS SE AFECTUA SOBRE EL FILTRADO A 0.45 M Y SIN ACIDIFICAR, EN CASO CONTRARIO SE HABLA DE METALES SUSPENDIDOS

METALES TOTALES

LA DETECCION EN UNA MUESTRA NO FILTRADA Y SUJETA A UN DIGESTION FUERTE

METALES EXTRACTABLES EN ACIDOS

DETERMINACION EFECTUADA EN UNA MUESTRA NO FILTRADA Y TRATADA CON UN ACIDO MINERAL CALIENTE

Grasas y aceites

- Técnica global que detecta las sustancias solubles en clorotrifluoretano
- Interferencias principales compuestos sulfurados y pigmentos como la clorofila.
- Se aplica para la medición de los hidrocarburos con temperatura de ebullición superior a 70° C.
- En aguas residuales es importante ya que puede inhibir el tratamiento biológico.

Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)

- Mide en forma global los detergentes aniónicos (alquil benceno sulfonato lineal) y los catiónicos.
- Determina las sustancias por con el azul de metileno

Hidrocarburos

- Principalmente en mares como resultado de la industria petrolera.
- Forman una película que impide la reoxigenación natural de agua y limita la capacidad autodepuradora
- Olor se percibe a partir de 0.001 mg/l.

En general PRODUCEN

- Espuma que impide el proceso natural o artificial de depuración y que además propician la diseminación de bacterias o virus.
- Disminuyen la solubilidad del oxígeno por formación de una película aislante de la superficie.
- Sabor a jabón para contenidos muy inferiores al de formación de espuma.
- Aumento de los polifosfatos que favorecen la eutroficación.
- Aumento del boro en el agua proveniente de los aditivos (perborato).

Detergentes

- Productos de fabricación reciente de mucho uso
- Contienen comúnmente entre 15 y 50% de sustancias tensioactivas
efecto de disminuir tanto la tensión superficial del agua (72 dinas/cm² a 60 o 50 dinas/cm) como la viscosidad (10% cda 50 mg/l).
- Son productos a la vez emulsionantes, espumantes y mojanter.

Existen tres tipos: aniónicos, catiónicos y no iónicos.

a) Aniónicos:

- * Más antiguos
- * tóxicos para peces en concentraciones superiores a 60 mg/l, rara vez son alcanzadas.
- * El más común es el aquil-benceno-sulfonato de sodio o ABS.
- * cadena ramificada muy resistente al ataque de microorganismos
- * El más actual es el LAS.

b) Catiónicos.

- * detergentes bactericidas
- * peligrosos aún en pequeñas concentraciones (del orden de mg/l))

c) No iónicos.

- * En general, a base de alquifenoles.

Demanda química de oxígeno

- DQO mide la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar materia orgánica con un oxidante fuerte ($K_2 Cr_2 O_4$) a altas temperaturas ($700^\circ C$) y condiciones ácidas
- No siempre guarda una relación con la DBO, aunque en general es mayor.
 - * en industria textil $DQO \gg DBO$, la celulosa es poco biodegradable
 - * En destilerías y refinerías puede suceder $DQO < DBO$ a menos que se modifique la prueba para impedir pérdida de volátiles
- Tarda aproximadamente 3 horas en laboratorio

Sustancias extractables con cloroformo

- ECC (sustancias extractables con cloroformo en filtro de carbono)
- Incluyen sustancias grasosas, solventes orgánicos, pinturas y cualquier otro desecho orgánico de tipo industrial que no es forzosamente biodegradable.
- Concentraciones de 0.2 mg/l provoca mal olor y sabor en agua potable.

Materia orgánica

DBO

COT

DQO

SECC

Demanda biológica de oxígeno

- Oxígeno que se requiere para que los microorganismos para degraden materia orgánica en el agua.

- Medición se realiza a 20° C y tarda 5 días.

- Se expresa en mgO_2 / L .

- No mide un compuesto en especial sino la biodegradabilidad de varios por vía aerobia.

- Algunos compuestos orgánicos que no producen DBO por ser tóxicos

- Agua potable DBO de 0.75 a 1.5 mgO_2 / L .

- Agua residual doméstica de 200 a 350

- Si la velocidad con la cual disminuye el OD es mayor a la tasa de disolución del oxígeno se disminuye la concentración de saturación, pudiendo alcanzar condiciones anaerobias.

Dureza

- Se debe a carbonatos, bicarbonatos y sulfatos de calcio y magnesio y en ocasiones de fierro y aluminio.

- Cantidad importante => el agua es dura

- * contiene sales incrustantes

- * dificulta la cocción de legumbres

- * impide la formación de espuma

- Dureza temporal a aquella que se elimina al hervir el agua

- Dureza permanente requiere métodos más sofisticados

Oxígeno disuelto

- Indicador de

- * el efecto producido por los contaminantes oxidables
- * la calidad del agua para mantener peces u otros organismos aerobios
- * la capacidad autodepuradora de un cuerpo receptor

- El OD disminuye al aumentar

- * salinidad
- * temperatura
- * altitud ($\sim 7\%$ cada 60 m).

- En agua residual la ausencia de oxígeno genera olores desagradables

- En agua de abastecimiento un exceso de oxígeno provoca corrosión.

Determinación mediante método electroquímico

- introducción directa de una sonda con ajuste a presión y temperatura dada.

- Cuando no se dispone de oxímetro se hace titulación del permanganto de potasio con la sal de Mohr (sulfato ferroso amoniacal).

Curva de pandeo del oxígeno

- Un desecho biodegradable en una corriente consume oxígeno disuelto proporcional a su concentración por acción de bacterias.

pH

- Cologaritmo de la concentración de los iones hidronio (H^+) en solución
- Define si una solución es ácida o alcalina
- escala de 1 a 14
- pH entre
 - 1 y 7 ácidas
 - de 7 a 14, alcalinas o básicas.
- Agua neutra pH de 7 a $24^{\circ} C$.

c) Sólidos filtrables.

- Sólidos que atraviezan el filtro corresponde a las sustancias solubles.

En cada una de las porciones anteriores se realiza el análisis de volatilidad (mufla a 550° C).

- material que se pierde por ignición corresponde al contenido orgánico

- material que permanece es inorgánico.

En la FIG 2.5 se muestra la clasificación completa de los tipos de sólidos que se pueden determinar mediante el método gravimétrico.

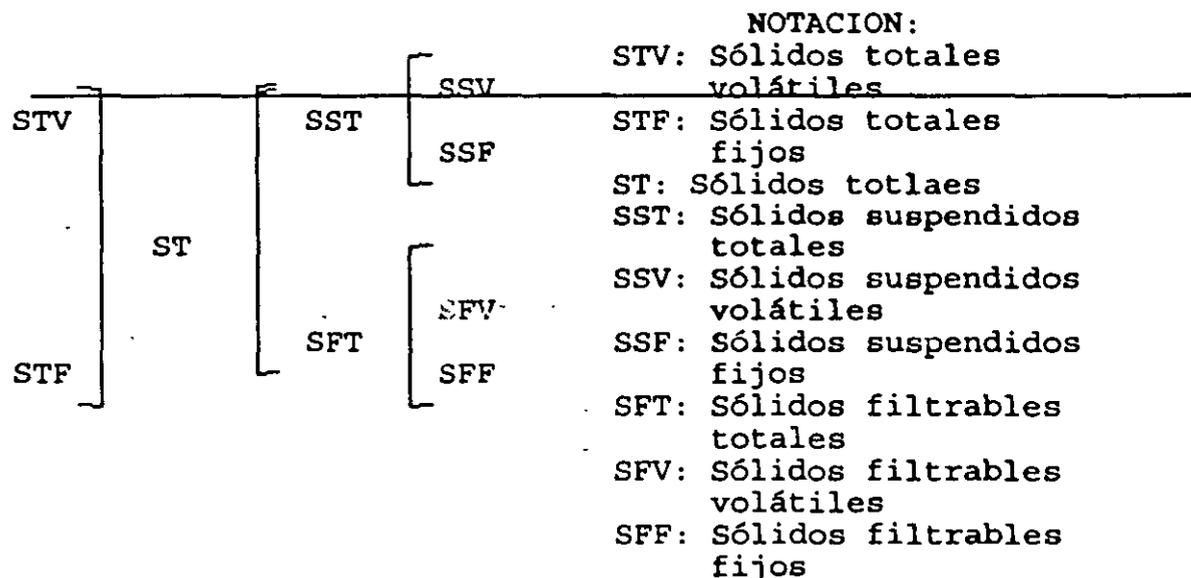


FIG. 2.5 Nueve formas en que se miden los sólidos contenidos en una agua por el método gravimétrico.

Compuestos químicos

Alcalinidad

- Hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y NH_4^+

* más comunes los de calcio y magnesio

- Se determina por titulación ácido (H_2SO_4 , 0.02N)

- Resultado como CaCO_3

- Expresa la capacidad que tiene un agua para mantener su pH cuando se le añade una solución ácida o alcalina.

pH

- Se determina mediante un electrodo de vidrio.

- El cologaritmo de la concentración de los iones hidrónio (H^+).

- Parámetro de operación para procesos biológicos y físico-químicos de agua potable y residual.

- Medición de sólidos por gravimetría

- Evalúa compuestos muy variados (prueba global)

* incluye sales inorgánicas (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, fosfatos y nitratos de sodio, potasio y trazas de calcio, magnesio, fierro) y materia orgánica.

* mide a los responsables de la dureza, tóxicos y materiales necesarios para la vida.

a) Sólidos sedimentables.

- Volumen retenido en 45 min en cono Imhoff después de 45 min de decantación

- Representan la fracción de los contaminantes que serán fácilmente removidos por desarenación o sedimentación primaria.

FIG. Cono Imhoff

b) Sólidos suspendidos.

- Sólidos retenidos al pasar el agua a través de un filtro con apertura de poro de $0.47 \mu\text{m}$.

Turbiedad

- Sólidos en suspensión

- Los sólidos reflejan parte de la luz que incide

pérdida de luminiscencia en línea recta se le denomina turbiedad.

- Idea del contenido de materia coloidal y suspendida

- Muchas unidades (UTJ, sílice, etc.) se debe emplear UTN (Unidades técnicas de nefelometría).

- Agua potable: 5 UTN

Residual doméstica : entre 100 y 150 UTN.

Sólidos

- Residuo después de la evaporar el agua a 103°C.

FIG 2.2. Como se presenta la materia en el agua

- A medida que disminuye el tamaño es más complicada la técnica de separación (FIG 2.3).

FIG 2.3. Clasificación y tamaño de las partículas encontradas en el agua residual.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

TEMA :

MARCO NORMATIVO

**BIOL. HÉCTOR LESSER HIRIART
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE – OCTUBRE 1999**

INSTRUCTIVO PARA LA FORMULACION DEL INFORME PREVENTIVO AL QUE SE REFIEREN LOS ARTICULOS 7º Y 8º DEL REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE EN MATERIA DE IMPACTO AMBIENTAL

I. Datos generales

Contestar las preguntas que a continuación se presentan en forma clara y concreta:

1. Nombre de la empresa u organismo solicitante.
2. Nombre y puesto del responsable del proyecto.
3. Nacionalidad de la empresa.
4. Actividad principal de la empresa u organismo.
5. Domicilio para oír y recibir notificaciones.
6. Cámara o asociación a la que pertenece la empresa u organismo, indicando:
 - Número de registro.
 - Fecha de ingreso.
 - Registro Federal de Causantes.

Ubicación y descripción general de la obra o actividad proyectada, indicando:

1. Nombre del proyecto.
2. Naturaleza del proyecto (descripción general del proyecto, indicando la capacidad proyectada y la inversión requerida).
3. Vida útil del proyecto.
4. Programa de trabajo.
5. Ubicación física del proyecto. Anexar plano de distribución de la planta y plano de localización del predio, especificando:
 - Estado.
 - Municipio.
 - Localidad.
 - Localización.
6. Situación legal del predio.
7. Superficie requerida (ha, m).
8. Colindancia del predio y actividad que se desarrolla.
9. Obra civil desarrollada para preparación del terreno.
10. Vías de acceso (marítimas y terrestres).
11. Vinculación con las normas y regulaciones sobre uso del suelo en el área correspondiente.
12. Requerimientos de mano de obra.
13. Obras o servicios de apoyo a utilizar en las diferentes etapas del proyecto.
14. Sitios alternativos para el desarrollo de la obra o actividad.

III. Descripción del proceso

1. Materiales y sustancias que serán utilizados en las etapas de preparación del sitio, construcción y mantenimiento de la obra o actividad proyectada. *Enlistar e indicar volúmenes.*

2. Equipo requerido para las etapas de preparación de sitio, construcción, operación y mantenimiento de la obra u actividad proyectada. *Enlistar e indicar capacidad instalada.*

3. Recursos naturales del área que serán aprovechados en las diferentes etapas. *Especificar.*

4. En caso de una industria de transformación y/o extractiva:

- Indicar las sustancias o materiales que serán utilizados en el proceso.
- Enlistar los productos finales.

5. Fuente de suministro de energía eléctrica y o combustible.

6. Requerimientos de agua cruda y potable, y fuente de suministro.

7. Residuos que serán generados en las diferentes etapas del proyecto, y destino final de los mismos.

- Emisiones a la atmósfera.
- Descarga de aguas residuales.
- Residuos sólidos.
- Emisiones de ruido.
- Otro.

INSTRUCTIVO PARA DESARROLLAR Y PRESENTAR LA MANIFESTACION DE IMPACTO AMBIENTAL EN LA MODALIDAD GENERAL A QUE SE REFIEREN LOS ARTICULOS 9º Y 10º DEL REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE EN MATERIA DE IMPACTO AMBIENTAL

I. Datos generales

Contestar las preguntas que a continuación se presentan, en forma clara y concreta.

1. Nombre de la empresa u organismo solicitante.
2. Nacionalidad de la misma.
3. Actividad principal de la empresa u organismo.
4. Domicilio para oír y recibir notificaciones, indicando:
 - Estado.
 - Municipio.
 - Código postal.
 - Ciudad.
 - Localidad.
 - Teléfono.
5. Cámara o asociación a la que pertenece.

5.1. Registro en la Cámara, indicando:

- Número.
- Fecha.

6. Registro Federal de Causantes.

7. Responsable de la elaboración del estudio de impacto ambiental, indicando:

- Nombre.
- Razón social.
- Registro SEDUE.

7.1. Registro Federal de Causantes.

7.2. Domicilio para oír y recibir notificaciones. y teléfono.

II. Descripción de la obra o actividad proyectada

En esta sección se solicita información de carácter general de la obra o actividad, con la finalidad de configurar una descripción general de la misma; asimismo se solicita información específica de cada etapa, con el objetivo de obtener los elementos necesarios para la evaluación del impacto (positivo o negativo) de la obra o actividad.

1. Descripción general.

1.1. Nombre del proyecto.

1.2. Naturaleza del proyecto. Explicar en forma general el tipo de obra o actividad que se desea llevar a cabo, especificando el volumen de producción —si se trata de una industria—, la capacidad proyectada y la inversión requerida.

1.3. Objetivos y justificación del proyecto. El solicitante debe dejar en claro las causas que motivaron la realización de la obra o actividad y los beneficios económicos, sociales y de otro tipo que ésta contemple.

1.4. Programa de trabajo. En este punto se debe anexar la calendarización de cada etapa, indicando la fecha de inicio de actividades.

1.5. Proyectos asociados. Explicar si en el desarrollo de la obra o actividad se requerirá de otros proyectos.

1.6. Políticas de crecimiento a futuro. Explicar en forma general la estrategia a seguir por la empresa indicando ampliaciones, futuras obras o actividades que pretenderán desarrollarse en la zona.

2. Etapa de selección del sitio.

En este apartado se solicita información referente a las características del lugar en que se desarrollará la obra o actividad, así como de los alrededores de la zona.

2.1. Ubicación física del proyecto. Anexar plano de localización del predio, indicando las coordenadas en las que se sitúa.

- Estado.
- Municipio.
- Localidad.

2.2. Urbanización del área. Aclarar si el predio se sitúa en una zona urbana, suburbana o rural.

2.3. Criterios de elección del sitio. Mencionar estudios realizados para la selección.

2.4. Superficie requerida (ha, m²).

2.5. Uso actual del suelo en el predio. Mencionar el tipo de actividad que se desarrolla.

2.6. Colindancias del predio. Mencionar la orientación de cada predio, indicando la principal actividad que en ellos se desarrolle.

2.7. Situación legal del predio. Compra, venta, concesión, expropiación, otro.

2.8. Vías de acceso al área donde se desarrollará la obra o actividad. En el caso de proyectos relacionados con cuerpos de agua señalar las rutas de navegación que se utilizarán.

2.9. Sitios alternativos que hayan sido o estén siendo evaluados. Indicar su ubicación regional, municipal, local, otra.

3. Etapa de preparación del sitio y construcción.

En este apartado se solicitará información relacionada con las actividades de preparación del sitio previas a la construcción, así como las actividades relacionadas con la construcción misma de la obra o con el desarrollo de la actividad.

— Se deben anexar los planos gráficos del proyecto y el sistema constructivo, así como la memoria técnica del proyecto, esto último en forma breve.

3.1. Programa de trabajo. Presentar en forma gráfica (v. gr. GANTT) fechas de inicio y finalización de la preparación del sitio y construcción, indicando además las principales actividades que se desarrollarán en estas etapas con su respectiva calendarización.

3.2. Preparación del terreno. Indicar si para la preparación del terreno se requerirá de algún tipo de obra civil (desmontes, nivelaciones, relleno, despiebre, desecación de lagunas, otros). En caso de que así sea, especificar:

3.2.1. Recursos que serán alterados.

3.2.2. Área que será afectada: localización.

3.3. Equipo utilizado. Señalar el tipo de maquinaria que se utilizará durante la etapa de preparación del sitio y construcción, especificando la cantidad y operación por unidad de tiempo.

3.4. Materiales. Enlistar los materiales que se utilizarán en ambas etapas, especificando el tipo, volumen y forma de traslado del mismo.

— En caso de que se utilicen recursos de la zona (bancos de materiales, madera u otros), indicar cantidad.

3.5. Obras y servicios de apoyo. Indicar las obras provisionales y los servicios necesarios para la etapa de preparación del terreno, y para la construcción (construcción de caminos de acceso, puentes provisionales, campamentos, otros).

3.6. Personal utilizado. Especificar el número de trabajadores que serán empleados, y su tiempo de ocupación.

37. Requerimientos de energía.

37.1. Electricidad. Indicar origen, fuente de suministro, potencia y voltaje.

37.2. Combustible. Indicar origen, fuente de suministro, cantidad que será almacenada y forma de almacenamiento.

38. Requerimientos de agua. Especificar si se trata de agua cruda o potable, indicando el origen, volumen, traslado y forma de almacenamiento.

39. Residuos generados. Indicar el tipo o tipos de residuos que se generarán durante la etapa de preparación del sitio y la de construcción.

3.10. Desmantelamiento de la infraestructura de apoyo. Indicar el destino final de las obras y servicios de apoyo empleados en esta etapa.

4. Etapa de operación y mantenimiento.

La información que se solicita en este apartado, corresponde a la etapa de operación del proyecto, y a las actividades de mantenimiento necesarias para el buen funcionamiento del mismo. Las preguntas 4, 5 y 6 deben ser contestadas en caso de que el proyecto esté relacionado con la industria de la transformación y/o extractiva.

4.1. Programa de operación. Anexar un diagrama de flujo. Las industrias de la transformación y extractivas agregar una descripción de cada uno de los procesos.

4.2. Recursos naturales del área que serán aprovechados. Indicar tipo, cantidad y su procedencia.

4.3. Requerimientos de personal. Indicar la cantidad total del personal que será necesario para la operación, especificando turnos.

— Los puntos del 4 al 6 sólo deberán ser contestados por proyectos relacionados con la industria de la transformación y/o extractiva.

4.4. Materias primas e insumos por fase de proceso:

— Indicar tipo y cantidad de los mismos, considerando las sustancias que sean utilizadas para el mantenimiento de la maquinaria.

4.4.1. Subproductos por fase de proceso.

— Indicar tipo y volumen aproximado.

4.4.2. Productos finales.

— Indicar tipo y cantidad estimada.

4.5. Forma y características de transportación de:

Materias primas.

Productos finales.

Subproductos.

4.6. Forma y características de almacenamiento de:

Materias primas.

Productos finales.

Subproductos.

4.6.1. Medidas de seguridad. Indicar las que serán adoptadas.

4.7. Requerimientos de energía.

4.7.1. Electricidad.

— Indicar voltaje y fuente de aprovechamiento.

4.7.2. Combustible.

— Indicar tipo, origen, consumo por unidad de tiempo y forma de almacenamiento.

4.8. Requerimientos de agua.

— Indicar cantidad y origen, asimismo reportar los requerimientos excepcionales que vayan a ser utilizados y su periodicidad aproximada, plantear otras fuentes alternativas de abasto.

	Consumo ordinario		Consumo excepcional	
	Volumen	Origen	Volumen	Periodicidad
Agua potable	_____	_____	_____	_____
Agua tratada	_____	_____	_____	_____
Agua cruda	_____	_____	_____	_____

4.9. Residuos. Indicar el tipo de residuos que serán generados, especificando el volumen.

— Emisiones a la atmósfera. Indicar si son gaseosos, humos o partículas.

— Descarga de aguas residuales. Indicar aspectos físicos, químicos y bioquímicos.

— Residuos sólidos industriales. Describir sus componentes, y si se encuentran en estado húmedo o seco.

— Residuos sólidos domésticos.

— Residuos agroquímicos. Indicar tipo y período de vida de sus componentes.

— Otros.

4.10. Factibilidad de reciclaje.

— Indicar si es factible el reciclaje de los residuos que reporta.

4.11. Disposiciones de residuo.

— Especificar forma de manejo y características del cuerpo receptor.

4.12. Niveles de ruido.

— Indicar intensidad (en dB) y duración del mismo.

4.13. Posibles accidentes y planes de emergencia.

— Describa en forma detallada.

5. Etapa de abandono de sitio.

— En este apartado deberá describir el destino programado para el sitio y sus alrededores, al término de las operaciones, y se deberá especificar:

5.1. Estimación de vida útil.

5.2. Programas de restitución del área.

5.3. Planes de uso del área al concluir la vida útil del proyecto.

III. Aspectos generales del medio natural y socio-económico

Medio natural.

— En esta sección se deberá describir el medio natural resaltando aquellos aspectos que se consideren particularmente importantes por el grado de afectación que provocaría el desarrollo del proyecto. Como apoyo será necesario anexar una serie de fotografías que muestren al área del proyecto y su zona circundante.

I. Rasgos físicos

1. Climatología.

1.1. Tipo de clima:

— Considerar la clasificación de Köppen modificada por E. García para la República Mexicana.

1.2. Temperaturas promedio.

1.3. Precipitación promedio anual (mm).

1.4. Intemperismos severos.

— Indicar frecuencia de intemperismos, p. ej. huracanes, heladas, granizadas o algún otro.

1.5. Altura de la capa de mezclado del aire. Sólo en caso de información disponible.

1.6. Calidad del aire. Sólo en caso de información disponible.

2. Geomorfología y geología.

2.1. Geomorfología general. Elaborar una síntesis en la que se describa, en términos generales, las características geomorfológicas más importantes. Especificar si existen bancos de material, su ubicación y estado actual.

2.2. Descripción breve de las características del relieve.

2.3. Susceptibilidad de la zona a:

- Sismicidad.
- Deslizamientos.
- Derrumbes.
- Otros movimientos de tierra o roca.
- Posible actividad volcánica.

3. Suelos:

3.1. Tipo de suelos presentes en el área y zonas aledañas.

3.2. Composición del suelo. (Clasificación de FAO.)

3.3. Capacidad de saturación.

4. Hidrología (rango de 10 a 15 km).

4.1. Principales ríos o arroyos cercanos:

- Permanentes o intermitentes.
- Estimación del volumen de escurrimiento por unidad de tiempo.
- Actividad para la que son aprovechados.
- Indicar si reciben algún tipo de residuo.

4.2. Embalses y cuerpos de agua cercanos (lagos, presas, etc.).

Localización y distancia al predio.

Area inundable del cuerpo de agua o embalse (ha).

· Volumen (mm³).

· Usos principales.

4.3. Drenaje subterráneo.

- Profundidad y dirección.
- Usos principales (agua, riego, etc.).
- Cercanía del proyecto a pozos.

— En caso de extracción, consultar si el agua está siendo explotada, subexplotada, etc.

5. Oceanografía. (Si el proyecto se asocia a un área de influencia marina, presentar la siguiente información.)

5.1. Batimetría:

- Bancos.
- Composición de sedimentos.
- Arrecifes o bajos fondos.

5.2. Ciclo de mareas.

5.3. Corrientes.

5.4. Temperatura promedio del agua.

II. Rasgos biológicos

Presentar la información de acuerdo con los alcances del proyecto (en una zona terrestre, marina o ambas).

1. Vegetación.

1.1. Tipo de vegetación de la zona.

1.2. Principales asociaciones vegetacionales y distribución.

1.3. Mencionar especies de interés comercial.

1.4. Señalar si existe vegetación endémica y/o en peligro de extinción.

2. Fauna.

2.1. Fauna característica de la zona.

2.2. Especies de valor comercial.

2.3. Especies de interés cinegético.

2.4. Especies amenazadas o en peligro de extinción.

3. Ecosistema y paisaje.

Responder las siguientes preguntas colocando "SI" o "NO" al final de éstas. En caso de que la respuesta sea afirmativa, explique en términos generales la forma en que la obra o actividad incidirá.

3.1. ¿Modificará la dinámica natural de algún cuerpo de agua?

3.2. ¿Modificará la dinámica natural de las comunidades de flora y fauna?

3.3. ¿Crearé barreras físicas que limiten el desplazamiento de la flora y/o fauna?

3.4. ¿Se contempla la introducción de especies exóticas?

3.5. Explicar si es una zona considerada con cualidades estéticas únicas o excepcionales.

3.6. ¿Es una zona considerada con atractivo turístico?

3.7. ¿Es o se encuentra cerca de un área arqueológica o de interés histórico?

3.8. ¿Es o se encuentra cerca de un área natural protegida?

3.9. ¿Modificará la armonía visual con la creación de un paisaje artificial?

3.10. ¿Existe alguna afectación en la zona? Explique en qué forma y su grado actual de degradación?

III. Medio socioeconómico.

En este apartado se solicitará información referente a las características sociales y económicas del sitio seleccionado y sus alrededores.

1. Población.

Proporcionar en forma concisa los siguientes datos:

- . Población económicamente activa.
- . Grupos étnicos.
- . Salario mínimo vigente.
- . Nivel de ingresos per cápita.

2. Servicios.

Indicar con una cruz si el sitio seleccionado y sus alrededores cuenta con los siguientes servicios:

2.1. Medios de comunicación.

- Vías de acceso. Indicar sus características y su distancia al predio.
- Teléfono.
- Telégrafo.
- Correo.
- Otros.

2.2. Medios de transporte.

- Terrestres.
- Aéreos.
- Marítimos.
- Otros.

2.3. Servicios públicos.

- Agua (potable, tratada).
- Energéticos (combustibles).
- Electricidad.
- Sistema de manejo de residuos. Especificar su tipo y distancia al predio.
 - . Drenaje.
 - . Canales de desagüe.
 - . Tiradero a cielo abierto.
 - . Basurero municipal.
 - . Relleno sanitario.
 - . Otros.

2.4. Centros educativos.

- Enseñanza básica.
- Enseñanza media.
- Enseñanza media superior.
- Enseñanza superior.
- Otros.

2.5. Centros de salud. Indicar su distancia al predio.

- De 1er. grado.
- De 2o. grado.

2.6. Vivienda. Indicar el tipo de vivienda predominante por su tipo de material de construcción y su distancia al predio.

- Madera.
- Adobe.
- Tabique.

2.7. Zonas de recreo.

- Parques.
- Centros deportivos.
- Centros culturales (cine, teatro, museos, monumentos nacionales).

3. Actividades.

Indicar con una cruz el tipo de actividad predominante en el área seleccionada y su alrededor.

3.1. Agricultura:

- De riego.
- De temporal.
- Otras.

3.2. Ganadería:

- Intensiva.
- Extensiva.
- Otras.

3.3. Pesca:

- Intensiva.
- Extensiva.
- Otras.

3.4. Industriales:

- Extractiva.
- Manufacturera.
- De servicios.

4. Tipo de economía.

Indicar con una cruz a cuál de las siguientes categorías pertenece el área en que se desarrollará el proyecto.

- Economía de autoconsumo.
- Economía de mercado.
- Otras.

5. Cambios sociales y económicos.

Especificar con una cruz si la obra o actividad creará:

- Demanda de mano de obra.
- Cambios demográficos (migración, aumento de la población).
- Aislamiento de núcleos poblacionales.
- Modificación en los patrones culturales de la zona.
- Demanda de servicios:
 - . Medios de comunicación.
 - . Medios de transporte.
 - . Servicios públicos.

- . Zonas de recreo.
- . Centros educativos.
- . Centros de salud.
- . Vivienda.

IV. Vinculación con las normas y regulaciones sobre uso del suelo

En este apartado el solicitante deberá consultar a la Secretaría de Desarrollo Urbano Estatal o Federal para verificar si el uso que pretende darse al suelo corresponde al establecido por las normas y regulaciones.

Los elementos que deberán considerarse son:

1. Plan Director Urbano, correspondiente a la Dirección General de Desarrollo Urbano.
2. Planes o Programas Ecológicos del Territorio Nacional, correspondientes a la Dirección General de Normatividad y Regulación Ecológica.
3. Sistema Nacional de Áreas Protegidas, a cargo de la Dirección General de Conservación Ecológica de los Recursos Naturales.

V. Identificación de impactos ambientales

En esta sección se deberán identificar y describir los impactos ambientales provocados por el desarro-

llo de la obra o actividad durante las diferentes pas. Para ello, se puede utilizar la metodología que más convenga al proyecto.

VI. Medidas de prevención y mitigación de los impactos ambientales identificados

En este apartado el proponente dará a conocer las medidas y acciones a seguir por el organismo interesado, con la finalidad de prevenir o mitigar los impactos que la obra o actividad provocará en cada etapa de desarrollo del proyecto.

Las medidas y acciones deben presentarse en forma de programa en el que se precisen el impacto potencial y la(s) medida(s) adoptada(s) en cada una de las etapas:

Conclusiones

Finalmente, con base en una autoevaluación integral del proyecto, el solicitante deberá realizar un balance (impacto desarrollo) en donde se discutirán los beneficios que genere el proyecto y su importancia en la economía local, regional o nacional, y la influencia del proyecto en la modificación de los procesos naturales.

Referencias

En este punto indicar aquellas fuentes que hayan sido consultadas para la resolución de este estudio.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente establece, en su artículo 146, que deberán publicarse en el D.O.F. los listados de las actividades consideradas altamente riesgosas, lo cual ha ocurrido en dos ocasiones: el 28 de marzo de 1990 y el 4 de mayo de 1992.

El Primer Listado se publicó en la Gaceta Ecológica #9 y el Segundo nunca ha aparecido en sus páginas. Con el propósito de difundir y mantener actualizada a la sociedad en general y, en particular, al sector industrial, presentamos ambos Listados. Un elemento adicional que muestra su importancia es que están siendo utilizados como referencia en el Programa de Desregulación y Simplificación de Trámites a la Industria en Materia de Impacto Ambiental.

PRIMER LISTADO DE ACTIVIDADES ALTAMENTE RIESGOSAS

ACUERDO por el que las Secretarías de Gobernación y Desarrollo Urbano y Ecología, con fundamento en lo dispuesto por los Artículos 5o. Fracción X y 146 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 27 Fracción XXXII y 37 Fracciones XVI y XVII de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, expide el primer listado de actividades altamente riesgosas.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice Estados Unidos Mexicanos. Secretaría de Gobernación.

ACUERDO POR EL QUE LAS SECRETARIAS DE GOBERNACION Y DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA, CON FUNDAMENTO EN LO DISPUESTO POR LOS ARTICULOS 5o. FRACCION X Y 146 DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE; 27 FRACCION XXXII Y 37 FRACCIONES XVI Y XVII DE LA LEY ORGANICA DE LA ADMINISTRACION PUBLICA FEDERAL, EXPIDEN EL PRIMER LISTADO DE ACTIVIDADES ALTAMENTE RIESGOSAS.

CONSIDERANDO

Que la regulación de las actividades que se consideren altamente riesgosas por la magnitud o gravedad de los efectos que puedan generar en el equilibrio ecológico o el ambiente, está contemplada en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, como asunto de alcance general de la nación o de interés de la Federación y se prevé que una vez hecha la determinación de las mismas, se publicarán los listados correspondientes.

Que el criterio adoptado para determinar cuáles actividades deben considerarse como altamente riesgosas, se fundamenta en que la acción o conjunto de acciones, ya sean de origen natural o antropogénico, estén asociadas con el manejo de sustancias con propiedades inflamables, explosivas, tóxicas, reactivas, radioactivas, corrosivas o biológicas, en cantidades tales que, en caso de producirse una liberación, sea por fuga o derrame de las mismas o bien una explosión, ocasionaría una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

Que por lo tanto, se hace necesario determinar la cantidad mínima de las sustancias peligrosas con las propiedades antes mencionadas, que en cada caso, convierte su producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final, en actividades que, de producirse una liberación, sea por fuga o derrame de las mismas, vía atmosférica, provocarían la presencia de límites de concentración superiores a los permisibles, en un área determinada por una franja de 100 metros en torno de las instalaciones, o medios de transporte, y en el caso de la formación de nubes explosivas, la existencia, de ondas de sobrepresión. A esta cantidad mínima de sustancia peligrosa, se le denomina cantidad de reporte.

Que en consecuencia, para la determinación de las actividades consideradas altamente riesgosas, se partirá de la clasificación de las sustancias peligrosas, en función de sus propiedades, así como de las cantidades de reporte correspondiente.

Que cuando una sustancia presente más de una de las propiedades señaladas, está se clasificará en fun-

ción de aquella ó aquéllas que presenten el o los más altos grados potenciales de afectación al ambiente, a la población o a sus bienes y aparecerá en el listado o listados correspondientes.

Que mediante este Acuerdo se expide el primer listado de actividades altamente riesgosas y que corresponde a aquéllas en que se manejan sustancias tóxicas. En dicho listado quedan exceptuadas en forma expresa el uso y aplicación de plaguicidas con propiedades tóxicas, en virtud de que existe una legislación específica para el caso, en la que se regula esta actividad en lo particular.

Que este primer listado y los subsecuentes que se expidan, para el caso de aquellas actividades asociadas con el manejo de sustancias inflamables, explosivas, reactivas, corrosivas o biológicas, éstas constituirán el sustento para determinar las normas técnicas de seguridad y operación, así como para la elaboración de los programas para la prevención de accidentes, previstos en el artículo 147 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, mismos que deberán observarse en la realización de dichas actividades. Que cuando las actividades asociadas con el manejo de sustancias con propiedades radioactivas, podrían considerarse altamente riesgosas, las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología no establecerán un listado de las mismas, en virtud de que la expedición de las normas de seguridad nuclear, radiológica y física de las instalaciones nucleares o radioactivas compete a la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal y a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, con la participación que en su caso corresponda a la Secretaría de Salud, de conformidad con los dispuesto por la legislación que de manera específica regula estas actividades.

Que las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología, previa opinión de las Secretarías de Energía, Minas e Industria Paraestatal, de Comercio y Fomento Industrial, de Salud, de Agricultura y Recursos Hidráulicos y del Trabajo y Previsión Social, llevaron a cabo los estudios que sirvieron de sustento para determinar los criterios y este primer listado de actividades que deben considerarse altamente riesgosas.

En mérito de lo anterior, hemos tenido a bien dictar el siguiente:

ACUERDO

ARTICULO 1o.- Se considerará como actividad altamente riesgosa, el manejo de sustancias peligrosas en un volumen igual o superior a la cantidad de reporte.

ARTICULO 2o.- Para los efectos de este ordenamiento se considerarán las definiciones contenidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y las siguientes:

Cantidad de reporte: Cantidad mínima de sustancia peligrosa en producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final, o la suma de éstas, existentes en una instalación o medio de transporte dados, que al ser liberada, por causas naturales o derivadas de la actividad humana, ocasionaría una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

Manejo: Alguna o el conjunto de las actividades siguientes; producción, procesamiento, transporte, almacenamiento uso o disposición final de sustancias peligrosas.

Sustancia peligrosa: Aquella que por sus altos índices de inflamabilidad, explosividad, toxicidad, reactividad, radioactividad, corrosividad o acción biológica puede ocasionar una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

Sustancia tóxica: Aquella que puede producir en organismos vivos, lesiones, enfermedades, implicaciones genéticas o muerte.

ARTICULO 3o.- Con base en lo previsto en el artículo primero, se expide el primer listado de actividades altamente riesgosas, que corresponde a aquéllas en que se manejen sustancias tóxicas. Estas actividades son la producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final de las sustancias que a continuación se indican, cuando se manejen volúmenes iguales o superiores a las cantidades de reporte siguientes:

I. Cantidad de reporte: a partir de 1kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

Acido cianhídrico
Acido fluorhídrico-(fluoruro de hidrógeno)
Arsina
Cloruro de hidrógeno
Cloro (1)
Diborano
Dióxido de nitrógeno
Flúor
Fosgeno
Hexafluoruro de telurio
Oxido nítrico
Ozono(2)
Seleniuro de hidrógeno
Tetrafluoruro de azufre
Tricloruro de boro

b) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acroleína
Alil amina
Bromuro de propargilo
Butil vinil éter
Carbonilo de níquel
Ciclopentano
Clorometil metil eter
Cloruro de metacrilato
Dioxolano
Disulfuro de metilo
Fluoruro cianúrico
Furano
Isocianato de metilo
Metil hidracina
Metil vinil cetona
Pentaborano
Sulfuro de dimetilo
Tricloroetil silano

c) En el caso de las siguientes sustancias en estado sólido:

2 Clorofenil tiourea
2,4 Ditiobiuret
4,6 Dinitro-cresol
Acido becen arsénico
Acido cloroacético
Acido fluoroacético
Acido metil-carbamilo
Acido tiocianico 2-benzotiánico
Aldicarb
Arseniato de calcio
Bis clorometil cetona
Bromodiolona

Carbofurano (furadán)
Carbonilos de cobalto
Cianuro de potasio
Cianuro de sodio
Cloroplatinato de amonio
Cloruro crómico
Cloruro de dicloro benzalkonio
Cloruro platinoso
Cobalto
Cobalto (2,2-(1,2-etano)
Complejo de organorodio
Decaborano
Dicloro xileno
Difacionona
Didisocianato de isoforona
Dimetil-p-fenilendiamina
Dixitoxin
Endosulfan
Epn
Estereato de cadmio
Estricnina
Fenamifos
Fenil tiourea
Fluoroacetamida
Fósforo (rojo, amarillo y blanco)
Fósforo de zinc
Fosmet
Hexacloro naftaleno
Hidruro de litio
Metil anzifos
Metil paration
Monocrotofos (azodrín)
Oxido de cadmio
Paraquat
Paraquat-metasulfato
Pentadecilamina
Pentóxido de arsénico
Pentóxido de fósforo
Pentóxido de vanadio
Pireno
Piridina, 2 metil, 5 vinil
Seleniato de sodio
Sulfato de estricnina
Sulfato taloso
Sulfato de talio
Tetracloruro de iridio
Tetracloruro de platino
Tetraóxido de osmio
Tiosemicarbazida
Triclorofón
Trióxido de azufre

II. Cantidad de reporte: a partir de 10 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

Acido sulfhídrico
Amoniaco anhidro
Fosfina
Metil mercaptano
Trifluoruro de boro

b) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

1,2,3,4 diepoxibutano
2.cloroetanol
Bromo
Cloruro de acrililo
1 Sulfuro
Mesitylileno
Oxocloruro fosforoso
Pentacarbonilo de fierro
Propionitrilo
Pseudocumeno
Tetracloruro de titanio
Tricloro (clorometil) silano
Vinil norborneno

c) En el caso de las siguientes sustancias en estado sólido:

Acetato de metoxietilmercurio
Acetato fenil mercurico
Acetato mercurico
Arsenito de potasio
Arsenito de sodio
Azida de sodio
Bromuro cianogeno
Cianuro potásico de plata
Cloruro de mercurio
Cloruro de talio
Fenol
Fosfato etilmercurico
Hidroquinona
Isotiosianato de metilo
Lindano
Malonato taloso
Malononitrilo
Níquel metálico
Oxido mercurico
Pentaclorofenol
Pentacloruro de fósforo

Salcomina
Selenito de sodio
Telurio
Telurito de sodio
Tiosemicarbacida acetona
Tricloruro de galio
Warfarin

III. Cantidad de reporte: a partir de 100 Kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en el estado gaseoso:

Bromuro de metilo
Etano (3)
Oxido de etileno

b) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

2,6-Diisocianato de tolueno
Acetaldehido (3)
Acetato de vinilo
Acido nítrico
Acrilonitrilo
Alcohol alílico
Beta propiolactona
Cloroacetaldehido
Crotonaldehido
Disulfuro de carbono
Eter bis-cloro metílico
Hidracina
Metil tricloro silano
Nitrosodimetilamina
Oxido de propileno
Pentacloroetano
Pentafluoruro de antimonio
Perclorometil mercaptano
Piperidina
Propilnitrimina
Tetrametilo de plomo
Tetranitrometano
Tricloro benceno
Tricloruro de arsénico
Trietoxisilano
Trifluoruro de boro

c) En el caso de las siguientes sustancias en estado sólido:

Acido cresílico
Acido selenioso
Acrilamida

Carbonato de talio
Metomil
Oxido tálico
Yoduro cianógeno

Tiocianato de etilo
Tolueno (3)

IV. Cantidad de reporte: a partir de 1,000 Kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

Butadieno

b) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acetonitrilo
Benceno (3)
Cianuro de bencilo
Cloroformo
Cloruro de benzal
Cloruro de bencilo
2,4-Diisocianato de tolueno
Epiclorohidrina
Isobutironitrilo
Oxícloruro de selenio
Peroxido de hidrógeno
Tetracloruro de carbono (3)
Tetraetilo de plomo
Trimetilcloro silano

V. Cantidad de reporte: a partir de 10,000 Kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

2,4,6 Trimetil anilina
Anilina
Ciclohexilamina
Cloruro de bencen sulfonilo
Diclorometil fenil silano
Etilen diamina
Forato
Formaldehido cianohidrina
Gas mostaza: sinónimo (sulfato de bis 2-cloroetilo)
Hexacloro ciclo pentadieno
Lactonitrilo
Mecloretamina
Metanol
Oleum
Sulfato de dimetilo

VI. Cantidad de reporte: a partir de 100,000 Kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

1,1-Dimetil hidracina
Anhídrido metacrílico
Cumeno
Diclorvos
Eter dicloroetílico
Eter diglicídico
Fenil dicloro arsina
Nevinfos (fosforín)
Octametil difosforamida
Tricloro fenil silano

VII. Cantidad de reporte: a partir de 1,000,000 kg

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Adiponitrilo
Clordano
Dibutilftalato
Dicrotofós (bidrín)
Dimetil 4 ácido fosfórico
Dimetilftalato
Dioctilftalato
Fosfamidón
Metil-5-Dimetón
Nitrobenceno
Tricloruro fosforoso

(1) Se aplica exclusivamente a actividades industriales y comerciales.

(2) Se aplica exclusivamente a actividades donde se realicen procesos de ozonización.

(3) En virtud de que esta sustancia presenta además propiedades explosivas o inflamables, también será considerada, en su caso, en el proceso para determinar los listados de actividades altamente riesgosas, correspondientes a aquellas en que se manejen sustancias explosivas o inflamables.

ARTICULO 40.- Se exceptúa del listado de actividades altamente riesgosas, previsto en el artículo

anterior, el uso o aplicación de plaguicidas con propiedades tóxicas.

ARTICULO 5o.- Para efectos del presente Acuerdo, se entenderá como sustancias en estado sólido, aquéllas que se encuentren en polvo menor de 10 micras.

ARTICULO 6o.- En el caso de las sustancias señaladas en el artículo 3o. que correspondan a plaguicidas, la cantidad de reporte se entenderá referida a su ingrediente técnico, llamado también activo.

En los demás casos, las cantidades de reporte de las sustancias indicadas en este Acuerdo, deberán considerarse de conformidad con su más alto porcentaje de concentración. Cuando dichas sustancias se encuentran en solución o mezcla, deberá realizarse el cálculo correspondiente, a fin de determinar la cantidad de reporte para el caso de que se trate.

ARTICULO 7o.- Las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología, previa opinión de las Secretarías de Energía, Minas e Industria Paraestatal; Comercio y Fomento Industrial; de Salud; Agricultura y Recursos Hidráulicos y del Trabajo y Previsión Social, podrán ampliar y modificar el listado objeto del presente Acuerdo, con base en el resultado de investigaciones que al efecto se lleven a cabo.

TRANSITORIO

UNICO.- El presente acuerdo entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el *Diario Oficial de la Federación*.

Ciudad de México a 26 de marzo de mil novecientos noventa.- El Secretario de Gobernación, Fernando Gutiérrez Barrios.- Rúbrica.- El Secretario de Desarrollo Urbano y Ecología, Patricio Chirinos Calero.-Rúbrica.

Publicado en el *Diario Oficial de la Federación* el 28 de marzo de 1990.

SEGUNDO LISTADO DE ACTIVIDADES ALTAMENTE RIESGOSAS

ACUERDO por el que las Secretarías de Gobernación y Desarrollo Urbano y Ecología, con fundamento en lo dispuesto por los artículos 5o.- fracción X y 146 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 27 fracción XXXII y 37 fracciones XVI y XVII de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, expiden el segundo listado de actividades altamente riesgosas.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Gobernación.

ACUERDO POR EL QUE LAS SECRETARIAS DE GOBERNACION Y DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA, CON FUNDAMENTO EN LO DISPUESTO POR LOS ARTICULOS 5o

FRACCION X Y 146 DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE, 27 FRACCION XXXII Y 37 FRACCIONES XVI Y XVII DE LA LEY ORGANICA DE LA ADMINISTRACION PUBLICA FEDERAL EXPIDEN EL SEGUNDO LISTADO DE ACTIVIDADES ALTAMENTE RIESGOSAS.

CONSIDERANDO

Que la regulación de las actividades altamente riesgosas, está contemplada en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, como asunto de alcance general de la nación o de interés de la Federación y se prevé que una vez hecha la determinación de las mismas se publicarán los listados correspondientes.

Que el criterio adoptado para determinar cuáles actividades deben considerarse como altamente riesgosas, se fundamenta en que la acción o conjunto de acciones, ya sean de origen natural o antropogénico, estén asociadas con el manejo de sustancias con propiedades inflamables, explosivas, tóxicas, reactivas, radioactivas, corrosivas o biológicas, en cantidades tales que, en caso de producirse una liberación, sea por fuga o derrame de las mismas o bien una explosión, ocasionarían una afectación significativa al ambiente a la población o a sus bienes.

Que por lo tanto, se hace necesario fijar dicha cantidad para cada sustancia peligrosa que presente las propiedades antes mencionadas. A esta cantidad se le denomina cantidad de reporte.

Que con base en el criterio anterior se ha procedido a determinar las actividades altamente riesgosas en función de las propiedades de las sustancias que se manejen y a agrupar dichas actividades en los listados correspondientes.

Que cuando una actividad esté relacionada con el manejo de una sustancia que presente más de una de las características de peligrosidad señaladas, en cantidades iguales o superiores a su cantidad de reporte, dicha actividad será considerada altamente riesgosa y se incluirá en cada uno de los listados que correspondan.

Que el 28 de marzo de 1990 se publicó en el *Diario Oficial de la Federación* el primer listado de actividades altamente riesgosas que corresponde a aquellas en que se manejen sustancias tóxicas. Que mediante este Acuerdo se expide el segundo listado de actividades altamente riesgosas que corresponde a aquellas en que se manejen sustancias inflamables y explosivas, en cantidades tales que de producirse una liberación, ya sea por fuga o derrame de las mismas en la producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final provocaría la formación de nubes inflamables, cuya concentración sería semejante a la de su límite inferior de inflamación de nubes inflamables, cuya concentración sería semejante a la de su límite inferior de inflamabilidad, en un área determinada por una franja de 100 de longitud en torno de la instalaciones o medio de transporte dados, y en el caso de formación de nubes explosivas, la presencia de ondas de sobrepresión de 0.5lb/pulg² en esa misma franja.

Que tanto el primer listado que corresponde al manejo de sustancias tóxicas y este concerniente al manejo de sustancias inflamables y explosivas así como los subsecuentes que se expidan para el caso de aquellas actividades relacionadas con el manejo de sustancias reactivas, corrosivas o biológicas, constituirán el sustento para determinar las normas técnicas de seguridad y operación, así como para la elaboración y presentación de los programas para la prevención de accidentes previstos en el artículo 147 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, mismos que deberán observarse en la realización de dichas actividades.

Que aun cuando las actividades asociadas con el manejo de sustancias con propiedades radioactivas podrían considerarse altamente riesgosas, las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología no establecerán un listado de las mismas, en virtud de que la expedición de las normas de seguridad nuclear, radiológica y física de las instalaciones nucleares o radioactivas compete a la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal y a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, con la participación que en su caso corresponda a la Secretaría de Salud de conformidad con lo dispuesto por la legislación que de manera específica regula estas actividades.

Que la Secretaría de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología previa opinión de las Secretarías de Energía, Minas e Industria Paraestatal, de Comercio y Fomento Industrial, de Agricultura y Recursos Hidráulicos, de Salud y del Trabajo y Previsión Social, así como con la participación de la Secretaría de la Defensa Nacional, llevaron a cabo los estudios que sirvieron de sustento para determinar los criterios y este segundo listado de actividades que deben considerarse altamente riesgosas.

En mérito de lo anterior, hemos tenido a bien dictar el siguiente:

ACUERDO

ARTICULO 1o.- Se expide el segundo listado de actividades altamente riesgosas que corresponde a aquellas en que se manejen sustancias inflamables y explosivas.

ARTICULO 2o.- Se considerará como actividad altamente riesgosa, el manejo de sustancias peli-

grosas en cantidades iguales o superiores a la cantidad de reporte.

ARTICULO 3o.- Para los efectos de este Acuerdo se considerarán las definiciones contenidas en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y las siguientes:

Cantidad de reporte: Cantidad mínima de sustancia peligrosa en producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final, o la suma de éstas, existentes en una instalación o medio de transportes dados, que al ser liberada, por causas naturales o derivadas de la actividad humana, ocasionaría una afectación significativa al ambiente, a la población, o a sus bienes.

Manejo: Alguna o el conjunto de las actividades siguientes: producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final de sustancias peligrosas.

Sustancia peligrosa: Aquélla que por sus altos índices de inflamabilidad, explosividad, toxicidad, reactividad, radiactividad, corrosividad, o acción biológica puede ocasionar una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

Sustancia inflamable: Aquélla que es capaz de formar una mezcla con el aire en concentraciones tales para prenderse espontáneamente o por la acción de una chispa.

Sustancia explosiva: Aquélla que en forma espontánea o por acción de alguna forma de energía genera una gran cantidad de calor y energía de presión en forma casi instantánea.

ARTICULO 4o.- Las actividades asociadas con el manejo de sustancias inflamables y explosivas que deben considerarse altamente riesgosas son la producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso y disposición final de las sustancias que a continuación se indican, cuando se manejan cantidades iguales o superiores a las cantidades de reporte siguientes:

I. Cantidad de reporte a partir de 500 kg.

a) en el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

Acetileno
Acido sulfhídrico
Anhídrido hipocloroso
Butano (Niso)
Butadieno
1-Buteno
2-Buteno (cis,trans)
Cianógeno
Ciclobutano
Ciclopropano
Cloruro de metilo
Cloruro de vinilo
Difluoruro 1-Cloroetano
Dimetil amina
2,2-Dimetil propano
Etano
Eter metílico
Etileno
Fluoruro de etilo
Formaldehido
Hidrógeno
Metano
Metilamina
2-Metil propeno
Propano
Propileno
Propino
Sulfuro de carbonilo
Tetrafluoroetileno
Trifluorocloroetileno
Trimetil amina

b) En el caso de las sustancias en estado gaseoso no previstas en el inciso anterior y que tengan las siguientes características:

Temperatura de inflamación <37.8° C
Temperatura de ebullición <21.1° C
Presión de vapor >760 mm hg

c) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

2-Butino
Cloruro de etilo
Etilamina
3-Metil-1-Buteno
Metil etil eter
Nitrito de etilo
Oxido de etileno
1-Pentano

II. Cantidad de reporte a partir de 3,000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acetaldehído
Acido cianhídrico
Amileno(cis,trans)
Colodión
Disulfuro de carbono
2-Metil-1-Buteno
2-Metil-2-Buteno
Oxido de propileno
Pentano (Niso)
1-Penteno
1-Penteno
Sulfuro de dimetilo

III. Cantidad de reporte a partir de 10,000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acroleína
Alil amina
Bromuro de alilo
Carbonilo de níquel
Ciclopentano
Ciclopenteno
1-Cloro propileno
2-Cloro propileno
Cloruro de alilo
Cloruro de acetilo
Cloruro de propilo (Niso)
1,1-Dicloroetileno
Diethylamina
Dihidropirán
2,2 Dimetil butano
2,3 Dimetil butano
2,3 Dimetil 1-Buteno
2,3 Dimetil 2-Buteno
2- Etil 1-Buteno
Eter dietílico
Eter vinílico
Etilico mercaptano
Etoxiacetileno
Formiato de etilo
Formiato de metilo
Furano
Isopreno
Isopropenil acetileno
2-Metil Pentano
3-metil Pentano
2-Metil-1-Penteno

2-Metil-2-Penteno
4-Metil-1-Penteno
4-Metil-2-Penteno
2-Metil-2-Propanotiol
Metil propil acetileno
Metil triclorosilano
Propil amina (Niso)
Propenil etil éter
Tetrahidrofurano
Triclorosilano
Vinil etil eter
Vinil isopropil éter

IV. Cantidad de reporte a partir de 20,000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acetato de etilo
Acetato de metilo
Acetato de vinilo
Acetona
Acrilato de metilo
Acrilonitrilo
Alcohol metílico
Alcohol etílico
Benceno
1-Bromo-2-Buteno
Butilamina (Niso,sec,ter)
Ciclohexano
Ciclohexeno
Cicloheptano
2-Cloro-2-Buteno
Cloruro de butilo (Niso,sec,ter)
Cloruro de vinilideno
Dicloroetano
Dicloroetileno (cis,trans)
1,2-Dicloroetileno
Dimetil diclorosilano
1,1 Dimetil hidrazina
2,3 Dimetil pentano
2,4 Dimetil pentano
Dimetoxi metano
Diisobutileno
Diisopropilamina
Dioxolano
Eter etil propílico
Eter propílico (Niso)
Etil butil éter
Etil ciclobutano
Etil ciclopentano
Etil diclorosilano

Etil metil cetona
Etilenimina
Formiato de propilo (Niso)
Fluorobenceno
1-Hexeno
2-Hexeno (cis,trans)
Heptano (Niso y mezclas de isómeros)
Hepteno
Heptileno
Heptileno 2-trans
1,4-Hexadieno
Hexano (Niso y mezclas de isómeros)
Isobutiraldehído
2-Metil furano
Metil Ciclohexano
Metil Ciclopentano
Metil Diclopentano
Metil Diclorosilano
Metil éter propílico
2-Metil hexano
3-Metil hexano
Metil hidrazina
2-Metil-1,3-Pentadieno
4-Metil-1,3-Pentadieno
Metil pirrolidina
2-Metil tetrahidrofurano
Metil vinil cetona
Monoxido de butadieno
Nitrato de etilo
2,5-Norbormadieno
Oxido de butileno
Oxido de pentametileno
1,2-Oxido de butileno
Pirrolidina
Propionaldehído
Propionato de metilo
Propionato de vinilo
Trietilamina
2,2,3-Trimetil butano
2,3,3-Trimetil-1-Buteno
2,3,4-Trimetil-1-Penteno
2,4,4-Trimetil-2-Penteno
3,4,4-Trimetil-2-Penteno
Trimetilclorosilano
Vinil isobutil éter

V. Cantidad de reporte a partir de 50,000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

Gas L.P. comercial ¹¹⁾

VI. Cantidad de reporte a partir de 100,000 kg

a) En el caso de las siguientes sustancias en el estado líquido:

Acetato de propilo (Niso)
Alcohol alílico
Alcohol desnaturalizado
Alcohol propílico (Niso)
Amilamina (N,sec)
Bromuro de N-butilo
Butirato de metilo
Butironitrilo (Niso)
1,2-Dicloropropano
2,3-Dimetil hexano
2,4-dimetil hexano
P-Dioxano
Eter alílico
Formiato de isobutilo
2-Metil-2-Butanol
2-Metil Butiraldehido
2-Metil-3-Etil pentano
3-Metil-2-Butanotiol
Metil metacrilato
Piperidina
Piridina
Propionato de etilo
Propionitrilo
Tetrametilo de plomo
2,2,3-Trimetil pentano
2,2,4-Trimetil pentano
2,3,3-Trimetil pentano
Tolueno

VII. Cantidad de reporte a partir de 200,000 kg

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acetal
Acetato de butilo (iso,sec)
Acetato de isoamilo
Acetato de isopropenilo
Acetonitrilo
Acrilato de isobutilo
Alcohol alílico (N,sec)
Alcohol butílico (iso,sec,ter)
Amil mercaptan
Benzotrifluoruro

1-Butanol
Butil mercaptan (N,sec)
Butirato de etilo (Niso)
Clorobenceno
Cloruro de amilo
Crotonaldehído
Cumeno
Dietilcetona
Dietílico carbonato
1,3-Dimetil butilamina
1,3-Dimetil ciclohexano
1,4-Dimetil ciclohexano (cis, trans)
Estireno
Etil benceno
Etil butilamina
2-etil butiraldehído
Etil ciclohexano
Etilendiamina
Etileno-glicol dietílico éter
Ferropenacarbonilo
Isobromuro de amilo
Isoformiato de amilo
Metacrilato de etilo
Metil isobutil cetona
Metil propil cetona
Nitroetano
Nitrometano
Octano (N, iso)
Octeno (iso)
1-Octeno
2-Octeno
Oxido de mesitilo
2,2,5-Trimetil hexano
Vinil triclorosilano
Xileno (M.O.P.)

VIII. Cantidad de reporte a partir de 10,000 kg

- a) En el caso de las sustancias en estado líquido, no previstas en las fracciones anteriores y que tengan las siguientes características:

Temperatura de inflamación $<37.8^{\circ}\text{C}$
Temperatura de ebullición $>21.1^{\circ}\text{C}$
Presión de vapor ≤ 760 mm hg

IX. Cantidad de reporte a partir de 10,000 barriles.

- a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Gasolinas ⁽¹⁾
Kerosenas incluye naftas y diáfano ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Se aplica exclusivamente a actividades industriales y comerciales.

ARTICULO 5.- Se exceptúa de este listado a las actividades relacionadas con el manejo de las sustancias a que se refiere el artículo 41 de la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos.

ARTICULO 6.- Las cantidades de reporte de las sustancias indicadas en este Acuerdo, deberán considerarse referidas a su más alto porcentaje de concentración. Cuando dichas sustancias se encuentren en solución o mezcla, deberá realizarse el cálculo correspondiente, con el fin de determinar la cantidad de reporte para el caso de que se trate.

ARTICULO 7.- Las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología, previa opinión de las Secretarías de Energía Minas e Industria Paraestatal de Comercio y Fomento Industrial, de Agricultura y Recursos Hidráulicos, de Salud y de Trabajo y Previsión Social, podrán ampliar y modificar el listado objeto del presente Acuerdo, con base en el resultado de las investigaciones que sobre el particular se lleven a cabo.

TRANSITORIO

UNICO.- El presente acuerdo entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el *Diario Oficial de la Federación*.

México D.F. a 30 de Abril de 1992.- El Secretario de Gobernación, Fernando Gutiérrez Barrios.- Rúbrica.- El Secretario de Desarrollo Urbano y Ecología, Luis Donaldo Colosio Murrieta.-Rúbrica.

Publicado en el *Diario Oficial de la Federación* el 4 de mayo de 1992.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

TEMA :

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL

**BIOL. HÉCTOR LESSER HIRIART
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE – OCTUBRE 1999**

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL

M. en C. José Alfredo Ramos Leal

RIESGO DE CONTAMINACIÓN.- Se puede definir como la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen con alguna sustancia en concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud para la calidad del agua de consumo humano.

El propósito de una evaluación de riesgo es determinar cuales fuentes potenciales de riesgo representan mayor potencial de causar daños a la salud humana y/o al ambiente y que acciones de planeación se deben tomar.

El hecho de que el riesgo pueda convertirse en una seria amenaza a la calidad de abastecimiento de agua subterránea ya desarrollada o por desarrollar, dependerá de la movilidad de los contaminantes dentro del acuífero.

MEDICIÓN DEL RIESGO.- La idea de una evaluación de riesgo es obtener valores cuantitativos. En la evaluación de riesgo se toman en cuenta al menos dos componentes desde el punto de vista de manejo de riesgo ambiental a) la exposición y b) la cantidad de impacto. Para el caso de la exposición se toma muy en cuenta el tiempo sobre el cual un blanco se pone en contacto con la sustancia contaminante. Esto implica que si no hay contacto no hay riesgo. La cantidad de impacto se relaciona con la clase, tipo y severidad que resulte en una probable exposición.

VULNERABILIDAD DE UN ACUÍFERO - Este término es usado para representar las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante, debido al impacto humano y/o natural

La vulnerabilidad del acuífero depende de la inaccesibilidad de la zona saturada y de la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada del acuífero como resultado de su retención física y reacción química con contaminantes.

Estos dos componentes de la vulnerabilidad del acuífero interactúan además con factores relacionados con la carga contaminante en el subsuelo; a) modo de disposición del contaminante en el subsuelo y en particular de la cantidad de carga hidráulica asociada y b) la clase de contaminante en términos de su movilidad y persistencia.

La mejor manera de presentar la vulnerabilidad del acuífero es en forma de mapas que muestren como varía espacialmente los diferentes grados de vulnerabilidad.

Los mapas de vulnerabilidad de agua subterránea involucran la delimitación de áreas susceptibles de variar a la contaminación del agua subterránea, basado en la interacción de características que promueven o inhiben el movimiento de contaminantes en el subsuelo

METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD Y RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS.

Se han desarrollado varios métodos para el mapeo de vulnerabilidad y evaluación de riesgo ambiental. Estos pueden ser de dos tipos.

- 1) Sistemas que utilizan tasas numéricas (AVI, DRASTIC y ERIS).
- 2) Sistemas no numéricos, los cuales pueden usar números para ordenar el incremento de vulnerabilidad o clasificar como altamente vulnerables o menos vulnerables

Una diferencia entre los métodos de vulnerabilidad y los de riesgo ambiental es la presencia o ausencia de la fuente contaminante. Desde este punto de vista algunos métodos de vulnerabilidad (AVI, DRASTIC), son inherentes de que existe la fuente, otros en cambio toman en cuenta la presencia de la fuente contaminante (SAFE y ERIS), cabe mencionar que algunos de estos métodos (ERIS) fueron desarrollados para obtener índices de impacto a los diferentes partes del medio ambiental (agua superficial, agua subterránea, aire, contacto directo con humanos y explosión)

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS (AVI)

El AVI es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos de cuantificar, tan solo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas sobre el nivel del agua

Es un índice para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero (Van Stempvoort et al. 1992), por medio de la resistencia hidráulica c al flujo vertical del agua al pasar por los diferentes materiales sobre el acuífero.

La resistencia hidráulica c se calcula por la expresión

$$c = \sum b_i / K_i \text{ para las capas } 1, 2, 3, \dots, n$$

donde b_i es el espesor de cada capa sobre el acuífero. K_i es la conductividad hidráulica de cada capa. c es la resistencia hidráulica (inverso de la conductividad hidráulica, tiene dimensiones de tiempo) indica el tiempo aproximado de flujo por unidad de gradiente de carga que atraviesa el agua hacia abajo al pasar por varias capas de sedimentos, por encima del acuífero. A mayor resistencia hidráulica menor vulnerabilidad

Parámetro	Tipo de Material	Clase
Medio Acuífero	Lutita masiva	1 - 3
	Ignea/metamórfica	2 - 5
Aw = 3	Ignea/metamórfica alterada	3 - 5
	till glacial	4 - 6
	Arenisca estratificada, caliza, lutitas	5 - 9
	Arenisca masiva	4 - 9
	Caliza masiva	4 - 9
	Arena y grava	4 - 9
	Basaltos	2 - 10
	Caliza karstica	9 - 10

Tabla 3 - Evaluación del factor del medio acuífero en el DRASTIC

Parámetro	Rango	Clase
Tipo de Suelo	Fino o ausente	10
	Grava	10
	Arena	9
	Agregado arcilloso o comprimido	7
Sw = 2	Arenisca margosa	6
	Marga	5
	Limo margoso	4
	Arcilla margosa	3
	Arcillas no agregadas y material no compacto	1

Tabla 4 - Evaluación del factor del tipo de suelo en el DRASTIC

Parámetro	Rango (% pendiente)	Clase
Topografía	0-2	10
	2-6	9
Tw = 1	6-12	5
	12-18	3
	> 18	1

Tabla 5 - Evaluación de topografía en el DRASTIC

Parámetro	Rango	Clase
Impacto a la Zona Vadosa	Capa confinante	1
	Limo/arcilla	2 - 6
Iw = 2	Lutita	2 - 5
	Caliza	2 - 7
	Arenisca	4 - 8
	Caliza estratificada, arenisca, lutita	4 - 8
	Arena, grava con limo, arcilla	4 - 8
	Ignea/metamórfica	2 - 8
	Arena y Grava	6 - 9
	Basalto	2 - 10
	Caliza karstica	8 - 10

Tabla 6 - Evaluación del factor de impacto a la zona vadosa en el DRASTIC

Confinamiento Superficial	Peso
Diques o estructuras de separación seguras, bordos adecuados y la erosión no es evidente.	0
Diques o estructuras separación seguras pero los bordos son inadecuados.	1
Diques sin infiltraciones pero potencialmente inseguros.	2
Diques inseguros, infiltraciones, o en peligro de colapsarse	3

Tabla 8a.- HRS de Confinamiento Superficial para transporte en agua superficial.

Contenedores	Peso
Contenedores sellados, en condiciones seguras y bordeados por separadores seguros o sistemas de confinamiento.	0
Contenedores sellados, en condiciones seguras y pero no están rodeados por separadores seguros o sistemas de confinamiento.	1
Contenedores con fugas y separadores o estructuras de confinamiento potencialmente inseguras.	2
Contenedores con fugas y sin separadores, ni estructuras de confinamiento, ni estructuras de captación de fugas o en peligro de colapso.	3

Tabla 8b.- HRS de Contenedores para transporte en agua superficial.

Pila de Residuos	Peso
Pilas cubiertas y rodeadas por separadores seguros o sistemas de confinamiento.	0
Pilas cubiertas, residuos sin consolidar, los separadores o sistemas de confinamiento son inadecuados	1
Pilas no cubiertas, residuos sin consolidar y con separadores o sistemas de confinamiento potencialmente inseguros	2
Pilas no cubiertas, residuos sin consolidar y sin separadores, ni confinamiento, ni sistemas de captación de fugas o en peligro de colapso.	3

Tabla 8c.- HRS de Pila de Residuos para transporte en agua superficial

Relleno Sanitario	Peso
La pendientes del Relleno Sanitario impide escurrimientos, relleno sanitario bordeado por sistemas de aislamiento seguros, o el relleno sanitario tiene una cubierta material adecuada	0
Relleno Sanitario cubierto inadecuadamente y con sistemas de aislamiento seguros	1
Relleno Sanitario descubierto y con sistemas de aislamiento potencialmente inseguros.	2
Relleno Sanitario descubierto y sin sistemas de aislamiento y con sistemas de aislamiento inseguros	3

Tabla 8d.- Valores de HRS de Contenedores para transporte en agua superficial.

Se asignan valores de 0 si 1) Todos los residuos del sitio son rodeados por diferentes estructuras de separación que se encuentran en condiciones seguras y adecuadas para contener todos los escurrimientos, derrames o lixiviados de residuos; o 2) si la intervención del terreno no permite escurrimientos en la entrada de agua superficial. Por otro lado al evaluar los contenedores para cada uno de los diferentes formas de almacenamiento o disposición en los sitios se asignan los siguientes valores

Confinamiento Superficial	Peso
Estructuras de aislamiento para infiltraciones seguras, forradas con material impermeable (natural o artificial) compatible con los residuos y sistemas de colección de lixiviados adecuados.	0
Forradas con material impermeable (natural o artificial) compatible con los residuos y sin sistemas de colección de lixiviados o bordos inadecuados	1
Estructuras de aislamiento para infiltraciones potencialmente inseguras o con cubierta moderadamente permeable compatible	2
Estructuras de aislamiento para infiltraciones inseguras, sin cubierta o cubierta incompatible	3

Tabla 9a - HRS de Confinamiento Superficial para transporte en agua subterránea

Contenedores	Peso
Contenedores sellados, en condiciones seguras, sin cubierta o cubierta moderadamente permeable	1
Contenedores con fugas, cubierta moderadamente permeable	2
Contenedores con fugas y sin cubierta o cubierta incompatible	3

Tabla 9b - HRS de Contenedores para transporte en agua subterránea

ANÁLISIS DE MECANISMOS DE CONTROL PRIMARIO										
COMPONENTE FÍSICO						COMPONENTE HUMANO				PCMRS
FUENTE	CONDICIONES ACTUALES	t ₁	t ₂	t ₃	HRS VALOR	CAPACIDAD	ENTRENAMIENTO	EQUIPAMIENTO	DISCIPLINA	
F1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00046
TASA DE** CONVERSIÓN	G/F/P 1/3/5	H/M/L 5/3/1	H/M/L 5/3/1	H/M/L 5/3/1		G/F/P 1/3/5	G/F/P 1/3/5	G/F/P 1/3/5	G/F/P 1/3/5	

Tabla 11 - Valores del PCMRS de la fuentes F1 (t₁, t₂ y t₃ representan probabilidades de fallas futuras, G/F/P => Good/Fair/Poor, H/M/L => High/Medium/Low).

El valor de reconocimiento de los mecanismos de control primario se obtiene mediante la siguiente expresión.

PCMRS = CONDICIONES ACTUALES* VALOR DEL HRS*CAPACIDAD*ENTRENAMIENTO*EQUIPAMIENTO*DISCIPLINA*0.00046

$$PCMRS(F1) = (1*1*1*1*1*1*100)/215\ 625 = 0.00046$$

MECANISMOS DE TRANSPORTE DE CONTROL SECUNDARIO

ERIS Agua Superficial

La precipitación media anual para la región varía de 680 a 700 mm, la evaporación potencial anual es de 2100 mm, el área se encuentra en una planicie, donde las pendientes topográficas son menores a 3%, las distancias de las fuentes a las aguas superficiales (presa) alcanzan poco más del rango de una milla en algunos casos, el estado físico del suelo puede considerarse como sólido consolidado, los pesos dados para estas características son dados en las tablas 12, 13, 14, 15 y 16.

Cantidad de lluvia (Pulgadas)	mm	Peso
< 1.0	< 25.4	0
1.0 a 2.0	25.4 a 50.8	1
2.1 a 3.0	53.34 a 76.2	2
> 3.0	> 76.2	3

Tabla 12 - Peso para la lluvia.

Intervención del terreno					
Promedio de la pendiente del terreno					
Facilidad de pendiente	< 3 %*	3 - 5 %	5 - 8 %	> 8 %	Pendiente del agua**
Facilidad en cuenca cerrada	0	0	0	0	3
Facilidad con promedio de pendiente (< 3 %)	0	1	1	2	3
Promedio de pendiente (3 - 5 %)	0	1	2	2	3
Promedio de pendiente (5 - 8 %)	0	2	2	3	3
Promedio de pendiente (> 8 %)	0	2	3	3	3

Tabla 13 - Peso para facilidad de pendiente e intervención del terreno

*Esta columna será usada tanto para terrenos que tienen una pendiente < 3 % o para áreas de gran elevación que separa sitios de cuerpos de agua superficial

**Esta columna será usada cuando hay distinto gradiente en corrientes de agua superficial al de la pendiente en las superficies cercanas, esto implica un rápido movimiento de la corriente

Distancia (millas y pies)	metros	Peso
> 2 millas	> 3218.0	0
1 a 2 millas	1609.3 a 3218.0	2
1000 ft a 1 milla	304.8 a 1609.3	4
1000 ft	< 304.8	0

Tabla 14 - Pesos para distancias a aguas superficiales cercanas

Estado físico	Peso
Sólido, consolidado o estabilizado	0
Sólido, no consolidado o inestable	1
Polvo o material fino	2
Líquido viscoso o gas	3

Tabla 15 - Peso para el estado físico del suelo.

FUENTE	F1
PROFUNDIDAD DEL ACUIFERO	2
PRECIPITACIÓN NETA	0
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA	0
ESTADO FISICO DEL SUELO	0
DISTANCIA A POZOS CERCANOS	2
VALOR TOTAL CRUDO	4
VALOR TOTAL NORMALIZADO *0.91	3.64

Tabla 22.- Valor de ERIS normalizado para aguas subterráneas de diferentes fuentes.

ERIS Aire

Dado que no hay sustancias incompatibles, tampoco se tiene reactividad del Cromo, por lo tanto se le asigno un peso de 0 como se muestra en las tablas 23, 24a-f, 25 y 26.

Nivel NFPA	Peso
0 Materiales que normalmente son estables aún bajo condiciones de exposición al fuego en los cuales no reacciona con el agua	0
1 Materiales en los cuales ellos mismos son normalmente estables, pero en los cuales pueden ser inestables a altas presiones y temperaturas o pueden reaccionar con agua liberando algo de energía pero no violentamente	1
2 Materiales en los cuales ellos mismos son normalmente inestables y sufren cambios químicos violentos pero no detonan Incluyen materiales que pueden sufrir cambios químicos con liberación rápida de energía a presiones y temperaturas normales o los cuales pueden sufrir cambios químicos violentos a elevadas presiones y temperaturas. También incluyen materiales que pueden reaccionar violentamente con agua o los cuales pueden formar mezclas potencialmente explosivas con agua	2
3 Materiales que ellos mismos son capaces de detonar o de una descomposición explosiva o de una reacción explosiva pero los cuales pueden ser inicialmente confinados y calentados. Incluye materiales que son normalmente sensibles o a choques mecánicos a temperaturas y presiones elevadas o los cuales reaccionan explosivamente con agua sin requerir de calor o confinamiento	3
4 Materiales que son capaces de detonar o de una descomposición explosiva o reacción explosiva en condiciones normales de presión y temperatura Incluye materiales que son sensibles a golpes mecánicos o choques térmicos	3

Tabla 23 - Peso para clasificación de reactividad de la NFPA (National Fire Protection Association)

Grupo 1-A	Grupo 1-B
Acetileno viscoso Líquidos cáusticos alcalinos Limpiadores alcalinos Líquidos corrosivos alcalinos Fluidos de baterías corrosivas alcalinas Aguas residuales causticas	Acido viscoso Bateria ácida Electrolito Acido Solventes Otros ácidos corrosivos Desgastadores ácidos Desgastadores mezclados con ácidos Desgastadores de ácidos sulfúricos
Desgastador cáustico	
Consecuencias potenciales: Generación de calor, reacción violenta	

Tabla 24a - Materiales incompatibles del Grupo 1 de acuerdo a Departamento de salud de California, 1975

Grupo 2-A	Grupo 2-B
Aluminio Acido y agua Berilio Limpiadores químicos Litio Potasio	Algunos residuos concentrados de los Grupos 1-A o 1-B Calcio

FUENTE	F1
REACTIVIDAD	0
INCOMPATIBILIDAD	0
VALOR NORMALIZADO *6.67	0

Tabla 26.- Valor de ERIS normalizado para ruta aire, en diferentes fuentes

ERIS Contacto Directo

Dado que el relleno sanitario(F1), tiene barreras de seguridad y continuamente es monitoreado por medio de piezómetros, se le asigno un peso de 0 (Tabla 27), el resumen de las pesos es dado en la Tabla 28.

Barreras	Peso
Sistema de vigilancia las 24 hrs., (monitores de TV o vigilantes que vigilen la entrada) los cuales continuamente controlan la entrada o barreras artificiales (por ejemplo una cerca combinada con un acantilado) la cual bordea totalmente el acceso (por ejemplo monitores de TV, candados en la entrada, o entrada de acceso controlado)	0
Guardias de seguridad, sin barreras	1
Una barrera pero no separa	2
Barreras pero no bordean completamente el acceso	3

Tabla 27.- Peso para accesibilidad a la fuente de contaminación.

FUENTE	F1
ACCESIBILIDAD	0
VALOR NORMALIZADO* 6.67	0

Tabla 28.- Valor de ERIS normalizado para ruta contacto directo.

ERIS Fuego/Explosión

Dado que el cromo no presenta reactividad con otras sustancias, no se localizan sustancias incompatibles y tiene un punto de ignición muy alto (>200°F) se le asignaron pesos de 0, como se ve en las tablas 29, 30 y 31.

Nivel	NEFPA	Peso
4	Gases muy inflamables, líquidos inflamables muy volátiles, y materiales que en forma de polvo o vapor en forma de mezclas explosivas cuando se dispersan en el aire	3
3	Líquidos los cuales pueden ser encendidos bajo condiciones normales de temperatura Algunos materiales que encienden espontáneamente a temperaturas normales en aire	3
2	Líquidos que pueden ser moderadamente antes de ocurrir el encendido, así como sólidos, que pueden producir vapores inflamables	2
1	Materiales que pueden ser precalentados antes de que encienda. Muchos combustibles sólidos tienen un rango de inflamabilidad de 1	1
0	Materiales que no encienden	0

Tabla 29 - Niveles de ignibilidad NEFPA y pesos asignados.

Ignibilidad	Peso
Punto de ignición > 200°F o Nivel NEFPA 0	0
Punto de ignición 140 - 200°F o Nivel NEFPA 1	1
Punto de ignición 80 - 140°F o Nivel NEFPA 2	2
Punto de ignición < 80°F o Nivel NEFPA 3 o 4	3

Tabla 30 - Peso para ignibilidad

FUENTE	F1
IGNICION	0
REACTIVIDAD	0
INCOMPATIBILIDAD	0
VALOR NORMALIZADO *2.22	0

Tabla 31 - Valor de ERIS normalizado via fuego/explosión en diferentes fuentes.

pentachlorobiphenyl	isomer	propylbenzene	
pentachlorobiphenol		1-terpineol	
1,1,3,3-tetrachloroacetone		toluene	
tetrachlorophenyl		vinyl benzene	
fluoromethylbenzothiazole		xylene	
mchlorobenzene			
mchloromphenyl			
mchlorofluoromethane			
2,4,6-mchlorophenol			
mphenyl phosphate			
bromochloromethane			
bromoform			
carbon tetrachloride			
chloroform			
chloromochloromethane			
di bromochloroethane			
tetrachloroethane			
1,1,2-mchloroethane			

Tabla 34.- Persistencia (Biodegradabilidad) de algunos componentes orgánicos.

<p>0 = No tóxico (Ninguno). Esta designación es dada para materiales que caen en una de las siguientes categorías:</p> <p>a) Materiales que no causan daño bajo condiciones normales de uso.</p> <p>b) Materiales que producen efectos tóxicos en humanos solo bajo condiciones poco usuales o por sobredosis</p> <p>1 = Ligeramente tóxico (Baja)</p> <p>a) Local agudo. Materiales que en solo unos segundos, minutos, u horas de exposición causan solo ligeros efectos sobre la piel o membranas mucosas sin tomar en cuenta lo extenso de la exposición.</p> <p>b) Sistemático agudo. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y pueden producir solo ligeros efectos en segundos, minutos u horas o después de una ingestión de una sola dosis sin tomar en cuenta la cantidad absorbida o el tiempo de exposición.</p> <p>c) Local crónico. Materiales que en continuas o repetidas tiempos de exposiciones en periodos de días, meses o años causan solo ligeras y generalmente daños reversibles en la piel o la membrana mucosa. El tiempo de exposición puede ser pequeños o largos</p> <p>d) Sistemático crónico. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y puede producir solo ligeros y generalmente efectos reversibles en periodos de días, meses o años. La extensión de la exposición puede ser grande o pequeña</p> <p>En general la clasificación de estas sustancias sido de toxicidad ligera, produce cambios en el cuerpo humano que son reversibles y pueden desaparecer despues de que termina la exposición con o sin tratamiento medico</p> <p>2 = Moderamente toxico (Media)</p> <p>a) Local agudo. Materiales que en solo unos segundos, minutos, u horas de exposición causan solo moderados efectos sobre la piel o membranas mucosas. Estos efectos pueden ser el resultado de intensas exposiciones en cuestiones de segundos o de una moderada exposición en cuestion de horas</p> <p>b) Sistemático agudo. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y pueden producir moderados efectos en segundos, minutos u horas o después de una ingestión de una sola dosis</p> <p>c) Local crónico. Materiales que en continuas o repetidas tiempos de exposiciones en periodos de días, meses o años causan moderados daños en la piel o la membrana mucosa</p> <p>d) Sistemático crónico. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y puede producir moderados efectos despues de continuas o repetidas exposiciones en periodos de días, meses o años.</p> <p>En general la clasificación de estas sustancias ha sido de toxicidad moderada, produce cambios tanto reversibles como irreversibles en el cuerpo humano. Estos cambios no son tan severos que pongan en peligro la vida o producir serios daños físicos</p> <p>3 = Toxicidad severa (Alta)</p> <p>a) Local agudo. Materiales que en solo segundos, minutos, u horas de exposición causan heridas a la piel o membranas mucosas de suficiente severidad como para poner en peligro la vida o causar permanentes daños físicos o deformacion</p> <p>b) Sistemático agudo. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y pueden producir daños de suficiente severidad como para poner en peligro la vida después de una sola exposición en cuestion de segundos, minutos u horas o después de una ingestión de una sola dosis.</p> <p>c) Local crónico. Materiales que en continuas o repetidas tiempos de exposiciones en periodos de días, meses o años causan fuertes daños en la piel o la membrana mucosa de suficiente severidad que pone en peligro la vida o causar daños permanentes o deformaciones o cambios irreversibles.</p>
--

Como puede observarse los mayores valores del valor de riesgo compuesto se obtienen en mecanismos de transporte de agua subterránea.

BLANCOS HUMANOS

Se hizo una evaluación de riesgo en blancos humanos, para cada una de las fuentes con cada uno de los mecanismos de transporte.

ERIS Agua Superficial—Blanco Humano

Los pesos para población por distancia se manejaron varios valores para diferente número de población (actual, para un tiempo de respuesta a la emergencia t_1 , t_2 y t_3) y distancia, como se muestra en las tablas 42, 43 y 44

Población actual - Considera el número de población que puede ser afectada al momento de la fuga.

Población en t_1 - Considera la población que puede ser afectada entre la fuga y tiempo de respuesta a la emergencia.

Población en t_2 - Considera la población que puede ser afectada un año después de la fuga.

Población en t_3 - Considera la población que puede ser afectada 10 años después de la fuga

Población	Distancia al o al pozo				
	> 4828 (m) > 3 millas	3218 - 4828 (m) 2 - 3 millas	1609 - 3218 (m) 1 - 2 millas	609 - 1609 (m) 2000 ft - 1 milla	0 - 609 (m) 0 - 2000 ft
0	0	0	0	0	0
1 - 100	0	4	8	8	10
101 - 1000	0	8	16	16	20
1001 - 3000	0	12	24	24	30
3001 - 10000	0	16	32	32	35
> 10000	0	20	35	35	40

Tabla 41 - Peso por Población vs Distancia para consumo de agua superficial o pozos de agua subterránea

Uso de agua superficial (agua fresca o agua salada)	Valor asignado
Normalmente no usado	0
Comercial o industrial	3
Irrigación, fuente importante económicamente preparación de comida comercial o recreación (pesca, remo, balneario)	6
Agua potable	9

Tabla 42.- Peso para uso de agua superficial.

FUENTES	F1
POBLACION ACTUAL	0
POBLACION EN t_1	0
POBLACION EN t_2	0
POBLACION EN t_3	0
POBLACION TOTAL	0
USO DE AGUA SUPERFICIAL	3
POBLACION DISTANCIA	10
VALOR CRUDO TOTAL	13
VALOR NORMALIZADO X 2.043	26.56

Tabla 43 - Valores de ERIS de aguas superficiales - blanco humano para diferentes fuentes

ERIS Agua Subterránea—Blanco Humano

Los resultados de ERIS aguas subterráneas - blanco humano son resumidos en la tabla 45 y 46.

Uso del agua subterránea.	Peso
Sin uso (acuifero extremadamente salino, extremadamente baja producción)	0

b	11
c	10
VALOR NORMALIZADO X 3.03 a	36.36
b	33.33
c	30.30

Tabla 48.- Valores de ERIS aire-blanco humano para diferentes fuentes.

ERIS Contacto Directo—Blanco Humano

El valor del ERIS esta en función del numero de personas como se ve en la siguiente tabla.

Población	Peso
0	0
1 - 100	1
101 - 1,000	2
1,001 - 3,000	3
3,001 - 10,000	4
> 10,000	5

Tabla 49 - Peso para poblacion en un radio de una milla.

Los datos de ERIS de contacto directo son dados en la tabla 50

FUENTES	F1
POBLACION ACTUAL	0
POBLACION EN t1	0
POBLACION EN t2	0
POBLACION EN t3	0
POBLACION TOTAL	0
POBLACION EN UNA MILLA	1
VALOR CRUDO-TOTAL	1
VALOR NORMALIZADO X 20	20

Tabla 50 - Valores de ERIS via contacto directo - blanco humano

ERIS Fuego/Explosión --Blanco Humano

Los valores de peso para poblacion en un radio de 2 millas se da en la siguiente tabla.

Poblacion	Peso
0	0
1 - 100	1
101 - 1,000	2
1,001 - 3,000	3
3,001 - 10,000	4
> 10,000	5

Tabla 51 - Peso para poblacion en un radio de 2 millas

Los valores del ERIS via fuego/explosión - blanco humano son resumidos en la tabla 52

FUENTES	F1
POBLACION ACTUAL	0
POBLACION EN t1	0
POBLACION EN t2	0
POBLACION EN t3	0
POBLACION TOTAL	0
POBLACION EN DOS MILLAS	1
USO DEL SUELO	1
VALOR CRUDO TOTAL	2
VALOR NORMALIZADO X 12.5 a	25

Tabla 52 - Valores de ERIS via fuego/explosion -- blanco humano, para diferentes fuentes

Número de construcciones	Peso
0	0
1-26	1
27-260	2
261-790	3
791-2600	4
> 2600	5

Tabla 59 - Peso para número de construcciones (fuego/explosión).

Distancia	Peso
> ½ milla (> 804 m)	0
201 ft - ½ milla (61.26-804 m)	1
51 ft - 200 ft (15.54-61 m)	2
0-50 ft (0-15.24 m)	3

Tabla 60 - Peso para distancia a construcciones cercanas.

FUENTE	F1
DISTANCIA A AMBIENTES SENSIBLES	0
NUMERO DE CONSTRUCCIONES	1
DISTANCIA A CONSTRUCCIONES CERCANAS	0
PESO NORMALIZADO X 33.33	33.33

Tabla 61 - Valores de ERIS contacto directo - sensibilidad ambiental

VALORES DE RIESGO HUMANO Y AMBIENTES SENSIBLES

Los valores de riesgo humano y riesgo a ambientes sensibles son resumidos para cada de las diferentes rutas, en la tabla 62

RELLENO SANITARIO (F1)

POBLACION ACTUAL	VALOR DE ERIS BLANCO HUMANO	CRS	BLANCO AMBIENTES SENSIBLES	RIESGO HUMANO	RIESGO AMBIENTAL	USOS
0.07	26.56	0	33.33	0	0	A-AGUA SUPERFICIAL
0.07	26.72	23.42		43.8		B-AGUA SUBTERRANEA
0.07	26.56	0	33.33	0	0	D-AIRE
0.07	24.51	0	33.33	0	0	E-AIRE
0.07	22.47	0	33.33	0	0	F-AIRE
0.07	20	0	33.33	0	0	G-CONTACTO DIRECTO
0.07	25	0	33.33	0	0	H-FUEGO/EXPLOSION

Tabla 62 - Valores de riesgo humano y ambientes sensibles, para el relleno sanitario (F1), en la diferentes rutas de transporte

En donde los valores de riesgo humano es analizado considerando diferentes factores, sin embargo debido a que tiene probabilidades de uso representa solo riesgo humano

Para riesgo ambiental se considera que no hay ningun riesgo, debido a la nula probabilidad de uso de los diferentes mecanismos de transporte y para el mecanismo de transporte de agua subterranea no es aplicable según el autor del metodo



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

TEMA :

IMPACTO AMBIENTAL Y AUDITORIAS AMBIENTALES

**BIOL. HÉCTOR LESSER HIRIART
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE – OCTUBRE 1999**

Estudios de Impacto Ambiental y Auditorías Ambientales.

Dos Herramientas Básicas en el
Quehacer Ambiental.

NOTAS:

Introducción.

- En México, el Plan Nacional de Desarrollo (PND) establece entre sus líneas de acción el compromiso insoslayable de resolver los grandes problemas que enfrenta nuestro País. En el ámbito social, se establece una Cruzada Nacional por el Bienestar, misma que se encuentra orientada a resolver los rezagos existentes en la materia derivados de la crisis económica.

NOTAS:

Introducción (continua).

- Para elevar el nivel de vida de los Mexicanos, el estado establece como una alta prioridad la **protección y restauración del medio ambiente**, ya que el bienestar de nuestra población se encuentra estrechamente ligado a la protección y conservación de nuestros recursos naturales y el medio ambiente en el que habitamos.

NOTAS:

Introducción (continua)

- En materia ambiental, la política gubernamental se ha enfocado hacia el desarrollo sustentable y en este sentido se establece como una alta prioridad el cuidado del medio ambiente en el desarrollo de las actividades productivas, así como en el restablecimiento del equilibrio ecológico en las áreas en las que existe un deterioro del entorno natural.

NOTAS:

Introducción (continua)

- Desde una perspectiva de carácter eminentemente preventivo, la **planeación ecológica y la educación ambiental** son sin duda alguna dos de los elementos que mayor relevancia adquieren en la aplicación de la nueva **política ambiental**.

NOTAS:

Introducción (continua)

- El crecimiento económico, llámese desarrollo, puede y debe ser compatible con el medio ambiente. Más aún, no se contraponen ya que ambos persiguen un objetivo común que es elevar el nivel de vida o bienestar de la población.

NOTAS:

El Reto.

- Implementar los cambios necesarios mediante los programas de modernización sectorial que permitan alcanzar el **desarrollo sustentable**
- Identificar los problemas que ocasionan el **deterioro del medio ambiente**, e implementar los mecanismos que permitan garantizar el cumplimiento de las Normas, Reglamentos y la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).

NOTAS:

Herramientas para la Identificación, Evaluación, Toma de Decisiones, e Implementación de Soluciones.

- La política ambiental del gobierno mexicano contempla diversos instrumentos que independientemente o en su conjunto pueden coadyuvar a corregir los problemas de carácter ambiental. Los principales instrumentos de la política ambiental gubernamental se agrupan en cuatro grandes rubros: Instrumentos de **persuasión moral**; instrumentos **económicos**; instrumentos de **control directo** e; instrumentos de **inversión del gobierno**.

NOTAS:

Los Instrumentos de la Política Ambiental.

- **Instrumentos de persuasión moral**, en los que se busca, a través de la información y del convencimiento que los agentes cambien su comportamiento;
- **Instrumentos económicos**, en los que se busca que los agentes cambien su comportamiento mediante la afectación de sus costos y beneficios;
- **Instrumentos de control directo**, en los que se busca cambiar el comportamiento de los agentes vía imposición de estándares y tecnologías e;
- **Instrumentos de inversión de gobierno**, en los que se busca que los agentes cambien su comportamiento vía la inversión directa en infraestructura y otro tipo de apoyos.

NOTAS:

Estudios de Impacto Ambiental.

- La evaluación de impacto ambiental ha sido reconocida por las autoridades ambientales como una herramienta de gran importancia en la generación de información ambiental. Así mismo se le reconoce como un proceso analítico para evaluar elementos más comprensivos de costo y beneficio social en cada proyecto de desarrollo.

NOTAS:

Estudios de Impacto Ambiental (continuación).

- Existen tres modalidades en los estudios de impacto ambiental:
-
- Manifestación de Impacto Ambiental en su **Modalidad General**
- Manifestación de Impacto Ambiental en su **Modalidad Intermedia**
- Manifestación de Impacto Ambiental en su **Modalidad Específica**

NOTAS:

Estudios de Impacto Ambiental (continuación)

- La evaluación de impacto ambiental es un instrumento de aplicación específica y requiere de analizar las particularidades de cada caso, ejerciendo una regulación en distintos planos y etapas.

NOTAS:

Auditorías Ambientales.

- Las auditorías ambientales consisten en la revisión exhaustiva de las instalaciones, procesos, almacenamientos, transporte, seguridad y riesgo, entre otros aspectos, que permitan establecer planes de acción que definan con plazos determinados las obras, reparaciones, correcciones, adquisiciones y acciones necesarias emanadas del dictamen de auditoría, estén o no normadas, para finalmente ser firmadas entre la autoridad y el empresario y garantizar su cumplimiento mediante fianza.

NOTAS:

Auditorías Ambientales.

- Las auditorías ambientales consisten en la revisión exhaustiva de las instalaciones, procesos, almacenamientos, transporte, seguridad y riesgo, entre otros aspectos, que permitan establecer planes de acción que definan con plazos determinados las obras, reparaciones, correcciones, adquisiciones y acciones necesarias emanadas del dictamen de auditoría, estén o no normadas, para finalmente ser firmadas entre la autoridad y el empresario y garantizar su cumplimiento mediante fianza.

NOTAS:

Autoregulación

- La responsabilidad y los beneficios de los problemas ambientales no debe recaer exclusivamente en el ámbito gubernamental. En dicho sentido es de gran importancia fomentar el desarrollo de esquemas voluntarios que procuren el mejoramiento ambiental a través de la promoción de las actividades de autoregulación.

NOTAS:



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

TEMA :

**PIEZOMETRÍA Y BALANCE GEOHIDROLÓGICO ZONA METROPOLITANA DE LA
CIUDAD DE MÉXICO**

**ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE – OCTUBRE 1999**

Recarga artificial de agua residual tratada al acuífero del valle de México

Dirección General de Construcción y Operación
Hidráulica-Secretaría General de Obras.-IDDF .
Lesser y Asociados S A de C V

Una de las acciones del Programa de Uso Eficiente del Agua consiste en la recarga artificial al acuífero de la ciudad de México, lo que puede ofrecer beneficios considerables. Sin embargo, existen interrogantes sobre algunos de los efectos que pueda tener dicha recarga, por lo que se determinó que era indispensable llevar a cabo estudios que ayudaran a establecer un proyecto a gran escala. Bajo esta óptica, se formularon los lineamientos para un programa general de recarga al acuífero del valle de México mediante la experimentación en varios pozos, cuyos resultados iniciales se presentan en este trabajo.

La ciudad de México requiere de grandes volúmenes de agua, que actualmente se obtienen tanto de pozos dentro de la ciudad misma, como importando agua de cuencas externas. Los pozos que explotan agua del subsuelo, extraen en conjunto volúmenes tales que sobrepasan la recarga natural del acuífero, lo que ocasiona una explotación reflejada en el abatimiento de los niveles del agua, los cuales alcanzan valores máximos en algunos sitios del orden de 3 metros por año. Los requerimientos de agua para la ciudad han obligado a continuar esta explotación.

Los abatimientos de los niveles del acuífero provocan la compactación de las arcillas y el hundimiento del terreno, lo que a su vez origina diversos problemas, principalmente en el drenaje ciudadano. En la actualidad, los asentamientos del terreno tienen un valor medio de 10 cm anuales, aunque existen valores extremos de 40 centímetros.

Paradójicamente a la explotación del acuífero, el sistema de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de México no ha operado a su máxima capacidad en virtud de que el número de usuarios de este recurso tradicionalmente no ha sido importante. El reúso es una opción para resolver la problemática del abastecimiento de agua potable y representa un paso importante en la optimización del aprovechamiento de los recursos hidráulicos. A

su vez, la recarga artificial de acuíferos con aguas renovadas representa uno de los alcances más significativos de cualquier programa de reúso, ya que su finalidad es la de preservar los recursos acuíferos.

Por lo anterior, se ha deducido que la recarga artificial del acuífero mencionado presenta grandes beneficios, ya que, por una parte, se podrían atenuar los asentamientos del terreno y con ello, proteger en forma local o regional las obras hidráulicas de la superficie, como drenajes y un gran número de cimentaciones de obras civiles. Por otro lado, sería factible controlar el flujo subterráneo y, entre otras cosas, formar barreras. A la vez, se podría utilizar el acuífero como una zona de almacenamiento de agua para su uso futuro. Sin embargo, existen interrogantes sobre algunos de los efectos que podría causar la recarga y el riesgo potencial de afectar de manera importante e irreversiblemente la calidad del agua subterránea, por lo que se consideró indispensable llevar a cabo estudios que generaran la información necesaria para instrumentar un proyecto a gran escala. Tales estudios deben contemplar todos aquellos factores determinantes en los procesos que afectan la composición físico-química y bacteriológica, tanto del agua de recarga como de la almacenada en el acuífero, a fin de contar con elementos de análisis para evaluar el

impacto que tendría un proyecto de este tipo en la disponibilidad de agua potable en un acuífero sujeto a la recarga.

Geología

La ciudad de México se emplaza dentro de una antigua cuenca lacustre cerrada en la que actualmente el drenaje se lleva a cabo de manera artificial hacia el norte. Los materiales que constituyen el subsuelo del valle corresponden a depósitos de aluviones y sedimentos lacustres cuaternarios. Los primeros provenían de las laderas y fueron transportados hacia el centro del valle por corrientes fluviales. Por su parte, los sedimentos lacustres en general sobreyacen a los aluviones y también se interdigitan con ellos a profundidad. En los flancos del valle limitándolo, básicamente hacia el poniente, sur y oriente, se encuentran elevaciones topográficas constituidas por rocas volcánicas que en su mayor parte se comportan como permeables. En las estribaciones de la sierra de las Cruces se encuentra una serie de antiguos depósitos volcánicos y fluviales conocida como Formación Tarango, que produce las lomas del poniente y está constituida primordialmente por arenas, conglomerados, cenizas volcánicas, piroclásticos y aglomerados de mediana a baja permeabilidad. Los materiales volcánicos, en especial las lavas y piroclásticos de tipo basáltico, forman la parte sur del valle y hacia sus estribaciones se encuentran interdigitados con los materiales aluviales y lacustres.

Geohidrología

Las rocas que constituyen el subsuelo del valle de

México pueden agruparse en tres tipos de acuerdo con sus características o capacidad para permitir la infiltración, circulación y almacenamiento del agua subterránea: arcillas lacustres, rellenos aluviales, basallos y piroclásticos (véanse ilustraciones 1 y 2).

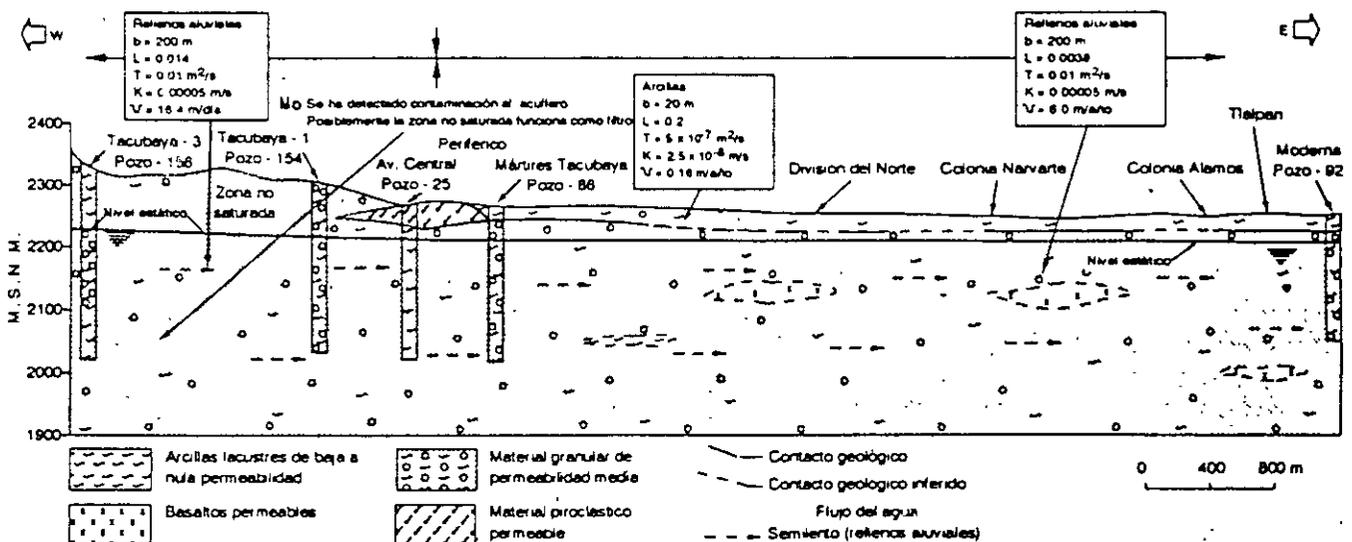
Arcillas lacustres

El primer grupo está formado por arcillas lacustres que cubren la mayor parte del valle. Corresponden a sedimentos finos de permeabilidad reducida, originados por los antiguos lagos del valle de México y tienen espesores que varían de 15 a 60 m. Estudios de mecánica de suelos han identificado, dentro de este grupo, a dos horizontes de arcillas denominadas Formación Arcillosa Superior y Formación Arcillosa Inferior, a las cuales las divide un horizonte arenoso denominado capa dura. Geohidrologicamente este grupo se clasifica como acuitardo. Se encuentra saturado, descansa sobre materiales granulares permeables hacia donde se drena. La pérdida de agua del acuitardo produce la compactación de las arcillas, lo cual es la causa de los hundimientos del terreno. Existen también grietas que se han formado en las arcillas, a través de las cuales se infiltra agua al acuífero a partir de la superficie.

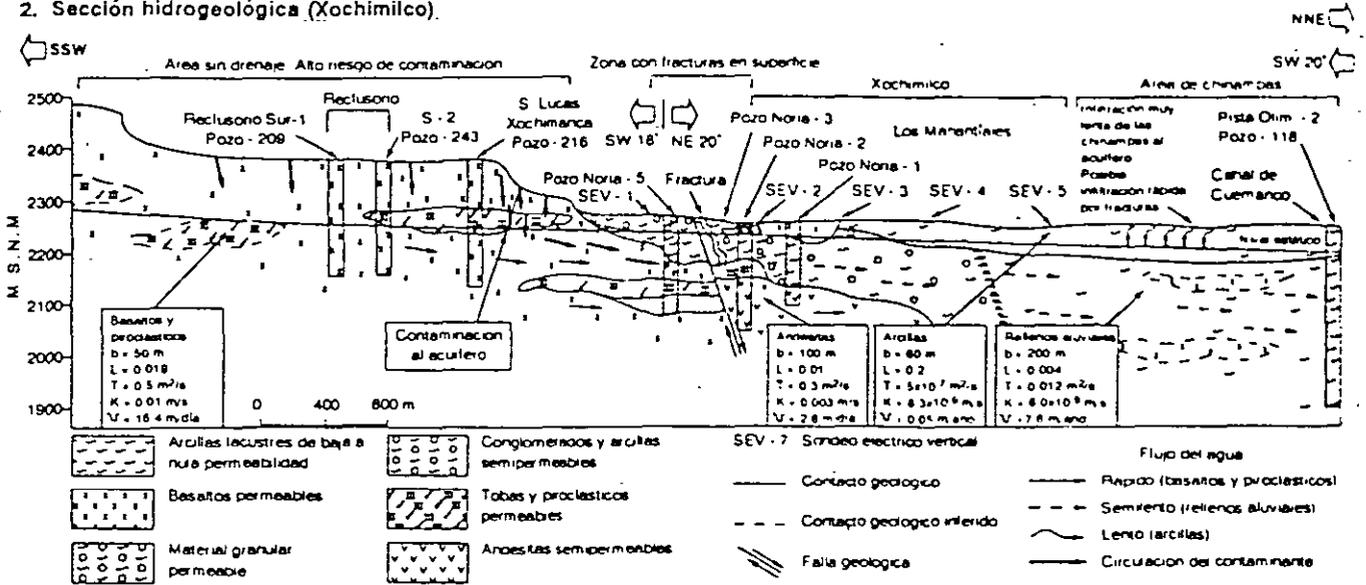
Rellenos aluviales

Las rocas o materiales del segundo grupo corresponden a los rellenos aluviales (gravas, arenas y arcillas). Subyacen a las arcillas lacustres y forman la mayor parte del acuífero de la ciudad; dentro de estos materiales se llegan a encontrar cuerpos tabulares de derrames lávicos de composición basáltica. Tienen

1. Sección hidrogeológica (Nápoles)



2. Sección hidrogeológica (Xochimilco).



una transmisibilidad que varía de 0.001 a 0.012 m²/s; la velocidad del flujo de agua subterránea es de 2.5 a 39.4 m/año.

Basaltos y piroclásticos

El tercer grupo de materiales corresponde a basaltos y piroclásticos, los cuales tienen una alta permeabilidad y permiten el libre flujo del agua a través de ellos. Se encuentran generalmente en las elevaciones topográficas que constituyen las sierras del Chichinautzin y Santa Catarina, y en ocasiones, se prolongan en el subsuelo interdigitados con los aluviones. Su transmisibilidad es de 0.5 m²/s. La velocidad del flujo subterráneo, que varía de 2.3 a 16.4 m/día, depende de la transmisibilidad y del gradiente hidráulico (el cual en ciertos lugares es muy reducido).

Secciones

La sección de la ilustración 1 muestra la geología y geohidrología de la zona central de la ciudad de México. La mayor parte del subsuelo se encuentra constituido por materiales aluviales como arenas, arcillas y gravas, en ocasiones incluyendo tobas; en general, se considera que presentan una permeabilidad media. Llegan a incluir horizontes de materiales piroclásticos y derrames lávicos de composición tanto basáltica como andesítica.

Cubriendo a la mayor parte de la sección y con un espesor aparentemente de 20 m, se encuentra una capa de materiales arcillosos originados por el antiguo lago de México. Estas arcillas presentan de reducida a nula permeabilidad.

En la ilustración 2 se muestra la composición del sur de la ciudad de México. Corresponde a la estratificación de la sierra del Chichinautzin, la que está compuesta por basaltos y materiales piroclásticos de alta permeabilidad, en los que la infiltración es tan alta que prácticamente no existe escorrentía superficial. Los pozos perforados en este tipo de rocas han alcanzado más de 200 m de profundidad. Geológicamente se considera que el espesor de los basaltos en la sierra puede alcanzar varios cientos de metros.

En la zona del valle se encuentran materiales granulares entre los que predominan los finos hacia la superficie; éstos corresponden a arcillas lacustres producto de la sedimentación en el antiguo lago de Xochimilco. Las arcillas tienen un espesor de hasta 60 m y se encuentran cubriendo a los materiales granulares; corresponden a arenas, arcillas y gravas que presentan una permeabilidad media. A la altura del pozo Noria 5, se detectó en la superficie una fractura que podría corresponder a una falla, inferida también por la variación litológica tan notable que presentan los pozos Noria 5 y Noria 2. Estas fracturas o fallas podrían corresponder a zonas de flujo preferente de agua subterránea. En la parte central de la sección, a la altura de los pozos mencionados, se encuentran rocas andesíticas constituyendo parte del subsuelo. Éstos materiales se consideran de una permeabilidad media.

Requerimientos para la recarga

La recarga artificial al acuífero de la ciudad de México puede presentar condiciones favorables para la disminución de la subsidencia del terreno; para el

control del flujo subterráneo; para un mejor manejo del acuífero y para el almacenamiento de agua para uso futuro, con lo que a largo plazo se podría reducir la importación de agua de cuencas externas. Para efectuar la recarga es necesario que se cumplan las dos condiciones siguientes:

- Existencia de sitios y zonas permeables que permitan la infiltración de agua al acuífero. Dichos puntos se pueden alcanzar por medio de pozos, estanques y galerías filtrantes, aunque estos dos últimos requieren de una gran superficie de terreno. Conviene anotar que las condiciones geológicas de la cuenca impiden la infiltración del agua a partir de la superficie prácticamente en toda la zona del antiguo lago, por lo que ésta sólo se puede realizar en los flancos de las sierras. Por su parte, los pozos sí son un medio adecuado, ya que permiten la recarga al acuífero a través de ellos y no requieren de gran extensión de terreno.
- Existencia de volúmenes de agua susceptibles de utilizarse para la recarga. Los volúmenes disponibles en la ciudad de México, corresponden a las aguas residuales renovadas provenientes de plantas de tratamiento distribuidas prácticamente en toda la ciudad, que se deben someter a un tratamiento adicional para que alcancen la calidad deseable para recarga. Otra posible fuente sería el agua de lluvia.

Sitios seleccionados para la recarga

Se visitaron todos los pozos cancelados o fuera de operación ubicados en la ciudad de México, y se seleccionaron 82 que presentaban condiciones favorables para utilizarlos como puntos para recarga. De éstos, se eligió en primer término el pozo San Luis 15 para un programa inmediato de experimentación.

Pozo de recarga San Luis 15

Se seleccionó el pozo San Luis 15 para realizar la recarga experimental al acuífero, debido a las siguientes características: (1) por encontrarse cercano a la planta de tratamiento de San Luis Tlaxialtemalco; (2) porque actualmente no se utiliza para agua potable y (3) por encontrarse lejano de otros pozos de agua potable, evitando de esta manera, el riesgo de una posible contaminación directa al efectuar la recarga.

El agua seleccionada para la recarga corresponde al efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Luis Tlaxialtemalco, dado que ésta cuenta con tratamiento a nivel terciario.

Características

El pozo San Luis 15 se localiza en la porción sur de la zona urbana del Distrito Federal, junto al poblado de San Gregorio Atlapulco y a 4 km al oeste de la planta de San Luis Tlaxialtemalco (véase ilustración 3). Su nivel estático se encuentra a 30.06 m de profundidad y el nivel dinámico a 30.77 m. Tiene una profundidad total de 64 m y fue perforado con una máquina de percusión a una profundidad total de 66.85 m. Está ademado con tubería ciega hasta los 18 m de profundidad en un diámetro de 18 pulgadas; el resto del pozo se encuentra libre de tubería de ademe. Este pozo fue perforado en 1958 y en el atoro efectuado en esa época se midió un nivel estático de 16.8 m, un nivel dinámico a los 17.10 m con caudal de extracción de 100 Vs y un rendimiento específico de 333 Vs por metro de abatimiento. Dicho pozo se encuentra al pie de la sierra del Chichinautzin, la cual está constituida por materiales volcánicos, basálticos, entre los que predominan los derrames lávicos asociados con piroclásticos, que varían desde cenizas hasta escorias de gran tamaño.

El corte litológico de este pozo indica que en los primeros 9 m se encontraron fragmentos de material basáltico empacados en arcilla y de los 9 a los 66.85 m, basaltos, que varían en compacidad o forma de presentación. Los materiales basálticos que constituyen esta zona tienen un gran número de fracturas que le imprimen una alta permeabilidad, lo cual es notorio al observar los rendimientos específicos de los pozos que se encuentran en esta área.

La velocidad del agua en este tipo de materiales es difícil de cuantificar. La transmisibilidad es alta

3. Plano de localización



y el gradiente hidráulico muy bajo. Por ello, el agua tiene facilidad para circular rápidamente, pero el bajo gradiente ocasiona que ésta se encuentre casi estática. Considerando un espesor de basaltos de 150 m, un gradiente hidráulico de 0.015, una transmisibilidad de 0.05 m²/s y una permeabilidad de 0.0033 m/s, se obtiene que la velocidad de circulación del agua subterránea es de 4.3 m/día.

Calidad del agua de recarga

Se programa utilizar agua tratada proveniente de la planta de San Luis Tlaxiátemalco, cuyas normas establecidas para el efluente se presentan en el cuadro 1.

Caudal de inyección

Debido a que el pozo San Luis 15 se encuentra atravesando materiales basálticos de alta permeabilidad, puede permitir la infiltración de un caudal alto de agua. En la primera etapa del proyecto, se inyectará un caudal de 75 l/s que corresponde al gasto de operación actual de la planta de tratamiento. En el futuro se estudiará la conveniencia de incrementar dicho caudal.

Adaptación del pozo de recarga

Para la recarga a través del pozo San Luis 15, se vertirá el agua por gravedad desde la superficie y se harán mediciones piezométricas, de caudal y de calidad del agua. De acuerdo con las experiencias de recarga artificial que se realizan en la planta Fred Herbey de El Paso, EUA, es conveniente disponer el agua de recarga por medio de un tubo abajo del nivel estático, para evitar la aereación que provoca taponamiento del pozo. Tomando en cuenta lo anterior y el diámetro actual del pozo, se consideró que la forma más apropiada consistía en colocar tres tuberías de inyección de 4 pulgadas de diámetro cada una (véase ilustración 4), para permitir una recarga unitaria (por cada tubo de 4 pulgadas) cercana a los 25 l/s. Además, se tiene la ventaja de que para caudales menores se utilizan sólo una o dos tuberías, según se requiera.

La adaptación realizada consistió en la colocación de una válvula de 10 pulgadas de diámetro que se conecta por medio de una brida a la conducción proveniente de la planta de San Luis Tlaxiátemalco. La válvula mencionada tiene tres salidas de 4 pulgadas que conectan con un codo de tubería de PVC de 4 pulgadas de diámetro y 32 m de longitud, colocada dentro del pozo.

1. Normas de calidad del efluente de la planta de tratamiento de San Luis Tlaxiátemalco

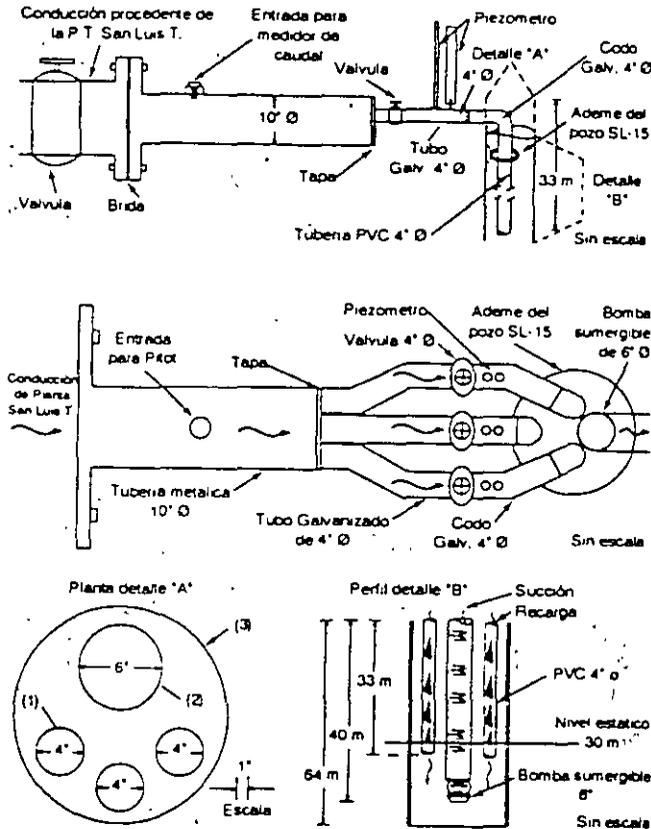
Parámetro	Norma del efluente
Físicos	
pH	6.5
Color	60
Conductividad (mmhos/cm)	700
Sólidos totales	3000
STP	1500
SIV	1000
SOT	500
SOF	1000
SOV	500
SSL	500
SSF	1000
SSV	150
Sólidos sedimentales (ml/l)	10
Químicos orgánicos	
Alcalinidad total	500
Alcalinidad a la fenolftaleína	100
Carbonatos	100
Dureza total	
Bicarbonatos	0.0
Cloruros	500
Nitrógeno amoniacal	50
Nitrógeno total	100
Fósforo total	500
Fosfatos totales	
Boro	20
Químicos orgánicos	
DBD soluble	200
DQO soluble	400
Grasas y aceites	500
S.A.A.M	10
Biológicos	
Coliformes totales col/100 ml	4000
Metales	
Calcio soluble	1500
Magnesio soluble	1000
Sodio soluble	1000
Potasio soluble	1500
Calcio total	1500
Magnesio total	1000
Sodio total	1000
Potasio total	1500
Hierro soluble	0.05
Manganeso soluble	0.05
Plomo soluble	0.05
Cadmio soluble	0.01
Mercurio soluble	1.5 E-4
Arsénico soluble	1.7 E-4
Cromo soluble	0.5
Hierro total	0.30
Manganeso total	0.05
Plomo total	0.05
Cadmio total	0.01
Mercurio total	1.5 E-4
Arsénico total	1.75 E-4
Cromo total	0.05

Concentraciones en mg/l, excepto cuando se indican S.A.A.M. y pH en unidades

Infraestructura para el monitoreo

Junto al pozo anterior, se perforaron tres pozos cuyo objetivo es contar con sitios "aguas abajo" del flujo subterráneo del pozo de recarga, a través de los cuales se puedan obtener muestras de agua

4. Adaptación del pozo SL-15 para recarga



del acuífero, así como medir la posición y posibles fluctuaciones del nivel piezométrico al efectuar la recarga artificial.

Colmatación por la recarga

Uno de los problemas que se presenta durante la recarga artificial es la colmatación o taponamiento del pozo y de su entorno, producido por la acumulación de sólidos finos, y reacciones químicas. Para conocer el grado de colmatación en diferentes medios y bajo diferentes recargas y, determinar técnicas de limpieza y eliminación del taponamiento, paralelamente a los trabajos de recarga se construyeron módulos a escala para experimentación de la colmatación.

Conclusiones

- Las características geológicas y geohidrológicas del acuífero de la ciudad de México permiten su recarga
- Los volúmenes susceptibles de ser utilizados para la recarga corresponden a las aguas residuales renovadas provenientes de plantas de tratamiento.
- Se visitaron todos los pozos cancelados o fuera de operación de los cuales se encontraron 82

como sitios posible de ser incorporados a un programa de recarga. De ellos, se seleccionó el pozo San Luis 15, para un programa inicial a nivel experimental.

- El pozo San Luis 15 fue seleccionado para recarga por: (1) encontrarse cercano a la planta de tratamiento de San Luis Tlaxialtemalco; (2) porque actualmente no se utiliza para agua potable y (3) por encontrarse lejano de otros pozos de agua potable.
- El agua para recarga proviene de la planta de San Luis Tlaxialtemalco, la cual se trata a nivel terciario y cumple con las normas para inyección.
- El Pozo San Luis 15 puede permitir una recarga de 75 l/s que corresponde al gasto de operación actual de la planta.
- La recarga es por gravedad y se dispone mediante tuberías abajo del nivel estático para disminuir la colmatación.
- Se encuentran tres pozos de monitoreo junto al pozo San Luis 15, los cuales se muestrean y analizan periódicamente.
- Se están realizando experimentaciones a escala para definir el grado de colmatación o taponamiento de los pozos durante la recarga, bajo diferentes gastos de inyección y en diferentes litologías.

Referencias

- Aller, Linda et al. *Handbook of suggested practices for the design and installation of ground-water monitoring wells*, National Water Well Association, 398 pp., 1989.
- DDF. *Proyecto de demostración de recarga de aguas residuales tratadas*, elaborado por PLANIMEX, Ingenieros Consultores, S. A. para la DGCOH, 1982.
- DDF. *Construcción y operación de un módulo experimental de recarga artificial en la zona de San Luis Tlaxialtemalco*, elaborado por Lesser y Asociados, S. A. para la DGCOH, 1989.
- FAO: *Recarga de acuíferos. Apoyo de emergencia a la zona lacustre de Xochimilco-Tláhuac*, elaborado por el Ing. Juan Manuel Lesser, 1988.
- Kerr, Robert S. *An introduction to the technology of subsurface wastewater injection*, US Environmental Protection Technology Series, 345 pp., 1981.
- PettyJohn, Wayne A. *Introduction to artificial ground-water recharge*, NWWA/EPA Series 44 pp., 1981.
- Scalf, Marion R. et al. *Manual of ground-water sampling procedures*, NWWA/EPA Series 93 pp., 1981.
- United Nations. *Ground-water storage and artificial recharge*, Natural resources/Water Series No. 2, 269 pp., 1975.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

TEMA :

GRUPO DE TRATAMIENTO Y REÚSO

**DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE - OCTUBRE 1999**

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

CONTENIDO		PAGINA
Contenido		i
Índice de tablas		ii
Índice de figuras		iii
1.	CANTIDAD DEL RECURSO	1
2.	CANTIDAD Y CALIDAD	1
2.1	Calidad de las aguas subterráneas	2
2.2	Las aguas subterráneas en México	2
3.	USOS	4
4.	CLASIFICACIÓN DE LOS COMPUESTOS PRESENTES EN EL AGUA	6
5.	DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES SUSTANCIAS CONTAMINANTES DEL AGUA	9
5.1	Metales	9
5.1.1	Aluminio, Al	11
5.1.2	Antimonio, Sb	11
5.1.3	Arsénico, As	11
5.1.4	Bario, Ba	11
5.1.5	Berilio, Be	11
5.1.6	Cadmio, Cd	12
5.1.7	Cobre, Cu	12
5.1.8	Cromo, Cr	12
5.1.9	Hierro, Fe	12
5.1.10	Manganeso, Mn	12
5.1.11	Mercurio, Hg	13
5.1.12	Molibdeno, Mo	13

5.1.13	Níquel, Ni	13
5.1.14	Plata, Ag	13
5.1.15	Plomo, Pb	13
5.1.16	Selenio, Se	14
5.1.17	Sodio, Na	14
5.1.18	Uranio, U	14
5.1.19	Zinc, Zn	14
5.2	Nutrientes	14
5.2.1	Nitrógeno, N	14
5.2.2	Fósforo, P	16
5.3	Contaminantes orgánicos	16
5.3.1	Ácidos fúlvicos y húmicos	18
5.3.2	Fenoles	18
5.3.3	Bifenilos policlorados, BPC	18
5.3.4	Aceites minerales y productos del petróleo	18
5.3.5	Hidrocarburos aromáticos policíclicos	19
5.3.6	Plagucidas	19
5.4	Contaminantes biológicos	21
5.4.1	El cólera en México	22

ÍNDICE DE TABLAS

PAGINA

Tabla 1	Balance de agua subterránea, m ³ /s	3
Tabla 2	Extracción, consumo y descarga en el país por diferentes usos	5
Tabla 3	Clasificación por grupo de compuestos presentes en el agua	7
Tabla 4	Parámetros convencionales	8
Tabla 5	Sustancias tóxicas prioritarias en agua propuestas para México	9
Tabla 6	Límites establecidos para metales prioritarios	10
Tabla 7	Eliminación de metales tóxicos prioritarios	10
Tabla 8	Compuestos orgánicos que se pueden encontrar en el agua potable	17
Tabla 9	Plaguicidas prohibidos y de uso restringido en México	20
Tabla 10	Plaguicidas autorizados o de uso restringido en México pero que han sido prohibidos, retirados o muy restringidos en otros países	20
Tabla 11	Clasificación de los microorganismos	21
Tabla 12	Principales microorganismos que provocan enfermedades por el consumo de agua	22

ÍNDICE DE FIGURAS

PAGINA

Figura 1	Balace hidráulico nacional (anual)	3
Figura 2	Calidad de los cuerpos de agua subterráneos	4
Figura 3	Empleo del agua a escala mundial	5
Figura 4	Potencia] de Uso del agua en algunas cuencas del país	6
Figura 5	Casos mensuales de cólera confirmados en México (1991-1994)	23

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

*Dra. Blanca E. Jiménez Cisneros
GRUPO: TRATAMIENTO Y REUSO
Instituto de Ingeniería, UNAM*

1. CANTIDAD DEL RECURSO

Se calcula que en la Tierra existen aproximadamente 1'385,000,000 km³ de agua, de los que el 97.3% es salada, el 2.08% se encuentra congelada en los polos y sólo una pequeña parte está efectivamente disponible para nuestras necesidades vitales. La renovación natural del recurso se realiza a través del ciclo hidrológico. Por precipitación cae 28% del agua en la tierra y el 72% en el mar. Del agua que cae en la tierra:

- 7% se infiltra a los acuíferos;
- 8% escurre al mar; y,
- 13%, regresa a la atmósfera por evaporación (de los cuerpos de agua superficiales) y evapotranspiración (de la cubierta vegetal).

De tal forma, sólo el 7% del agua de lluvia se recupera en los diversos cuerpos de agua para su posible empleo como agua dulce, mientras que el 93% se pierde por medios físicos o biológicos (evapotranspiración).

Aparte de la condición climática, la distribución y abundancia del agua en el Mundo depende de la geología, orografía, tipo de suelo y cubierta vegetal. Estos factores por sí mismos imponen variaciones espaciales y temporales en la abundancia del recurso. En especial, en la disponibilidad del agua subterránea (principal fuente de agua para consumo humano debido a que generalmente tiene una mejor calidad) influye el tipo de suelo (permeabilidad, grado de drenaje y la relación entre erosión e infiltración). Como resultado, la distribución mundial del agua útil es muy desigual, a tal grado que ocho países (Canadá, Noruega, Brasil, Venezuela, Suecia, Australia, la Ex-Unión Soviética y los Estados Unidos) concentran prácticamente el 90% de ella, mientras que otros (Egipto, Sudáfrica y Suazilandia, en especial) deben completar su abastecimiento con la importación de los excedentes de otras naciones. Por si fuese poco, la carencia de infraestructura adecuada para el aprovechamiento del agua acrecienta las diferencias, ya que mientras 3,400 millones de personas cuentan con una dotación de apenas 50 L/d, en países desarrollados este valor sobrepasa fácilmente los 400 L/hab-d (Garduño, 1992). El índice de escasez calculado con la metodología de Falkenmark (1989), sitúa a México como una región con disponibilidad de agua comprometida por su variación temporal y su posible contaminación, de tal suerte que si no desarrollamos una administración adecuada para su manejo, almacenamiento y protección, los mexicanos sufriremos escasez de agua.

2. CANTIDAD Y CALIDAD

La disponibilidad del agua depende no sólo de la cantidad, sino también de su calidad. Aunque haya agua, si está contaminada a tal grado que no sea acorde con el uso que se le quiere dar, su empleo se limita. En la antigüedad, la calidad del agua se calificaba sólo por su aspecto, sabor, color y olor. Actualmente los avances científicos y tecnológicos han repercutido en el desarrollo de técnicas analíticas y procesos capaces de identificar y de remover una amplia lista de contaminantes, a grado tal, que es posible obtener agua "potable" mediante la depuración del agua residual. Sin embargo, la aplicación de tales conocimientos debido a su costo no se lleva a cabo comúnmente, más aún no se plasman en políticas integrales de administración del agua que busquen:

- * La conservación del recurso (agua superficial y subterránea),
- * la preservación de su calidad y
- * su uso eficiente (reúso, ahorro y recirculación del agua).

Así, queda aún mucho por lograr en términos de la mejora de la calidad y la distribución de la cantidad, tanto en el Tercer Mundo como en los países desarrollados en aspectos que pueden ser similares o muy diferentes. Los retos actuales abarcan desde el suministro de agua microbiológicamente aceptable mediante el empleo de procesos sencillos, (como la cloración) hasta el desarrollo de sofisticados métodos de control para remover contaminantes complejos y de daño a largo plazo e incluso de efectos poco conocidos.

2.1 Calidad de las aguas subterráneas

Un acuífero es una formación geológica que almacena agua y actúa como depósito y reserva. La mayoría de los acuíferos conforman grandes extensiones; su alimentación generalmente es por el aporte de aguas pluviales, corrientes superficiales y lagos que se infiltran en el suelo. Dentro de un acuífero el agua escurre por gravedad desde las zonas de recarga hacia las de descarga. Estas descargas pueden ser ríos, lagos o manantiales. Su explotación se efectúa mediante el bombeo en pozos.

Usualmente, la calidad del agua subterránea es superior a la del agua superficial con respecto al contenido bacteriológico, turbiedad y concentraciones orgánicas totales. La calidad del agua subterránea puede variar de un sitio a otro, debido a los cambios en las condiciones hidrológicas y geológicas de cada lugar y puede tener altos contenidos de metales (en general, hierro y manganeso) por disolución de componentes del suelo en el cual se encuentra contenida. Se considera que es más económico suministrar agua subterránea que agua superficial debido a su bajo costo de tratamiento, siempre y cuando no se encuentre en zonas muy profundas o de difícil perforación y su calidad sea buena. Esta aseveración no toma en cuenta la disponibilidad del recurso: el acuífero es un recurso no renovable si se explota a una tasa mayor a la de la recarga y llega a agotarse o a deteriorarse en calidad.

2.2 Las aguas subterráneas en México

De la superficie total del país, el 52% es árido y semiárido, el 13% es trópico seco, el 20% es templado y el 15% trópico húmedo. La precipitación pluvial anual promedio en el territorio nacional es de 777 mm (1.522×10^{12} m³) de los cuales 33,739 m³/s se evaporan, 13,001 m³/s corren en los cuerpos superficiales y 1,522 m³/s se transforman en escurrimientos, que aunados a la recarga inducida en zonas de riego (476 m³/s) resultan en una recarga total de 1998 m³/s (Plan Hidráulico 1995-2000). Al igual que en el resto del mundo, la distribución es muy irregular y se concentra principalmente en el sur en las cuencas de los ríos Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Pánuco y Balsas durante un periodo de pocos meses. En el norte y altiplano central –regiones que representan más de la mitad del territorio nacional– se registra casi el 20% del escurrimiento medio anual y es allí donde se encuentran las dos terceras partes de la población, la mayor parte de la industria y las zonas agrícolas. Así, aún cuando el balance global del país es positivo, los balances regionales en casi la mitad del territorio muestran un déficit considerable. Tal es el caso de las regiones hidrológicas de Baja California, Bravo, Lerma y el Valle de México. La Figura 1 muestra el balance hidráulico nacional.

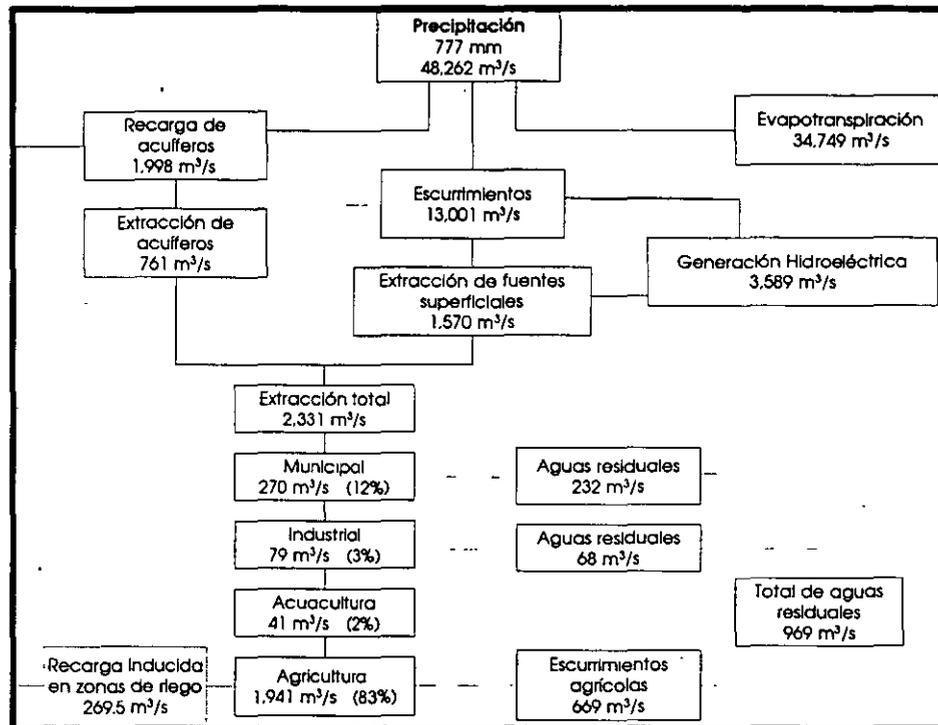


Figura 1 Balance Hidráulico Nacional (anual)
Fuente: OCDE, 1998

En el país se han identificado 459 acuíferos, para los cuales se estima una extracción total de 24 km³ anuales, asimismo se han detectado problemas de sobreexplotación en 80 acuíferos, ubicados principalmente en las regiones noreste, norte y Lerma-Balsas, la tabla 1 muestra el balance hidrológico del agua subterránea.

Tabla 1 Balance de agua subterránea, m³/s

Región	No. de acuíferos	Recarga	Extracción	Disponibilidad	Acuíferos con más del 20% de sobreexplotación
Noroeste	149	161.7	158.9	2.9	20
Norte	86	154.4	158.5	-4.1	20
Noreste	61	52.3	46.0	6.3	17
Lerma-Balsas	92	258.8	234.7	23.8	19
Valle de México	56	62.2	97.7	-35.8	3
Sureste	45	1293.8	63.1	1231.0	1
Total nacional	459	1978.4	760.7	1224.0	80

Adaptado de: Plan Hidráulico 1995-2000

La contaminación de los acuíferos sobreexplotados, en más del 20%, ha ocasionado problemas de asentamiento del subsuelo, intrusión salina y migración de contaminantes. Actualmente y desde 1974, como medida de prevención y control de la contaminación, la Red Nacional de Monitoreo (RNM) cuenta con 793 estaciones, apoyados en 27 laboratorios estatales, de dichas estaciones, 16 forman parte del Programa Mundial de

Monitoreo de la Calidad del Agua. La Figura 2 presenta un panorama general de la calidad del agua subterránea.



Figura 2 Calidad de los cuerpos de agua subterráneos
Fuente: Plan Hidráulico 1995-2000

3. USOS

Los usos que se pueden dar al agua son muchos y se clasifican en:

- a) Consumo humano (bebida, cocina y procesamiento de alimentos).
- b) Limpieza personal.
- c) Cultivo de peces, mariscos o cualquier otro tipo de vida acuática.
- d) Agricultura.
- e) Industria.
- f) Municipales (riego de jardines, lavado de coches, fuentes de ornato, lavado de calles e instalaciones públicas).
- g) Recreativos (natación, vela, etc.)
- h) Transporte de desechos.

El último uso (transporte de desechos) aunque pareciera inaceptable, es un uso que la sociedad da actualmente, y con frecuencia, a muchos cuerpos de agua a pesar de que esta práctica limita la posibilidad de emplear el agua para otros fines. La Figura 3 muestra el empleo del agua en el ámbito mundial.

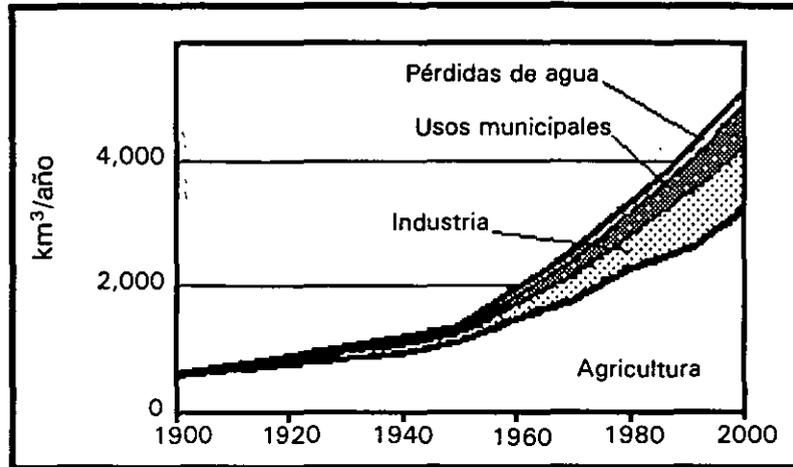


Figura 3 Empleo del agua a escala mundial
Fuente: Postel, 1992

En México, la extracción del agua alcanza cerca de 162.7 km^3 por año ($5,159 \text{ m}^3/\text{s}$), esto es, 45% de la precipitación del país. La generación hidroeléctrica demanda el mayor volumen de extracción (60%), mientras que la irrigación representa el 80% del consumo. La Tabla 2 muestra, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, la extracción y uso del agua sin considerar la generación de energía. Cabe mencionar que México ocupa el séptimo lugar mundial en áreas irrigadas (6 de los 21 millones de hectáreas son de riego). Con respecto a los usos municipales, el 83.5% de la población cuenta con servicios de agua potable y 67% con alcantarillado según datos del Plan Hidráulico 1995-2000.

Tabla 2 Extracción, consumo y descarga del agua en el país por los diferentes usos

USO	EXTRACCIÓN		CONSUMO		DESCARGA	
	m^3/s	%	m^3/s	%	m^3/s	%
Riego	1760	77	1478	88	282	46
Industria	295	13	117	7	178	26
Usos municipales	235	10	86	5	149	25
TOTAL	2290	100	1681	100	609	100

Fuente: Comisión Nacional del Agua, 1995

La explotación de los acuíferos representa el 27% de la extracción total y es muy notorio que el sector que más la emplea es el agrícola (76% del total). Normalmente, este tipo de agua es considerada de muy alta calidad y se prefiere preservar para el consumo humano, sobretodo porque el uso del agua para riego tiene eficiencias muy bajas (del orden del 50%).

El agua -a diferencia del aire que es una mezcla de gases- tiene una composición precisa (H_2O) y por lo tanto es fácil identificar los compuestos ajenos a ella. Sin embargo, la definición de cuáles son contaminantes es difícil. Es un hecho que el agua rara vez se encuentra en forma pura y, afortunadamente, para fines prácticos no se le requiere así o no importa el que contenga otros compuestos; todo depende del uso que se le dé.

En general, se considera como "contaminante" al exceso de materia o energía (calor) que provoque daño a los humanos, animales, plantas y bienes, o bien, que perturbe negativamente las actividades que normalmente se desarrollan cerca o dentro del agua. De esta forma, no existe una división precisa entre las aguas contaminadas y

las no contaminadas; este calificativo se atribuye en función del uso, las exigencias higiénicas y del grado de avance de la ciencia y la tecnología para determinar los efectos y medir los contaminantes. A pesar de la dificultad para definir la contaminación, es claro que ésta provoca el abatimiento o muerte de la flora y fauna, impide el uso del agua en industrias o ciudades y deteriora el ambiente e incluso el paisaje.

El origen de la contaminación es muy variado y son los desechos urbanos e industriales, los drenados de la agricultura y de minas, la erosión, los derrames de sustancias tóxicas (accidentales o intencionados), los efluentes de plantas depuradoras, los subproductos de los procesos de depuración, la ruptura de drenajes y el lavado de la atmósfera los que la causan, entre otros. No hay duda que el "solvente universal" no sólo disuelve sino además arrastra y emulsiona gran número de compuestos con los que entra en contacto a lo largo de su ciclo y que modifican su calidad. El problema del agua es complejo: para poder hacer uso de ella se requiere que exista tanto en la calidad adecuada como en la cantidad suficiente durante un período determinado y en una época del año definida. Una herramienta para evaluar la cantidad disponible de agua tomando en cuenta su calidad son los índices de calidad del agua. Jiménez *et al.*, (1992) desarrollaron el cálculo de un índice conocido como Potencial de Uso (PU). Con él se toma en cuenta la calidad del agua a partir de la información disponible, es decir, por medio de la caracterización¹ (actual y futura) de los cuerpos de agua, el empleo que se les va a dar y la cantidad disponible (idealmente "ecológicamente disponible") y se determina el promedio del número de veces que los parámetros, de los que se tiene información para una región dada, exceden el criterio de un uso determinado. La Figura 4 muestra las principales cuencas contaminadas del país en función del Potencial de Uso del agua para abastecimiento en los cuerpos de agua superficiales desarrollado por Jiménez *et al.*, 1992.



Figura 4 Potencial de Uso del agua en algunas cuencas del país

4. CLASIFICACIÓN DE LOS COMPUESTOS PRESENTES EN EL AGUA

La barrera entre qué es contaminante y qué es un compuesto benéfico muchas veces es cuestión de la cantidad en la cual se encuentra una sustancia, valor que no es universal para los seres vivos o usos del agua. De acuerdo con su naturaleza se distinguen los contaminantes químicos, los biológicos y los físicos.

¹ Por caracterización del agua se entiende la medición de diversos parámetros físicos, químicos y biológicos, Ej. la DQO (demanda química de oxígeno), los SST (sólidos suspendidos totales) y el contenido de coliformes fecales.

- **Químicos.**– Los compuestos químicos provienen de una gran variedad de fuentes, como los drenados de minas, desechos solubilizados de la agricultura, los derrames de petróleo, los plaguicidas, las aguas residuales municipales, los desechos líquidos industriales y los compuestos radiactivos, entre otros. Producen efectos diversos y pueden ser de origen natural o sintético. Algunos son desechados directamente, otros, se forman por la reacción entre diferentes compuestos en el agua y por último, una pequeña fracción, se forma durante el procesamiento del agua. Entre estos últimos se encuentran los organoclorados (THM y cloroformo, principalmente) que se forman durante la desinfección del agua con cloro.
- **Biológicos.**– Son seres vivos que en muchos casos provocan enfermedades en el hombre o animales. Las más comunes en el hombre son la tifoidea, la salmonelosis, la disentería, el cólera y la helmintiasis. Los agentes que las causan entran al agua a través de las heces fecales de humanos o animales. Para tener una idea de la magnitud de este problema, se estima que el 80% de todas las enfermedades y más de un tercio de los fallecimientos en países en vías de desarrollo se deben al consumo de agua contaminada.
- **Físicos.**– Son alteraciones de las propiedades físicas del agua como la temperatura, color o turbiedad. Su origen y efectos son diversos.

Atendiendo a las dimensiones de los contaminantes existe:

- ♦ **Materia suspendida.**- Corresponde a moléculas en fase dispersa y con un diámetro equivalente entre 1 y 100 μm .
- ♦ **Materia coloidal.**- Es materia suspendida con características similares a la materia disuelta. Tiene diámetros equivalentes entre 10^{-3} y 1 μm y se caracteriza por ser de sedimentación muy lenta.
- ♦ **Materia disuelta.**- Son moléculas o iones disueltos con diámetro equivalente entre 10^{-5} y 10^{-3} μm .

En general, la dificultad para la remover los contaminantes es de mayor a menor en este orden: disueltos, coloidales y suspendidos.

Otra clasificación tiende a agrupar compuestos similares, independientemente de sus efectos o fuentes. Los grupos más comunes que se distinguen son los que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 Clasificación por grupo de compuestos presentes en el agua

• Biológicos	• Éteres	• No metales
• Bifenilos policlorados	• Fenoles	• Nutrientes (N y P)
• Compuestos orgánicos biodegradables	• Hidrocarburos	• Radiactivos
• Orgánicos refractarios	• Metales	• Radicales (CN ⁻)
• Detergentes		

De acuerdo a su clasificación como contaminantes convencionales o tóxicos prioritarios, la Tabla 3 muestra los parámetros empleados para medir los contaminantes convencionales (Tabla 4), los primeros en ser atendidos por la Ingeniería Ambiental.

Tabla 4 Parámetros convencionales

CLASIFICACION CONVENCIONAL	PARÁMETRO
Físicos	Color, Olor, Sabor, Temperatura, Turbiedad, Sólidos y Conductividad
Químicos	Alcalinidad, Oxígeno disuelto, pH, No metales, Metales, Nutrientes (N y P), Dureza y Cloro residual
Materia orgánica	Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Carbono Orgánico Total (COT), Extractables con cloroformo, Sustancias activas al azul de metileno (SAAM), Grasas y aceites y Fenoles.
Bacteriológicos	Coliformes fecales, <i>Vibrio cholerae</i> , <i>Shigella</i> , <i>Salmonella</i> y <i>Giardia Lamblia</i>

Un tóxico es cualquier sustancia química capaz de causar daños, debilitar o matar a cualquier organismo vivo. Los efectos que producen son función del tipo de sustancia, concentración y metabolismo. En general son teratogénicas (que produce anomalías durante el periodo de gestación que producen monstruosidades en animales o plantas), mutagénicas (produce cambios genéticos), carcinogénicas o venenosas. Una característica relevante es que son acumulables, es decir, su efecto se manifiesta sólo después de un cierto período de exposición. Entre una concentración tolerable y letal hay un nivel intermedio donde se presentan efectos secundarios. Este valor inferior corresponde al umbral del valor límite (UVL) y representa la máxima concentración a la cual un organismo puede ser expuesto continuamente sin sufrir trastornos. El UVL se utiliza para definir los estándares de contaminación.

El concepto de tóxico prioritario nació por un conocido episodio ambiental a finales del siglo XIX, cuando William T. Love inició la construcción de un canal para unir el río Niágara con las cataratas del mismo nombre. Por diversas razones no se concluyó la obra y quedó una zanja de 1.6 km de largo que fue llamada "El Canal del Amor". Poco a poco, las industrias químicas emplearon el canal para la disposición de sus desechos. En una década, el canal recibió aproximadamente 20,000 toneladas de compuestos peligrosos. En febrero de 1978 la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) encontró la presencia de 27 compuestos orgánicos sintéticos y 10 metales. Paralelamente se detectaron muchos casos de intoxicación por lo que se declaró la zona como de desastre y se evacuaron 949 familias. Este incidente inició el interés por el control de los tóxicos sintéticos, un nuevo grupo de contaminantes.

Actualmente, existe una lista bien definida de compuestos que constituyen una prioridad de control en la estrategia del agua en Estados Unidos, toda vez que éste país ha superado aceptablemente los problemas de contaminación biodegradable y microbiológica. La lista fue establecida al considerar que el hombre sintetiza comúnmente más de 80,000 sustancias y ante la imposibilidad de controlarlas todas; por lo que se efectuó una selección para determinar cuales son de mayor interés. La diferencia de criterios ha llevado a que se definan diferentes números y tipos de compuestos en diversas regiones. La Comunidad Europea ha identificado 1,500 sustancias que son susceptibles de incluirse en la lista de tóxicos, de las cuales 1,000 son producidas en cantidades inferiores a 100 ton/año; 186 mayores de 100 ton/año; 44 mayores de 10,000 ton/año y 25 exceden las 100,000 ton/año. La EPA seleccionó 126, la Comunidad Europea menciona 129 ("Lista negra I"), la OMS y la Comisión del Rin mencionan alrededor de 80. La Comisión para el Aseguramiento de la Calidad del Agua de los Grandes Lagos señaló en 1985 una lista de 12 tóxicos persistentes de interés para esta zona.

En México, no ha sido definida una lista a este respecto; sin embargo con el objeto de que cuente con una lista de sustancias tóxicas de atención prioritaria en sus cuerpos de agua, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, a partir de un estudio bibliográfico, propuso un total de 52 sustancias, de las cuales el 77% corresponden a plaguicidas y el 23% son de origen industrial (Tabla 5). Esta selección tiene como fundamento su frecuencia a escala nacional, la persistencia en zonas agrícolas, su toxicidad, la bioacumulación, la bioconcentración y la movilidad de los contaminantes en cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Asimismo, México tiene un acuerdo en el marco del Tratado de Libre Comercio (TLC) para la reducción de ciertas sustancias tóxicas

como los BPC, el clordano, el DDT y el Hg, así como un compromiso de vigilancia y reducción del Pb y el Cd con la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE).

Tabla 5 Sustancias tóxicas prioritarias en agua propuestas para México

COMPUESTOS TÓXICOS					
1.	1,1,1-tricloroetano	19.	Diflubenzurón	37.	Oxadiazón
2.	2,4-D	20.	Dimetoato	38.	Paraquat
3.	Aldicarb	21.	Endosulfán	39.	Pentaclorofenol
4.	Benceno	22.	EPN	40.	Prometrina
5.	Captofol	23.	Fenitrotión	41.	Quinometionato
6.	Carbaril	24.	Fenol	42.	Quitozeno
7.	Cianuros	25.	Fluometurón	43.	Setoxidin
8.	Clordano	26.	Folpet	44.	Simazina
9.	Cloroformo	27.	Forato	45.	Terbutrina
10.	Clorotalonil	28.	Fosetil-al	46.	Tetracloruro de carbono
11.	Clorotolurón	29.	Imazapir	47.	Thiabendazol
12.	Cloruro de metileno	30.	Imazetapir	48.	Tolueno
13.	Cobre(compuestos de)	31.	Isoforona	49.	Tricloroetileno
14.	Dalapón	32.	Lindano	50.	Triflurarina
15.	Dazomet	33.	Maneb	51.	Triforina
16.	Diclorvos	34.	Metomilo	52.	Vinclozólín
17.	Dicofol	35.	MSMA		
18.	Dietiltalato	36.	Naftaleno		

Fuente: Arévila, Ramos y Jiménez, 1996

5. DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES SUSTANCIAS CONTAMINANTES DEL AGUA

En los incisos siguientes se tratarán, de forma global, los principales contaminantes del agua. Cabe mencionar que el establecimiento de los criterios para definir los límites para su consumo es un proceso muy complejo, ya que debe considerar la ingesta total por agua, aire y alimentos, misma que varía de acuerdo con la región geográfica, costumbres y el nivel económico. Por otra parte y, en general, la definición de la dosis dañina se deriva de estudios toxicólogos y no epidemiológicos, que consisten en dar diversas dosis de un compuesto a poblaciones de animales (generalmente ratones) en condiciones controladas y observar sus efectos, en lugar de efectuar las observaciones directamente en seres humanos. De tal forma que es necesario extrapolar los resultados obtenidos en animales a los humanos lo que se hace en forma indirecta estableciendo dosis en mg/kg de tejido vivo y empleando factores de incertidumbre².

5.1 Metales

Un metal es un elemento que transmite bien la electricidad, es flexible y posee brillo. Algunos metales son necesarios para los seres vivos, pero pueden llegar a ser tóxicos si rebasan ciertas concentraciones. Químicamente se entiende por metal pesado aquel cuya densidad es mayor a 5 g/cm³, pero la costumbre ha hecho que la connotación se emplee para aquéllos que son tóxicos y que en realidad abarcan los grupos de transición y postransición de la tabla periódica (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn) al igual que el de los metaloides (As y Se). En consecuencia, los "metales pesados", como se acostumbra entender en Ingeniería Ambiental, no son todos metales ni pesados, desde el punto de vista químico.

² Los factores de incertidumbre consideran diversos factores como son la variación entre especies, la variación dentro de la especie, la insuficiencia de los estudios realizados, así como la naturaleza o gravedad del efecto considerado.

La concentración de metales en agua residual doméstica es generalmente baja y proviene de compuestos específicos (Tabla 6), al contrario de algunas descargas industriales. Los metales que están en forma insoluble son fácilmente eliminados por sedimentación primaria (aproximadamente entre el 36% y 62%), en cambio, los solubles son difíciles de remover y requieren etapas específicas de tratamiento, aunque en bajas concentraciones son parcialmente eliminados durante el tratamiento secundario de tipo biológico. La Tabla 7 hace un resumen de los principales métodos de control para los metales.

Tabla 6 Límites establecidos para metales prioritarios

METAL	VIDA ACUÁTICA				SALUD HUMANA	
	AGUA DULCE		AGUA SALADA		TOXICIDAD AGUDA µg/L	TOXICIDAD CRÓNICA µg/L
	TOXICIDAD AGUDA µg/L	TOXICIDAD CRÓNICA µg/L	TOXICIDAD AGUDA µg/L	TOXICIDAD CRÓNICA µg/L		
Antimonio	9000	1 600 a 6000			146	7
Arsénico Trivalente	440		508			0.02
Berilio	5.3	130				0.037
Cadmio	$e^{(1.05 \text{ In}(dureza) - 8.53)}$	$e^{(1.5 \text{ In}(dureza) - 3.73)}$		4.5		10
Cobre	$e^{(0.94 \text{ In}(dureza) - 1.23)}$	5.6 en 24 h	23	4 en 24 h		1
Cromo	21	0.29 en 24 h	1260	18		50
Mercurio metílico	8	0.016 en 24 h	3.7	0.025 en 24 h		0.2
Níquel	$e^{(0.76 \text{ In}(dureza) + 1.6)}$	$e^{(1.76 \text{ In}(dureza) + 1.42)}$	140	7.1 en 24 h		13.4
Plata		$e^{(1.72 \text{ In}(dureza) - 6.52)}$	2.3			50
Plomo	$e^{(1.22 \text{ In}(dureza) - 9.48)}$	$e^{(1.22 \text{ In}(dureza) - 0.49)}$	668	25		50
Selenio	260	35 en 24 h	410	54 en 24 h		10
Talio	1400	40	2130			13
Zinc		47	170	58		5000

Tabla 7 Eliminación de metales tóxicos prioritarios

COMPUESTO	PROCESO	EFICIENCIA	COMENTARIO
Cadmio	Precipitación con cal a pH entre 9.5 a 12.5	Nivel hasta 0.0075 mg/L	Interferencias con cianuros
	Precipitación y filtración	0.0007	
	Precipitación y carbón activado	0.0001	Sólo en agua limpia
	Osmosis inversa, electrodiálisis y congelación		
Cobre	Precipitación		Para influentes con 1 a 1000 mg/L y sin CN y amoniaco
	Intercambio iónico		Influyente < 200 mg/L
	Evaporación y electrodiálisis		Más de 10 000 mg/L y si se desea recuperar
Cromo hexavalente	Reducción (con dióxido de azufre, bisulfito de sodio o sulfato ferroso) y precipitación con sosa o cal a pH entre 8.5 y 9.5		
	Intercambio iónico		
Mercurio	Precipitación con sulfuros	99.9%	
	Coagulación con sulfato de aluminio, sales de hierro y cal	Niveles de 0.5 a 1.8 mg/L	Para mercurio orgánico e inorgánico
	Intercambio iónico		Mercurio inorgánico
	Carbón activado	85 a 99 %	Mercurio orgánico
Níquel	Precipitación con cal a pH de 9.5 con filtración	Niveles de 0.5 mg/L	
	Intercambio iónico	90 %	Costeable para recuperación
Plata	Intercambio iónico	85 al 90 %	Para recuperación
	Precipitación con cloruros	Niveles de 1 mg/L	
	Precipitación con hidróxido	Niveles de 0.1 mg/L	
Plomo	Precipitación con cal, hidróxidos y sosa seguido de filtración	99%	Plomo inorgánico
	Destrucción con cloro, precipitación y filtración	90%	Plomo orgánico
Selenio	Precipitación con cal a pH de 11, sedimentación y filtración	0 a 89 %	
	Intercambio iónico	99.9 %	
Zinc	Precipitación con cal a pH de 10	Niveles < a 1 mg/L	Interfiere cianuros
	Intercambio iónico y evaporación		Recuperación

A continuación se presenta un resumen de las características más importantes de los metales.

5.1.1 Aluminio, Al

El Al no se encuentra naturalmente en forma elemental, sin embargo, es uno de los metales más abundantes en la superficie terrestre ($\approx 8\%$). Está presente en los suelos, las plantas y los tejidos animales. Los compuestos del Al son comúnmente utilizados en el tratamiento del agua y su presencia en el agua de bebida se debe generalmente a deficiencias en el control del proceso. El Al en presencia de hierro puede causar decoloración. Su metabolismo en el cuerpo humano es poco conocido, al parecer el Al inorgánico se absorbe mal y se excreta casi completamente en la orina. Aunque su ingesta no parece ser dañina, sus compuestos han sido asociados con desórdenes neurológicos. Existe una asociación entre el Al y la enfermedad de Alzheimer, pero aún no está confirmada.

5.1.2 Antimonio, Sb

Las sales de Sb y sus complejos orgánicos se encuentran habitualmente en alimentos y agua en bajas concentraciones. Sus principales usos consisten en aleaciones debido a sus propiedades de dureza, fuerza mecánica y resistencia a la corrosión. También se le emplea en abrasivos, pigmentos, plastificantes y catalizadores en síntesis orgánica.

5.1.3 Arsénico, As

Las fuentes de As son formaciones rocosas naturales, residuos industriales, pesticidas, fertilizantes y detergentes. También se le encuentra en algunos alimentos como el pescado y el tabaco, y en el aire de algunas localidades. Se presenta en el agua procedente de la disolución de minerales y menas, efluentes industriales y el lavado de la atmósfera. Parece haber una relación entre el cáncer de la piel y los altos niveles de As en el agua potable. En su forma elemental no se le considera particularmente tóxico, aunque ingestas continuas incrementan la incidencia de cáncer en la piel. Las formas orgánicas del As son menos tóxicas que las inorgánicas y los arsenitos son más tóxicos que los arsenatos.

5.1.4 Bario, Ba

El Ba está presente en diversos compuestos que forman parte de la corteza terrestre, por lo que su presencia en el agua es natural. En el agua subterránea su concentración es a nivel de trazas, y su presencia en agua superficial se debe principalmente a que recibe residuos industriales con Ba, ya que tiene diversas aplicaciones industriales. Es un estimulante muscular y con altas concentraciones puede ser dañino al sistema nervioso y al corazón.

5.1.5 Berilio, Be

El Be no es común en el agua (concentraciones menores de $1 \mu\text{g/L}$) ya que es poco soluble. Es resistente al calor y se emplea en aleaciones con Cu en aparatos eléctricos, materiales de guerra, reactores atómicos y como aditivo en combustibles especiales, en cerámica y refractarios especiales. Es extremadamente tóxico, sin embargo tiene una mala absorción en el organismo.

5.1.6 Cadmio, Cd

Las fuentes principales de Cd son cañerías del agua y tuberías de hierro galvanizado, los residuos industriales del electroplatinado, pesticidas, soldaduras, filamentos incandescentes, residuos de fotografía, pinturas, utensilios y plásticos hechos a partir de cadmio, entre otros. El cadmio vaporiza cuando se quema y sus sales se disuelven en el agua por lo que puede encontrarse en las aguas residuales y sus lodos, en fertilizantes, corrientes de agua y en el agua de bebida. Su absorción en el cuerpo depende de la solubilidad de sus compuestos, se acumula principalmente en los riñones y altas concentraciones de cadmio se relacionan con hipertensión, bronquitis crónica y enfisema.

5.1.7 Cobre, Cu

Se le encuentra comúnmente en el agua de bebida en concentraciones menores a 20 µg/L. La fuente principal de Cu en las fuentes de abastecimiento es la corrosión de las tuberías del sistema de distribución y la adición de sales de Cu en el tratamiento del agua para el control del crecimiento de las algas. Es Cu es un buen conductor, por lo que es ampliamente utilizado en la industria eléctrica y en aleaciones con otros metales. Los compuestos orgánicos del cobre se utilizan como fungicidas, insecticidas, catalizadores y en la formación de pigmentos entre otros usos. Es un nutriente esencial, pero que en concentraciones excesivas es tóxico para los peces. Su deficiencia está asociada con la anemia.

5.1.8 Cromo, Cr

El cromo se presenta en el agua en sus dos estados de oxidación (III y VI), siendo el más común el III. La valencia del cromo se ve afectada debido a los niveles de desinfección y a la presencia de compuestos orgánicos susceptibles de ser reducidos. Las fuentes primarias de cromo en el agua son las operaciones del minado, residuos del platinado y la combustión de residuos fósiles. El Cr³⁺ es un nutriente esencial, no es tóxico y se absorbe pobremente, su deficiencia resulta en intolerancia a la glucosa y la inhabilidad para utilizarla entre otros desordenes metabólicos. El Cr⁶⁺ es tóxico, se absorbe fácilmente y puede atravesar las membranas celulares, produce daños en el hígado y los riñones, hemorragia interna y desordenes respiratorios.

5.1.9 Hierro, Fe

Es un elemento muy abundante en la corteza terrestre, se encuentra naturalmente en aguas subterráneas y en algunas superficiales. También entra al agua debido a los depósitos y a las actividades del minado de Fe. Puede estar presente en el agua de bebida debido a la utilización de coagulantes de Fe, o bien debido a la corrosión de las tuberías. Es un elemento esencial para la salud y sus requerimientos están en función de la edad, sexo y estado fisiológico.

5.1.10 Manganeso, Mn

Es un metal muy abundante en la corteza terrestre, y en general se presenta junto con el Fe. Su presencia en agua pobre en oxígeno puede alcanzar concentraciones de varios mg/L, mientras que en presencia de oxígeno forma óxidos insolubles que provocan la aparición de depósitos no deseables en los sistemas de distribución. El Mn es un oligoelemento indispensable y no se ha confirmado que sea tóxico para los seres humanos en el agua de bebida.

5.1.11 Mercurio, Hg

Se encuentra en la naturaleza en su forma elemental y en compuestos orgánicos. Las concentraciones en agua contaminada son normalmente menores a 1 µg/L. Es muy utilizado en los sectores industrial, médico y agrícola. El Hg inorgánico no cumple ninguna función fisiológica en el cuerpo humano, es pobremente absorbido en el tracto gastrointestinal, no penetra las células y es menos tóxico que el metil mercurio. Los principales órganos afectados son los riñones, también afecta el sistema nervioso central causando la muerte y/o disfunciones motoras y mentales.

5.1.12 Molibdeno, Mo

La concentración de Mo en el agua de bebida es generalmente inferior a 10 µg/L. No obstante en las cercanías a minas llega a haber concentraciones de hasta 200 µg/L. Es un metal traza esencial en la dieta. Los efectos de una sobreexposición pueden incluir daño al hígado y a los riñones. La exposición crónica resulta en la pérdida de peso, anomalías en los huesos e infertilidad en las mujeres.

5.1.13 Níquel, Ni

Es común en el agua potable en concentraciones menores a 0.02 mg/L, en casos especiales de liberación de depósitos naturales o industriales la concentración puede ser mayor. Se le emplea en el electroplatinado, instrumentos dentales, elaboración de cerámica y vidrio de color, en la hidrogenación catalítica de aceites y grasas, como intermediario en reacciones orgánicas, en amalgamas y aleaciones. La mayor parte del Ni ingerido es excretado, sin embargo, la absorción ocurre en el tracto gastrointestinal. Los efectos agudos por una sobreexposición incluyen pérdida del peso corporal, cambios en la sangre y las enzimas. No hay pruebas que demuestren que el Ni sea carcinogénico por la ingesta oral.

5.1.14 Plata, Ag

Se le puede hallar en concentraciones traza en el agua natural y en el agua de suministro debido a las fuentes naturales o a los desechos industriales. Sobre todo se le encuentra en forma de sulfuros y óxidos insolubles y estables. Puede ser utilizada como desinfectante del agua en pequeñas cantidades. En aleaciones con Cu, Al, Cd, Pb y Sb para joyerías, ornamentos e instrumentos científicos. Se usa en fotografía, en la elaboración de porcelana y espejos. Sus compuestos se utilizan como antisépticos o astringentes. La plata coloidal puede causar decoloración permanente de la piel, los ojos y las membranas mucosas (argiria), sin embargo, no se conocen casos de argiria por la ingesta de plata en el agua potable. No hay evidencia de que sea carcinogénica o mutagénica.

5.1.15 Plomo, Pb

El Pb se utiliza principalmente para la producción de acumuladores de plomo-ácido, soldaduras y aleaciones, se le encuentra en el agua debido a la corrosión de las tuberías y la soldadura. Los niños lo absorben con más rapidez que los adultos. La exposición al plomo de la sangre se asocia con efectos fisiológicos como la anemia, daño a los riñones, interferencia con el metabolismo de la vitamina D, elevación de la presión arterial, etc. Es tóxico para el sistema nervioso central y periférico y tiene efectos neurológicos subencefalopáticos y del comportamiento.

5.1.16 Selenio, Se

Su concentración agua potable es tradicionalmente baja, sin embargo su abundante presencia en algunos suelos provoca altas concentraciones en los pozos cercanos. La principal fuente de selenio para la población en general son alimentos como cereales, la carne y el pescado. Se le usa en la elaboración de pigmentos, vidrio y pinturas, como agente vulcanizador de caucho, insecticida, en la manufactura de electrodos, fotoceldas y celdas de selenio. Forma parte de las aleaciones con acero, Cu, Au, Ni y Ag. Es esencial en la dieta y se le obtiene principalmente de los alimentos. Su carencia provoca serias alteraciones, pero sobrepasando el requerimiento es sumamente tóxico.

5.1.17 Sodio, Na

Es un constituyente abundante en el agua ya que sus sales son extremadamente solubles. Se asocia con la alta presión en la sangre y enfermedades del corazón. Ciertas enfermedades se ven agravadas por altas ingestas de NaCl, como la cirrosis y enfermedades renales y del corazón.

5.1.18 Uranio, U

Se encuentra presente, principalmente, en su forma hexavalente. Es utilizado como combustible en plantas nucleares y se desprende como subproducto de la combustión del carbón y otros combustibles, así como de fertilizantes fosfatados. Su presencia en agua se debe a la lixiviación de fuentes naturales y de los residuos de las plantas nucleares almacenados. No existe suficiente información disponible sobre sus concentraciones en agua y alimentos.

5.1.19 Zinc, Zn

Se le encuentra comúnmente en fuentes de agua y en el agua de suministro debido a la corrosión del sistema de la red. Concentraciones mayores a 5 mg/L causan un sabor metálico provocando náusea y vómito, concentraciones más altas le dan coloración al agua. Los efectos nocivos provienen principalmente por la baja ingesta, ocasionando la pérdida del sabor, hipogonadismo y fallas en el crecimiento. El exceso de Zn causa debilidad muscular y dolor, irritabilidad y náuseas.

5.2 Nutrientes

Los nutrientes son requeridos para el crecimiento y reproducción de la flora y fauna acuática. Los principales nutrientes en el agua son: fósforo y nitrógeno. Su abundancia o escasez conducen a favorecer o limitar el crecimiento de plantas acuáticas, por lo que ambos son clave para acelerar el proceso natural de eutrofización aunque por lo general es el fósforo quien resulta el factor limitante. Normalmente, estos compuestos no son removidos en forma eficiente durante los procesos biológicos.

5.2.1 Nitrógeno, N

Tanto en agua potable como en la residual, existen varios compuestos de N con diversos estados de oxidación: nitrógeno orgánico (III⁻ a I⁻), nitrógeno amoniacal (III⁻), nitritos (III⁺) y nitratos (IV⁺). Estas formas junto con el N₂ son intercambiables y forman parte del ciclo del nitrógeno.

Nitrógeno orgánico.- El nitrógeno orgánico tiene un estado de oxidación III⁻ y, en realidad, no incluye todos los compuestos orgánicos que lo contienen. Analíticamente, el nitrógeno orgánico y el amoniacal se determinan en forma conjunta y se denomina nitrógeno total *Kjeldahl* (NTK). El nitrógeno orgánico se encuentra en las proteínas, los péptidos (componentes de las proteínas), ácidos nucleicos, uréa y varios compuestos orgánicos, también está presente en desechos domésticos y agrícolas, asimismo la lixiviación de tierras que han sido abonadas llevan al agua gran cantidad de nitrógeno y fósforo. Una hectárea de tierra cultivada aporta 400 kg de materias solubles por año, de las cuales la cantidad de nitrógeno varía, en función de las características de la región, de 1 a 6 kg. La fracción de nitrógeno orgánico en el agua varía de una centena de µg/L, en lagos, hasta 20 mg/L en agua residual doméstica.

Nitrógeno amoniacal.- El amoniaco, como ion amonio, es el contaminante nitrogenado que se encuentra con mayor frecuencia en el agua, ya que además de ser un producto natural es un producto industrial clave. El amoniaco y el ion amonio existen en solución en equilibrio:



El nitrógeno amoniacal se presenta en forma natural en aguas superficiales y residuales. En acuíferos su concentración es muy baja ya que se adsorbe en las arcillas y no es lixiviado de los suelos. El NH₄⁺ se produce por hidrólisis de compuestos orgánicos nitrogenados tales como la urea.

En algunas potabilizadoras se añade amoniaco para formar cloraminas y hacer que el poder desinfectante de cloro sea de duración prolongada. En aguas residuales es imposible obtener cloro libre si no se oxida previamente el nitrógeno amoniacal. La concentración de nitrógeno amoniacal encontrada en aguas varía de 10 µg/L hasta 30 mg/L en agua residual doméstica. Los principales problemas que ocasiona el amoniaco son:

- ✦ Toxicidad para la fauna acuática en concentraciones de unas cuantas partes por millón.
- ✦ Disminución de la efectividad de la cloración.
- ✦ Consumo de oxígeno (4.57 mg O₂/mg N)

Nitrógeno oxidado.- Por nitrógeno total oxidado se entiende la suma de los nitritos y nitratos expresados como nitrógeno. Los nitritos generalmente están al nivel de trazas en los cuerpos de agua, pero en algunos acuíferos alcanzan grandes concentraciones. Los nitritos entran en las descargas como resultado de su empleo como inhibidor de la corrosión en procesos industriales o por la preoxidación parcial del amoniaco. Los NO₃⁻ se usan como fertilizante en forma de nitrato de amonio o como explosivo cuando se mezcla con derivados del petróleo.

Los nitratos no se encuentran o, son muy escasos, en aguas residuales, pero en efluentes de depuradoras con nitrificación alcanzan hasta 30 mg N/L. Los nitratos son un elemento esencial para los organismos autótrofos fotosintéticos y se les considera con frecuencia como un nutriente limitante del crecimiento. Los compuestos del nitrógeno oxidado ocasionan problemas como:

- a) Contaminación de cuerpos de agua por favorecer el crecimiento exacerbado de plantas (eutroficación acelerada). Las formas de nitrógeno directamente relacionadas con este fenómeno son los nitratos
- b) Puede provocar metahemoglobinemia (asfisia) en infantes menores de 6 meses al ingerir agua o leche materna con altas concentraciones de nitratos (>10 mg N/L)
- c) Riesgo de formar sustancias carcinogénicas (nitrosaminas) al usar agua que contenga nitritos para preparar alimentos

De acuerdo con la OMS (1995) no ha habido ningún caso de metahemoglobinemia al consumir agua con mas de 10 mg/L y se ha podido constatar en varias ocasiones que concentraciones hasta de 20 mg/L no

tienen efectos sobre lactantes. Sin embargo, se recomiendan valores de 11.3 mg N-NO₃/L por seguridad para el nitrato y 0.9 N-NO₂/L para el nitrito.

El control del nitrógeno implica el control de TODOS sus compuestos puesto que son formas fácilmente intercambiables. Existen diferentes métodos de tratamiento, como la nitrificación/desnitrificación biológica, la desorción de amoníaco con aire (*stripping*), el intercambio iónico, la cloración hasta el "punto de quiebre" y la ósmosis inversa. En la actualidad, sólo la nitrificación/desnitrificación biológica es considerada como rentable, sus tasas de conversión son de 95% de amoníaco a nitrato y 86% de nitrato a nitrógeno. El proceso se lleva a cabo en dos etapas: la primera es la de nitrificación donde se oxida el amoníaco a nitritos y nitratos, mientras que la segunda –desnitrificación– consiste en la reducción de los compuestos oxidados a N₂ (gaseoso), forma que se caracteriza por ser inocua al medio ambiente.

5.2.2 Fósforo, P

Se presenta en el agua casi sólo en forma de fosfatos: ortofosfatos, fosfatos condensados (piro, meta y polifosfatos) y fosfatos orgánicos. Los polifosfatos tienen el efecto de disminuir la concentración de equilibrio del calcio y evitar la precipitación de carbonato de calcio en tuberías, torres de enfriamiento o calentadores. La habilidad de los polifosfatos es tan buena para evitar la formación de precipitados que interfiere con el mecanismo de limpieza de los detergentes. La forma más sencilla de los fosfatos son los ortofosfatos, cuya base es el PO₄³⁻. Otro tipo de polifosfatos son los que tienen forma de anillo, que también tienen al PO₄³⁻ como base. El primer miembro de este grupo es el ácido trimetafosfórico (H₃P₃O₉) seguido del ácido tetrametafosfórico (H₄P₄O₁₁). La habilidad para formar precipitados de los anillos de polifosfatos es menor a los de cadena lineal. Todos los fosfatos poliméricos se hidrolizan (química o biológicamente) en agua o en compuestos más simples produciendo ortofosfatos.

El fósforo proviene de las plantas, animales, suelos, fertilizantes (fosfatos condensados), detergentes y descargas industriales, sobre todo del agua de acondicionamiento para calderas. Las descargas de lavanderías o de tintorerías lo contienen en grandes cantidades. En agua, su presencia estimula el crecimiento de organismos fotosintéticos en cantidades perniciosas y frecuentemente es el agente limitante del crecimiento en lugar del nitrógeno, ya que éste puede ser fijado directamente de la atmósfera por organismos específicos. El fósforo se acumula en los sedimentos de los cuerpos de agua y en los lodos producto del tratamiento de la misma. Para evitar la proliferación de algas, el PO₄ debe mantenerse por debajo de 0.5 mg/L. Tomando en cuenta que el contenido del agua residual es del orden de 25 mg/L (como ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos insolubles) la eficiencia requerida debe ser alta (>98%). Su eliminación ocurre en el tratamiento primario durante la sedimentación y en el tratamiento biológico por asimilación en la biomasa (20% en lodos activados). La forma más fácil de remoción es por precipitación (90 a 95%) siendo la cal el reactivo más barato. También, para la eliminación se emplea la adsorción con alúmina activada con remociones superiores al 99.9% de ortofosfato. La remoción biológica, por métodos específicos, es aplicada para enriquecer en fósforo los lodos producidos para posteriormente tratarlos (generalmente por métodos fisicoquímicos) o disponerlos (como mejoradores de suelo).

5.3 Contaminantes orgánicos

Actualmente, existe una importante polémica sobre el agua generada en la década de los setenta cuando se descubrió la existencia de compuestos orgánicos subproductos de la cloración en el agua potable, denominados trihalometanos. Este suceso dio origen a una continua búsqueda de compuestos. Para 1980, eran setecientos compuestos los detectados, mismos que supuestamente no deberían de estar en el agua potable. De ellos sólo 458 fueron identificados. Un año después, debido al desarrollo de una técnica de concentración basada en la ósmosis inversa que permitió mejorar la sensibilidad de los análisis el número detectado aumentó a 1,200 (Rogers *et al.*, 1987). Más de 600 de éstos son sustancias orgánicas, muchas de ellas biológicamente activas, varias reconocidas como carcinogénicas o promotoras de sustancias carcinogénicas y algunas con propiedades mutagénicas. La Tabla

8 muestra algunas de ellas. Aunque algunas de estas sustancias carecen de efectos, para otras se desconoce si los tienen.

Tabla 8 Compuestos orgánicos que se pueden encontrar en el agua potable

a) De la fuente de abastecimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Sustancias húmicas - Alcanos y alquenos clorados - Nitrosaminas - Hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP) - Ácido nitrilotriacético - Fenoles - Detergentes sintéticos - Plaguicidas - Bifenilos policlorados - Ésteres de ftalatos - Aceites de petróleo, incluida la gasolina - Clorobenceno - Fenoles clorados - Benceno y alquil aromático - Tetracloruro de carbono
b) Introducidos durante el tratamiento	<ul style="list-style-type: none"> - Tetracloruro de carbono - Polielectrolitos (Ej acrilamida) - Trihalometanos
c) Introducidos durante la distribución y transporte	<ul style="list-style-type: none"> - Monómero de cloruro de vinilo - Plaguicidas, herbicidas y acaricidas - Fertilizantes - Hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP)

Adaptado de: OMS, 1985

Los contaminantes orgánicos se dividen en cuatro categorías:

- Compuestos naturales que producen olor y sabor
- Compuestos sintéticos de origen industrial que causan olor y sabor o son tóxicos
- Precursores naturales para la formación de subproductos durante la desinfección
- Subproductos generados por la desinfección

Los compuestos orgánicos presentes en el agua comúnmente son los ácidos húmicos que existen tanto en forma natural como por la creciente descarga de compuestos orgánicos sintéticos que actúan como precursores, como son los compuestos para la limpieza de textiles y de componentes electrónicos (solventes). Los ácidos húmicos se divide en dos grandes grupos: el fúlvico y el húmico. Las fracciones que componen estos grupos son químicamente similares y su clasificación se basa en la diferencia de peso molecular. Los fúlvicos tienen un peso molecular más bajo (200 a 1,000 g/mol) mientras que el de los húmicos es superior (200,000 g/mol). La separación en ambos grupos es arbitraria y no siempre consistente por lo que es común denominarlas en forma global.

Entre los compuestos orgánicos problemáticos se encuentran los trihalometanos y los halógenos orgánicos que se forman mediante reacciones de oxidación y sustitución entre el cloro y los ácidos húmicos. El ozono también produce compuestos secundarios como son los aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos y ftalatos. Durante la desinfección con dióxido de cloro existe el riesgo de formar compuestos orgánicos clorados. Entre los compuestos orgánicos de origen sintético que se encuentran en el agua están los herbicidas, plaguicidas, el queroseno y los derivados del benceno.

A continuación se describen algunas características de los grupos de compuestos orgánicos que han sido encontrados en agua con mayor frecuencia.

5.3.1 Ácidos fúlvicos y húmicos

La materia orgánica que proviene de los organismos vivos realizan una contribución importante a la calidad natural de las aguas superficiales. La composición de este tipo de materia es muy diversa y los compuestos naturales no son usualmente tóxicos, pero ejercen un mayor control sobre los procesos hidroquímicos y bioquímicos del agua. Algunos compuestos naturales afectan en forma significativa la calidad para ciertos usos, especialmente aquellos que dependen de las propiedades organolépticas (sabor y olor). Durante la cloración del agua de bebida, los ácidos fúlvicos y húmicos actúan como precursores de trihalometanos (como el cloroformo). Además, ciertas sustancias del humus acuático determinan la especiación de ciertos metales pesados y otros contaminantes debido a su alta capacidad complejante.

5.3.2 Fenoles

Los fenoles son un grupo de compuestos orgánicos subproducto de la manufactura del acero, la destilación del coque, refinación del petróleo y de operaciones químicas. Deben ser removidos antes de descargarse a las fuentes de agua. Los fenoles también son asociados con el decaimiento de los productos de la madera, biocidas y las descargas de aguas municipales. La presencia de los fenoles en procesos de la industria alimenticia, donde se utiliza en grandes cantidades el agua, puede contaminar los alimentos y las bebidas.

5.3.3 Bifenilos policlorados, BPC

Los bifenilos policlorados (PCB's) son indicadores de la presencia de residuos industriales que contienen mezclas de compuestos bifenilos clorados. Los PCB's causan desórdenes en la piel de los humanos y cáncer en las ratas. Son compuestos estables, resistentes al fuego y tienen una buena capacidad de aislamiento eléctrica. Son utilizados en transformadores, capacitores, plastificantes, bombas, fluidos hidráulicos, fluidos para intercambio de calor y otros productos. Los PCB's no son solubles en agua pero si en grasas, se acumulan en los sedimentos del fondo de los cuerpos de agua y en los peces, aves y otros animales que los consumen a partir de comida contaminada. La mezcla de PCB's que se utiliza como pesticida es conocida como Alacloro.

5.3.4 Aceites minerales y productos del petróleo

Estos son los principales contaminantes responsables de los daños ecológicos, generalmente en cuerpos de agua superficiales. A la fecha, más de 800 compuestos han sido identificados como aceites minerales, entre ellos hay compuestos alifáticos de bajo y alto peso molecular, hidrocarburos aromáticos y nafténicos (o productos del petróleo), compuestos heterocíclicos no saturados de alto peso molecular (resinas y asfaltenos) y un numeroso grupo de compuestos del O, N y S. La distribución de los aceites en los cuerpos de agua es diversa, ya que pueden estar disueltos, como películas finas, emulsionados, entre otras. Las interacciones entre estas fracciones son complicadas y diversas, dependen de diversas características fisicoquímicas como la gravedad específica, la tensión superficial, la viscosidad, los puntos de ebullición, etc., además la transformación de los compuestos del petróleo por procesos bioquímicos, microbiológicos, químicos y fotoquímicos ocurre simultáneamente. Debido al alto riesgo ecológico asociado con las actividades de la explotación del petróleo, así como con su uso, se les considera como contaminantes prioritarios.

5.3.5 Hidrocarburos aromáticos policíclicos

Se componen de dos o más anillos de benceno con anillos adyacentes que comparten dos átomos de carbono. Se encuentran con frecuencia en el medio ambiente y se ha detectado su presencia ocasional en agua potable. Entre estos compuestos se encuentran el fluoranteno; 3,4-benzfluoranteno; 11,12-benzfluoranteno; 3,4-benzopireno, que se sabe que son carcinogénicos y potencialmente dañinos al hombre.

5.3.6 Plaguicidas

Un plaguicida es una sustancia o mezcla de ellas que se usa para controlar cualquier especie no deseada (incluidos los vectores de enfermedades humanas y de animales) que causen perjuicio o que interfieran con el mejor aprovechamiento de la producción agropecuaria y forestal, que afecten bienes materiales durante el almacenamiento y transporte, así como las que interfieren con el bienestar del hombre y de los animales (Diario Oficial, 14 de marzo de 1988). Muchos plaguicidas han ayudado a la humanidad en el control de plagas pero también han causado un gran número de alteraciones a largo plazo como son cáncer, mutaciones, y abortos espontáneos. Los plaguicidas y productos químicos agrícolas no son constituyentes comunes de las fuentes puntuales de contaminación, sino que suelen incorporarse como consecuencia de escurrimientos de parques, campos agrícolas y tierras abandonadas. Las concentraciones de estos productos químicos pueden dar como resultado la muerte de peces, contaminación de la carne del pescado y el deterioro del suministro de agua.

Los plaguicidas son productos muy diversos y la mayor parte de las veces artificiales. Como ejemplo se tiene los organoclorados (DDT, HCH, lindano, clordano, heptacloro, aldrín y dieldrín), los organofosforados (malatión y paratión), los carbamatos y los organometálicos que son muy difíciles de biodegradar.

Los plaguicidas organoclorados son compuestos orgánicos de origen sintético, se caracterizan por poseer uno o varios átomos de cloro en su estructura química. Son compuestos muy poco solubles en agua y poco volátiles. Son muy persistentes, se les puede encontrar hasta 52 semanas después del momento de su aplicación, son de difícil descomposición y se integran fácilmente a las cadenas alimenticias. Se absorben por la piel, el tubo digestivo o el aparato respiratorio; se acumulan en el tejido graso y se eliminan por el riñón. La intoxicación aguda se caracteriza por náuseas, vómito, dolor gástrico y manifestaciones neurológicas que incluyen dolor de cabeza, temblor y mareos.

Los organofosforados incluyen principalmente a los fosfatos, fosfonatos y derivados azufrados. La intoxicación con estos compuestos provoca dolor de cabeza, visión borrosa, dificultad para respirar, dolor abdominal, calambres y parálisis.

En México no existen normas para el control de los agroquímicos en las descargas por fuentes dispersas. La Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas (CICOPAFEST) se limita al control y normalización de la comercialización de estos productos con la finalidad de evitar que su aplicación indiscriminada ocasione daños al ambiente y a la salud del hombre. En 1978, se publicó el primer *Catálogo Oficial de Plaguicidas*, el cual se actualiza anualmente. En el Catálogo de 1995 se establece la prohibición y el uso restringido bajo supervisión de personal autorizado y capacitado de los plaguicidas listados en la Tabla 9.

Se entiende por plaguicidas restringidos aquellos que sólo podrán ser adquiridos en las comercializadoras mediante la presentación de una recomendación escrita de un técnico oficial o privado que haya sido autorizado por el gobierno federal, por lo cual, su manejo y aplicación se efectuarán bajo responsabilidad del técnico autorizado que lo recomendó. Al comparar con la normatividad referente a plaguicidas en otros países, encontramos que en México están autorizados y se comercializan 7 insecticidas/acaricidas, 4 herbicidas y 3 fungicidas prohibidos, retirados o de uso muy restringido en otros países y se clasifican como de uso restringido en

México, 6 insecticidas/acaricidas, 1 herbicida y 2 fungicidas, como se muestra en la Tabla 10. Cabe señalar que el endosulfan, insecticida prohibido al menos en 10 países y que se había considerado en el Catálogo de 1991 como de uso restringido, a partir del Catálogo de 1994 fue autorizado.

Tabla 9 Plaguicidas prohibidos y de uso restringido en México

PLAGUICIDAS PROHIBIDOS		PLAGUICIDAS RESTRINGIDOS	
Acetato o propionato de fenil mercurio	EPN ^a	1,3-Dicloropropeno	Forato
	Erbon	Alaclor	Fosfuro de aluminio
Ácido 2,4,5-T	Formotión	Aldicarb	Isotiocianato de metilo
Aldrin	Fluoracetato de sodio (1080)	Bromuro de metilo	Lindano
BHC ^a	Fumisel	Clordano	Metam sodio
Cianofos	Kepone/Clordecone	Cloropicrina	Metoxicloro
Cloranil	Mirex	Dicofol	Mevinfos
DBCP	Monuron	DDT por su alto riesgo para la salud del humana, su elevada persistencia y sus propiedades de bioacumulación, este plaguicida sólo podrá ser utilizado en campañas fitosanitarias por las dependencias del Ejecutivo.	Paraquat
Dialafor	Nitrofen		Pentaclorofenol
Dieldrin	Paratión etílico ^a		Quintozeno
Dinoseb	Schradan		Toxafeno ^a
Endrin	Sulfato de Talio ^a		Triamifos

^a Plaguicidas de los que sólo se prohíbe su comercialización y uso, del resto se prohíbe la importación, fabricación, formulación, comercialización y uso.

Tabla 10 Plaguicidas autorizados o de uso restringido en México pero que han sido prohibidos, retirados o muy restringidos en otros países

NOMBRE	TIPO	PAÍSES EN LOS QUE SE ENCUENTRA PROHIBIDO, RETIRADO O MUY RESTRINGIDO.
2,4-D	Herbicida.	Guatemala, EUA.
Aldicarb ^a	Insecticida o acaricida	Austria, Bélgica, Alemania, Israel, Noruega y Filipinas.
Captofol	Fungicida	España.
Carbaril	Insecticida o acaricida	Alemania.
Clordano ^a	Insecticida o acaricida	España.
Diclorvos	Insecticida o acaricida	Reino Unido.
Dicofol ^a	Insecticida o acaricida	España
Dimetoato	Insecticida o acaricida	Chipre, EUA
Endosulfan	Insecticida o acaricida	Argentina, Dinamarca, Filipinas, Finlandia, Hungría, Noruega, Portugal, Reino Unido, Singapur, Yugoslavia
EPN ^a	Insecticida o acaricida	Alemania, India, Malasia, Nueva Zelanda, Filipinas.
Fenitrotion	Insecticida o acaricida	Reino Unido
Folpet	Fungicida	Finlandia.
Forato ^a	Insecticida o acaricida	Malasia.
Lindano ^a	Insecticida o acaricida	Argentina, Bélgica, Bulgaria, Canadá, Colombia, Chipre, Ecuador, Alemania, Filipinas, Hungría, Israel, Japón, Nueva Zelanda, Singapur, EUA, URSS, Yugoslavia.
Malation	Insecticida o acaricida	Reino Unido
Maneb	Fungicida	URSS.
Metomilo	Insecticida o acaricida	Malasia.
MSMA	Herbicida	Argentina.
Paraquat ^a	Herbicida	Finlandia, Hungría, Israel, Nueva Zelanda, Noruega, Portugal, Suecia.
Pentacloro-fenol ^a	Fungicida	Reino Unido
Quintozeno ^a	Fungicida	España
Simazina	Herbicida	Reino Unido.
Trifluralina	Herbicida	Guatemala, EUA.

^a Uso restringido en México.

5.4 Contaminantes biológicos

En términos estrictos, cualquier organismo viviente en el agua constituye un parámetro biológico y obviamente no se puede decir que todos son contaminantes. Sin embargo, por su papel dentro de las cadenas tróficas, tienen fundamental importancia los microorganismos (seres vivos microscópicos). Estos se clasifican de varias formas, como se puede observar en la Tabla 11.

Tabla 11 Clasificación de los microorganismos

a) De acuerdo a los requerimientos de oxígeno (O ₂):
aerobios: necesitan de la presencia de oxígeno libre;
facultativos: prefieren ambiente con O ₂ pero pueden vivir sin él;
anóxicos: en ausencia de oxígeno disuelto emplean el oxígeno combinado (NO ₂ y SO ₂)
anaerobios: sólo viven en ausencia de O ₂ .
b) De acuerdo con la temperatura de desarrollo óptimo:
sicrófilos: viven a 0°C,
promedio mesófilos: los más comunes viven entre 15 y 40°C,
termófilos: se desarrollan entre 50 a 70°C.
c) Según sea el tipo de microorganismos:
Algas
Bacterias
Hongos
Protozoarios
Virus

Algas: Son organismos microscópicos que requieren de la luz para realizar sus funciones vitales, es decir, son vegetales. Las cianofitas (algas azul-verdosas) se desarrollan en los depósitos de agua potable al recibir nutrientes que provienen de fertilizantes o del agua residual doméstica. Además, de su toxicidad generan compuestos que dan sabor y olor al agua que no son eliminados mediante la potabilización convencional. Las toxinas que contienen pueden ocasionar lesiones al hígado (hepatitis), gastroenteritis o hepatoenteritis. Se han reportado casos de muerte de ganado al beber agua contaminada con algas. Para remover las algas se emplea sulfato de cobre, desafortunadamente sus toxinas no son eliminadas más que con carbón activado.

Bacterias: Son la forma más pequeña de vida (una célula) capaz de sintetizar el protoplasma de su ambiente. Estos organismos emplean el alimento en forma soluble. Algunas de las bacterias son causantes de problemas gastrointestinales, como el cólera, la tifoidea y la salmonelosis. Sin embargo, otros grupos de bacterias se emplean para la depuración del agua en los procesos biológicos, o bien, se utilizan como indicadores de la calidad del agua como las del grupo coliforme. Las bacterias se pueden remover del agua por desinfección.

Hongos: Son microorganismos no fotosintéticos, por lo regular son pluricelulares, no poseen raíces, hojas o tallos y su tamaño y forma varían desde el de una levadura unicelular hasta el de una seta multinucleada. Se alimentan de materia orgánica muerta o bien, como parásitos se alimentan de huéspedes vivos. Estos organismos incluyen a los mohos, levaduras y hongos patógenos.

Protozoarios: Es la forma más pequeña animal que se reproduce por fisión binaria. Son organismos unicelulares, más complejos en sus funciones que las bacterias o virus. Pueden vivir solos o ser parásitos. Hay algunos que son patógenos, aunque son pocos. Los protozoarios son causantes de problemas gastrointestinales como la amibiasis. En particular, los helmintos son organismos que provocan enfermedades gastrointestinales de gran severidad. Se pueden remover del agua por desinfección, aunque es insuficiente y es necesario aplicar también filtración.

Virus: Es la estructura más pequeña viva que contiene toda la información genética necesaria para su reproducción. Requieren un medio transmisor, por lo que es un parásito. Los virus son causantes de problemas en

el sistema nervioso, por ejemplo hay organismos patógenos virales como el de la poliomielitis, la hepatitis infecciosa, la meningitis, etc.

Los virus son un problema particular ya que presentan mayor resistencia que las bacterias (como los coliformes) a la inactivación. En otras palabras, detectar una cantidad pequeña de coliformes no asegura que un efluente esté libre de virus. Kehr y Butterfield (1993) en un estudio en ciudades del Mediterráneo, Sudamérica y Asia determinaron que en aguas de desecho aun cuando los coliformes se encuentren en un nivel aceptable los virus pueden estar presentes de 10 a 100 veces. En agua de desecho se tienen de 10 a 100 virus entéricos por mL con más de 60 tipos diferentes, todos patógenos para el hombre y con períodos de sobrevivencia prolongados.

En cuanto a los virus de interés en agua, únicamente importan aquellos que se reproducen en el intestino y que son desechados en grandes cantidades con las heces fecales. Se ha demostrado que los métodos de tratamiento avanzado seguidos de una desinfección adecuada con cloro (HCIO) reduce efectivamente los virus entéricos.

El principal riesgo que se corre al tomar agua se debe a su contenido bacteriológico. Desde mediados del siglo XIX se sabe que el agua puede servir como vector de bacterias, virus, protozoarios y lombrices que se asocian con enfermedades entéricas y endémicas en la comunidad. Las principales bacterias, virus y parásitos que provocan enfermedades por consumo de agua (enfermedades hídricas) son listados en la Tabla 12. Las principales enfermedades que producen son la gastroenteritis aguda, la giardiasis, la shigelosis, la hepatitis-A, la tifoidea y la salmonelosis. Otras enfermedades que se transmiten por el agua aunque no en todos los casos son: disentería amibiana, cólera, fiebre tifoidea, lombrices y cistosomiasis.

Tabla 12 Principales microorganismos que provocan enfermedades por el consumo de agua

Bacterias	<i>V. Cholera</i> <i>Salmonella</i> <i>Shigella</i>
Virus	Virus de la hepatitis infecciosa Coxsackie A y B (32 tipos) Reovirus (3 tipos) ECHO virus (34 tipos) Adenovirus (32 tipos) Virus de la gastroenteritis Virus de la diarrea Virus de la poliomielitis
Parásitos	<i>E. histolytica</i>
Algas	Cianofitas

Fuente: Taylor y Denner, 1987

5.4.1 El cólera en México

El cólera es una enfermedad gastrointestinal aguda producida por la bacteria *Vibrio Cholerae*. Se caracteriza por una diarrea abundante que puede llevar a la deshidratación y muerte en unas cuantas horas si no se atiende. Es una de las enfermedades más antiguas de la humanidad. Thomas Sydenham, en el siglo XVII, añadió al término *Cholerae* la palabra "*morbis*" para distinguirlo de cólera, sinónimo de ira o enojo. Desde 1817 han ocurrido siete epidemias en el mundo que han causado millones de defunciones. La primera azotó Europa desde la India, continuó hacia el sur de Rusia, de ahí pasó a Polonia y después al resto del continente. El cólera llegó a América siguiendo las rutas comerciales de Asia y Europa. En México, se introdujo por primera vez en 1883 y entró por sexta vez en junio de 1991 en el sur del Estado de México. La epidemia del cólera se debe básicamente a la mala higiene. Los alimentos contaminados por el hombre y el agua de beber no potabilizada son las principales rutas de infección, por ello, su control se enfoca al saneamiento y potabilización adecuados, combinados con hábitos elementales de higiene (lavarse las manos antes de comer o manipular alimentos y después de ir al baño). La Figura 5 muestra la evolución de esta enfermedad en México de 1991 a 1994.

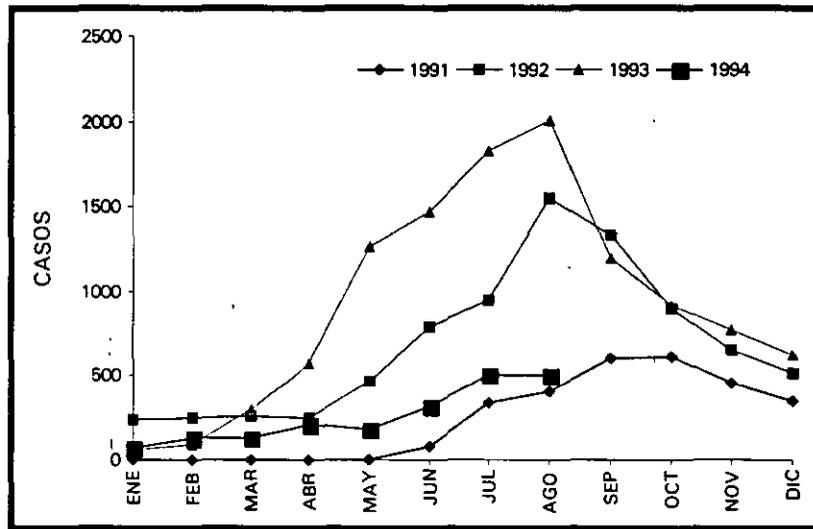


Figura 5 Casos mensuales de cólera confirmados en México (1991-1994)
Fuente: SSA, 1994



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

TEMA :

**PÉRDIDA DE HIDROCARBUROS PRESENTES EN GASOLINA, DIESEL Y
PETRÓLEO CRUDO POR EFECTO DE LA INTEMPERIE**

**DRA. SUSANA SAVAL
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE – OCTUBRE 1999**

PÉRDIDA DE HIDROCARBUROS PRESENTES EN GASOLINA, DIESEL Y PETRÓLEO CRUDO POR EFECTO DE LA INTEMPERIE

Juan Manuel Lesser, Lesser y Asociados, S.A.

Susana Saval, Instituto de Ingeniería, UNAM

RESUMEN

Se obtuvieron muestras frescas de gasolina, diesel y petróleo crudo a las cuales se les sometió a un proceso de intemperización natural al mantenerlas en un lugar abierto y ventilado durante 30 días. Periódicamente se tomaron muestras de cada producto y se analizaron por cromatografía de gases, en los perfiles cromatográficos obtenidos se confirmó la pérdida de los compuestos volátiles por ausencia de los picos con menores tiempos de retención que corresponden a los compuestos con menor peso molecular, que son los hidrocarburos volátiles.

INTRODUCCIÓN

Cuando ocurre un derrame de combustibles al suelo, una parte de los hidrocarburos se volatiliza, otros migran hacia el subsuelo y se disuelven en el agua subterránea, mientras que otros permanecen en fase libre flotando sobre el nivel del agua. Durante los estudios de prospección del subsuelo, uno de los objetivos que se persiguen es la caracterización de los hidrocarburos contaminantes, para ello se obtienen muestras de suelo, agua y de hidrocarburos en fase líquida, las cuales se pueden analizar en el laboratorio mediante cromatografía de gases con la finalidad de identificar el tipo y concentración de los combustibles presentes (Baugh y Lovegreen, 1993; Potter, 1993) y también se puede establecer si su composición ha sufrido cambios por efecto de la intemperie.

La gasolina y el diesel son mezclas complejas de hidrocarburos destilados del petróleo, que contienen alrededor de 150 compuestos diferentes (Riser-Roberts, 1992; Mattney, 1994). La gasolina se caracteriza por contener hidrocarburos con bajo peso molecular que son muy volátiles, en comparación con los que están presentes en el diesel. La pérdida de los componentes volátiles permite diferenciar un combustible fresco de otro antiguo.

Cuando un combustible en fase líquida o adsorbido en el suelo permanece expuesto a la intemperie, el viento ocasiona la pérdida de los hidrocarburos volátiles, mientras que los rayos solares pueden provocar

reacciones fotoquímicas en todos sus componentes. La combinación del viento y de la exposición al sol, ocasionan modificaciones químicas, descomposición o incluso la degradación total de los hidrocarburos, efecto que se conoce como intemperismo.

En este artículo se presentan algunas experiencias obtenidas al someter a la intemperie por volatilización natural, muestras de gasolina, diesel y petróleo crudo a las cuales se les dió seguimiento mediante análisis cromatográficos.

ESTRATEGIA DEL EXPERIMENTO

Muestras frescas de gasolina Nova, gasolina Magna, diesel y petróleo crudo se sometieron a análisis de acuerdo al método EPA 8015 (USEPA, 1996), con lo cual se obtuvieron los perfiles cromatográficos típicos para cada producto. Estos mismos productos se expusieron a la intemperie en un espacio abierto y ventilado de manera natural durante un mes, periódicamente se tomaron muestras que se analizaron de la misma forma para obtener los perfiles cromatográficos correspondientes. También se cuantificó el contenido de hidrocarburos volátiles residuales en cada producto.

RESULTADOS

Los perfiles cromatográficos obtenidos para los productos frescos y para las muestras expuestas a la intemperie se presentan en las figuras 1 a 4. Los perfiles típicos de las gasolinas Nova (fig. 1 inicio) y Magna (fig. 2 inicio), presentan picos con tiempos de retención hasta los 16 min. La gasolina contiene más de 150 hidrocarburos con estructuras químicamente diferentes entre 3 y 12 átomos de carbono, pero que comparten algunas características, por lo que una mayoría de picos aparecen encimados. A partir de los 4 días de estar expuestos a la intemperie, ya están ausentes aquellos hidrocarburos que tienen menor tiempo de retención, que corresponden a aquellos con menor peso molecular y más volátiles. La ausencia de éstos se va haciendo más marcada al paso del tiempo, de tal forma que a los 30 días se han perdido todos los hidrocarburos que aparecían en los primeros minutos, tanto para la gasolina Nova (fig. 1), como para la gasolina Magna (fig. 2).

En el caso del diesel y del petróleo crudo, los perfiles cromatográficos presentan una mayor diversidad de picos que abarcan tiempos de retención cortos y largos (figs. 3 y 4). La mayor parte de las entidades químicas contenidas en el diesel van de 10 a 30 átomos de carbono, aunque cantidades traza de hidrocarburos con un menor número de átomos de carbono también están contenidos. En el caso del petróleo ocurre una situación similar, aunque aquí se pueden encontrar entidades químicas mucho más

complejas y con un mayor número de átomos de carbono que las contenidas en el diesel, las cuales son más estables y sufren menos cambios durante la intemperización.

En los perfiles cromatográficos obtenidos para el diesel (fig. 3) se observó pérdida de volátiles solamente los primeros 15 días y 8 días para el caso del petróleo crudo (fig. 4), después, los cromatogramas permanecen prácticamente sin cambio hasta los 30 días que duró el experimento.

Por otra parte, con la información obtenida a lo largo del seguimiento de las pruebas, se construyó la gráfica que se presenta en la fig. 5, donde se aprecia claramente el porcentaje de pérdida de los hidrocarburos volátiles con respecto al tiempo, referida a la concentración inicial en cada producto. En todos los casos, la disminución fue gradual con respecto al tiempo y acorde con las observaciones de los perfiles cromatográficos. Los dos tipos de gasolina perdieron aproximadamente el 60% de sus hidrocarburos volátiles, mientras que para el diesel fue el 70%. El petróleo crudo perdió solamente el 25% de sus hidrocarburos volátiles, probablemente debido a su elevada viscosidad.

DISCUSIÓN

El perfil cromatográfico de cualquier combustible fresco puede ser considerado como una "huella digital" característica para cada tipo de combustible, por lo que puede servir como base para la identificación de hidrocarburos de origen desconocido, como es el caso de aquellos que se encuentran como contaminantes en suelos y aguas subterráneas. La pérdida de los componentes volátiles durante la intemperización hace que el perfil cromatográfico obtenido no tenga similitud con el combustible de origen, tal como ocurre en los perfiles a 30 días de intemperización, cuando se comparan con aquellos que se obtuvieron al inicio del experimento (figuras 1 a 4).

Lo anterior es de fundamental importancia cuando el objetivo principal de un análisis es la identificación de los combustibles contaminantes. También es importante tomarlo en consideración, cuando se está aplicando una remediación a un suelo o agua subterránea contaminados, ya que muchos componentes se pierden por volatilización y no por el efecto de la propia técnica de remediación; principalmente en aquellas que están basadas en la degradación de los hidrocarburos contaminantes, por ejemplo, la biorremediación.

Si este experimento se hubiera realizado con ventilación forzada, seguramente la pérdida de volátiles hubiera sido mayor y más rápida, sin embargo, el objetivo que se persiguió en este caso particular fue observar los cambios que ocurren en los hidrocarburos contaminantes en el caso más sencillo de intemperismo que es la ventilación natural y en ausencia de los rayos solares.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman que la intemperie juega un papel importante en la composición de los combustibles y que esto debe ser tomado en consideración durante la identificación y cuantificación de hidrocarburos contaminantes presentes en suelos o agua subterránea contaminados o que están siendo sometidos a un proceso de remediación.

AGRADECIMIENTOS

A los Ings. Florentino Montiel y Roberto Martínez por la preparación y cuidado de las muestras.

REFERENCIAS

- Baugh A.L. and Lovegreen J.R., 1993. Differentiation of Crude Oil and Refined Petroleum Products in Soil. En *Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*. Calabrese E.J. and Kostecki P.T. Eds., Lewis Publishers, Boca Raton, USA., 25-47.
- Mattney C. G., 1994. Assessment and remediation of petroleum contaminated sites. Lewis Publishers Boca Raton, USA., 271-286.
- Potter T.L., 1993. Analysis of Petroleum Contaminated Soil and Water. En *Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*. Calabrese E.J. and Kostecki P.T. Eds., Lewis Publishers, Boca Raton, USA., 1-14.
- Riser-Roberts E. 1992. *Bioremediation Of Petroleum Contaminated Sites*, C. K. Smoley, Inc.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1996. *Method 8015, Nonhalogenated Organics using GC/FID*.

Fig. 1. Gasolina nova

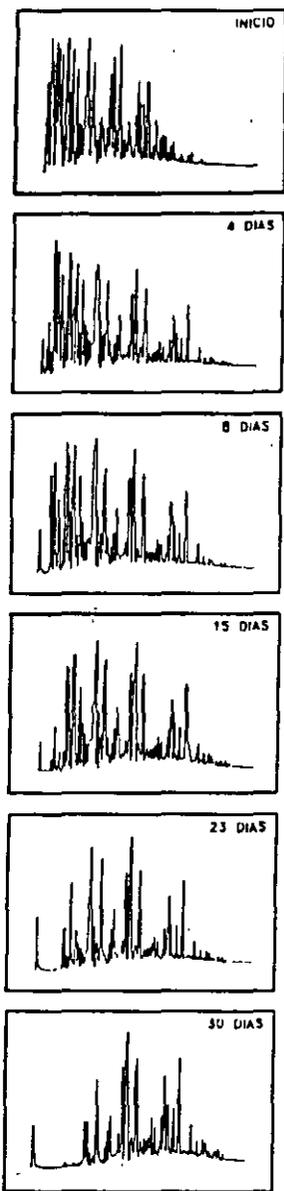


Fig. 2. Gasolina magna

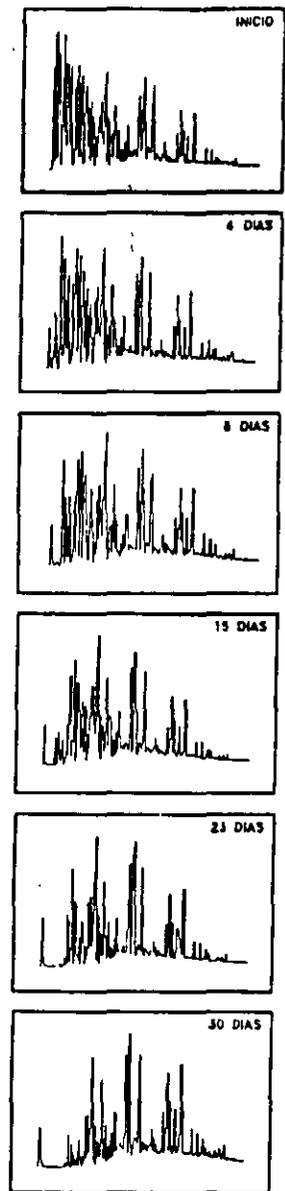


Fig. 3. Diesel

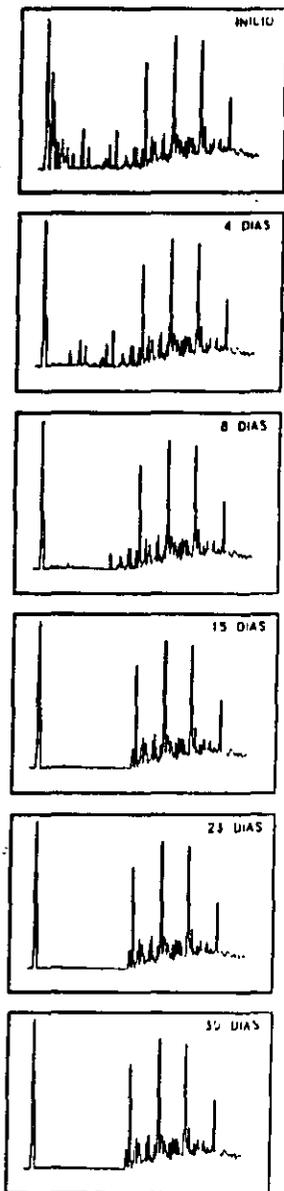
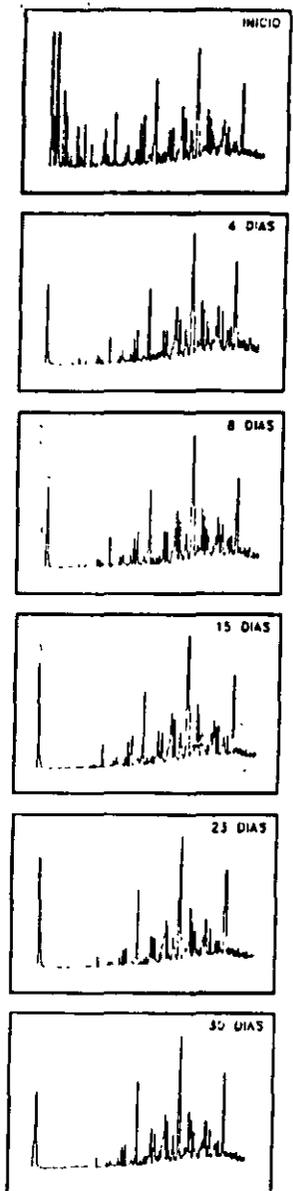


Fig. 4. Petr6leo cruo



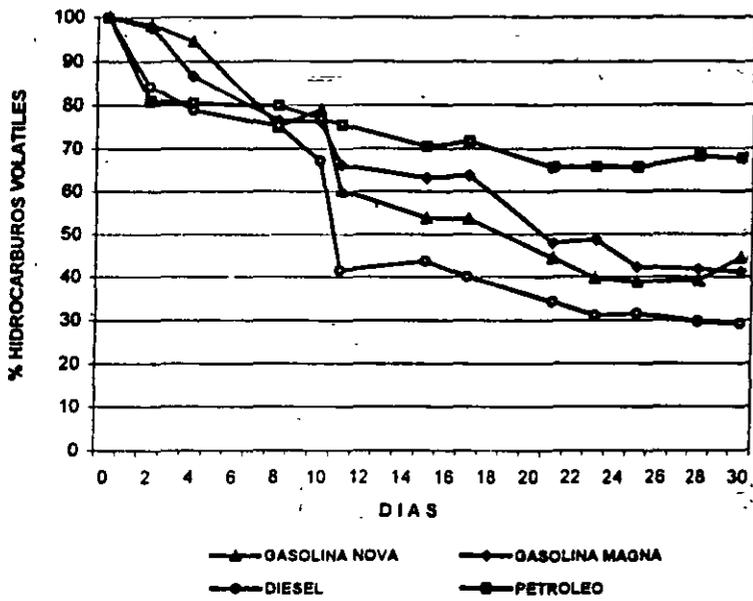


FIGURA 6. PERDIDA DE HIDROCARBUROS POR ACCION DE LA INTEMPERIE

Table 2.2 Range of Values of Hydraulic Conductivity and Permeability

		k	k	K	K	K
		(darcy)	(cm^2)	(cm/s)	(m/s)	(gal/day/ft^2)
Rocks	Karst limestone	10^5	10^{-3}	10^2	1	
	Permeable basalt	10^4	10^{-4}	10	10^{-1}	10^6
	Fractured igneous and metamorphic rocks	10^3	10^{-5}	1	10^{-2}	10^5
	Limestone and dolomite	10^2	10^{-6}	10^{-1}	10^{-3}	10^4
	Sandstone	10	10^{-7}	10^{-2}	10^{-4}	10^3
	Unfractured metamorphic and igneous rocks	1	10^{-8}	10^{-3}	10^{-5}	10^2
	Shale	10^{-1}	10^{-9}	10^{-4}	10^{-6}	10
	Unweathered marine clay	10^{-2}	10^{-10}	10^{-5}	10^{-7}	1
	Glacial till	10^{-3}	10^{-11}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-1}
	Silt, loess	10^{-4}	10^{-12}	10^{-7}	10^{-9}	10^{-2}
	Silty sand	10^{-5}	10^{-13}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-3}
	Clean sand	10^{-6}	10^{-14}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-4}
		10^{-7}	10^{-15}	10^{-10}	10^{-12}	10^{-5}
		10^{-8}	10^{-16}	10^{-11}	10^{-13}	10^{-6}
						10^{-7}
	Unconsolidated deposits					
	Gravel					



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

**MÓDULO II:
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

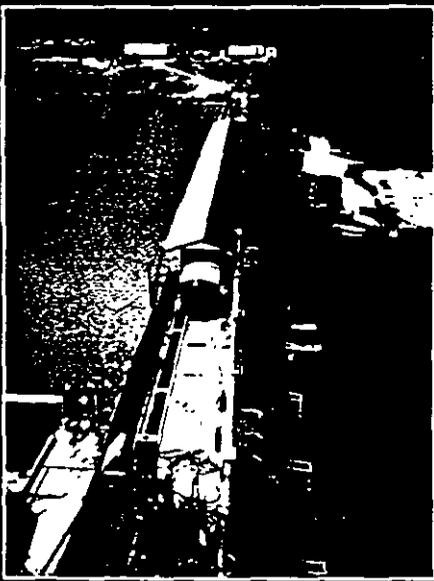
TEMA :

**WATER AVAILABILITY IN MEXICO CONSIDERING QUANTITY, QUALITY AND
USES**

**DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE – OCTUBRE 1999**

SEP 1999 VOL 27 NO 5
 ISSN 1084-0699
 CODEN WRPLD5

JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING and MANAGEMENT



ASCE

American Society of Civil Engineers
 Water Resources Planning and
 Management Division

Water Availability in Mexico Considering Quantity, Quality, and Uses B. E. Jiménez, H. Garduño, and R. Domínguez	1
Presence of Nonconvexity in Groundwater Concentration Response Functions David P. Ahlfeld and Mary Palumbo Sprong	8
Utilizing Sparsity in Time-Varying Optimal Control of Aquifer Cleanup Christopher M. Mansfield, Christine A. Shoemaker, and Li-Zhi Liao	15
Assessing Lake Okeechobee Eutrophication with Water-Quality Models Kang-Ren Jin, R. Thomas James, Wu-Seng Lung, Daniel P. Loucks, Richard A. Park, and Todd S. Tisdale	22
Reservoir Operation Studies of Sabarmati System, India Sharad K. Jain, Manmohan K. Goel, and Pushpendra K. Agarwal	31
Computational Issues for Optimal In-Situ Bioremediation Design Barbara Spang Minsker and Christine A. Shoemaker	39
Location and Schedule Optimization of Soil Vapor Extraction System Design Yung-Hsin Sun and William W-G. Yeh	47
Dynamic Optimal Ground Water Remediation by Granular Activated Carbon Teresa B. Culver and Gary W. Shenk	59
REVIEWERS OF THE <i>Journal of Water Resources Planning and Management</i>	65

JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING and MANAGEMENT

EDITOR

JAY R. LUND

University of California, Davis

ASSOCIATE EDITORS

Steven Buchberger, *University of Cincinnati*

Francis Chung, *California Department of Water Resources*

David R. Dawdy, *Consulting Hydrologist*

Charles Howard, *Charles Howard and Associates, Ltd.*

Kevin Lansey, *University of Arizona at Tucson*

Quentin Martin, *Lower Colorado River Authority*

Daene McKinney, *University of Texas at Austin*

Richard Vogel, *Tufts University*

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS

Water Resources Planning and Management Division Executive Committee

William A. Macaitis, Chair
Walter M. Grayman
James R. Groves
Michael A. Ports
Richard S. Siegel

Board Publications Committee

William A. Welsh, P.E., Chair
Edward E. Rinne, P.E., Vice Chair
Arthur J. Greengard Jr., P.E.
Robert H. Marks
Vernon B. Watwood Jr., P.E.

Publications

David R. Dresia, Managing Director

Production Department

Bruce Gossett, Director,
Publication Production
Johanna M. Reinhart, Manager, Journals
Jackie Perry, Production Coordinator
Carol Reese, Manager,
Information Products
Karen A. Ryan,
Copyright and Permissions
Susan Fisher, Reprints
Damita Snow,
Manuscript Database Coordinator
Maud Gale, Discussions and Closures

Editorial Department

Chris Ralston, Senior Copy Editor
Don Tippman, Senior Copy Editor
Jeff L. Brown, Copy Editor
Selena Leary, Copy Editor

JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING and MANAGEMENT

Volume 124

Number 1

January/February 1998

TECHNICAL PAPERS

Water Availability in Mexico Considering Quantity, Quality, and Uses. B. E. Jiménez, H. Garduño, and R. Domínguez	1
Presence of Nonconvexity in Groundwater Concentration Response Functions. David P. Ahlfeld and Mary Palumbo Sprong	8
Utilizing Sparsity in Time-Varying Optimal Control of Aquifer Cleanup. Christopher M. Mansfield, Christine A. Shoemaker, and Li-Zhi Liao	15
Assessing Lake Okeechobee Eutrophication with Water-Quality Models. Kang-Ren Jin, R. Thomas James, Wu-Seng Lung, Daniel P. Loucks, Richard A. Park, and Todd S. Tisdale	22
Reservoir Operation Studies of Sabarmati System, India. Sharad K. Jain, Manmohan K. Goel, and Pushpendra K. Agarwal	31
Computational Issues for Optimal In-Situ Bioremediation Design. Barbara Spang Minsker and Christine A. Shoemaker	39
Location and Schedule Optimization of Soil Vapor Extraction System Design. Yung-Hsin Sun and William W-G. Yeh	47
Dynamic Optimal Ground Water Remediation by Granular Activated Carbon. Teresa B. Culver and Gary W. Shenk	59
REVIEWERS OF THE <i>Journal of Water Resources Planning and Management</i>	65

WATER AVAILABILITY IN MEXICO CONSIDERING QUANTITY, QUALITY, AND USES

By B. E. Jiménez,¹ H. Garduño,² and R. Domínguez³

ABSTRACT: In water supply planning, managers must assess both quantity and quality of sources. These assessments require adequate data, which is not always available, even in developed countries, and much less so in developing countries where the availability of water quality data is especially limited. Yet, most developing countries need to expand water supplies quickly, and methods for rapid assessment, with limited data, are needed. A method for such assessments is discussed and its application to Mexico, a rapidly-growing nation with an ambitious plan for the expansion of its water supply, is shown. The paper concludes with suggestions for how other developing nations can apply the concepts presented.

INTRODUCTION

To make informed decisions about potential water supply systems, managers must determine the quantity of water available and its condition so that they can assess the possible need for water imports and treatment infrastructure. This kind of determination requires assessments of both water quantity and quality based on reliable data. In developed countries, the data required are expected to be available, but in developing countries, decisions are usually made on the basis of water quantity because the availability of water quality data is severely limited. Yet, most developing countries are growing rapidly and need to expand water supplies quickly. One way to address the lack of water quality data, and to some extent, the concurrent lack of water quantity data, is with a water quantity and quality index. In this paper, the writers discuss this concept and show its application to Mexico, a rapidly-growing nation with an ambitious plan for the expansion of its water supply.

Because the use of water quality indices has been, to some extent, discredited in several countries, readers may discount their practical value. However, the problem of adequate quantities of safe drinking water remains one of the most urgent health and environmental problems of the planet, and appropriate methods to assess jointly quantity and quality deserves a fresh look.

In 1977, the United Nations Water Conference at Mar del Plata, Argentina, concluded that over 1,000,000,000 people in the world's rural areas lacked access to a safe water supply (Pacey 1977). As a result of these findings, and others, the United Nations proclaimed the 1980s as the "International Drinking Water Supply and Sanitation Decade." The World Bank reported in 1989 that the coverage had improved, but that the greatest achievement had been the communication, awareness, and priority-setting that had occurred to deal with the problem. At the 1992 United Nations Conference on Environment and Development in Rio de Janeiro, drinking-water supply and sanitation was featured by Agenda 21 (the action program) as one of seven major program themes for the fresh-water sector (Grigg 1996).

Although the problems in Latin America are formidable,

progress has been made since about 1960. The percentage of people served has increased, but the total number without service has actually increased. In Latin America, a significant portion of all diseases is still attributed to polluted drinking water and untreated sewage, and water-related diarrheal diseases continue as the leading cause of infant mortality in many countries.

Yet, water quality indices are not favored. Many efforts were made during the 1960s to establish an expedient and reliable rating system for water quality. The results were the so-called "Quality Index" parameters (Horton 1985; Landwehr 1979; Crabtree et al. 1987; Dinius 1987). In general terms, these indices are characterized by the utilization of a limited and specific number of weighted parameters with little physical, chemical, or biological basis. The difficulty of their application on a worldwide basis to represent real problems nearly led to their total abandonment. Nevertheless, and particularly in those countries where a lack of water supply infrastructure and sanitation programs exists, knowledge of the quality of water is still necessary to evaluate the amount of water available for specific uses.

The water management methods employed by developed countries require a large amount of data, with uniform sampling methods during long-term periods in all regions. Complex mathematical models are also involved in such methods. These requirements are difficult to meet in developing countries, and improved procedures are urgently needed.

To have a clear picture of the effective availability of water, the writers developed an index to take into account quality issues based on the available information in Mexico. This method is simple and provides a rational approach for the future management of water resources.

The availability index (AI) incorporates two terms: (1) *a*, which reflects the quantity; and (2) *b*, the degree of treatment required to upgrade the water quality to make it suitable for a particular use. The term *b* is determined based on another index known as the use potential (UP), which reflects to what degree and why water fails to comply with the quality standards for that particular use.

The computation of AI in a specific region and for a particular use makes it clear that water availability obtained merely through hydraulic balances is often misleading. Also, the need for treatment becomes apparent. Furthermore, the calculation of UP stresses the need to consider simultaneously both quantity and quality. In addition, the proposed methodology for computing UP has the advantage of not requiring the same predetermined parameter data for the whole country or region, with long and uniform sampling periods. Its calculation is quite straightforward and, therefore, the methodology becomes very useful for developing countries.

¹Titular Res., Dept. Envir., Apdo Postal 70472, Inst. de Ingeniería, UNAM, Ciudad Univ., 04510 Coyoacan, México.

²Adviser of The Nat. Water Commission, Cerrada Sánchez Azcona 1723-11° piso, 03100 Benito Juárez, México.

³Titular Res., Dept. Hydr., Apdo Postal Inst. de Ingeniería, Ciudad Univ. 04510 Coyoacan, México.

Note. Discussion open until July 1, 1998. To extend the closing date one month, a written request must be filed with the ASCE Manager of Journals. The manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 10, 1997. This paper is part of the *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 124, No. 1, January/February, 1998. ©ASCE, ISSN 0733-9496/98/0001-0007/\$4.00 + \$.50 per page. Paper No. 15317.

CALCULATION OF AI

For a specific application, the AI can be defined as follows:

$$AI = (a, b) \quad (1)$$

where a = relative water availability for a certain hydrological region; b = Classification of water in terms of the treatment required to upgrade its quality for the intended use.

Parameter a is computed based on the following hydraulic balance diagram. The hydraulic balance equation follows from Fig. 1

$$S(i) = \sum_j S_j I(i-1) + T(i-1) + CP(i) - \sum_k D_k(i) - T(i) + \sum_l R_k(i) \quad (2)$$

where (i) = region where the hydraulic balance is computed; $(i-1)$ = regions that discharge into region (i) ; $S_j I(i-1)$ = volume in excess of other regions that flows into region (i) ; $S(i)$ = volume in excess for region (i) ; $T(i-1)$ = transfers of water volumes from other regions to region (i) ; $T(i)$ = transfers made from region (i) toward other regions as a result of previous commitments; $CP(i)$ = volume generated within region (i) ; $D_k(i)$ = demands for use k in region (i) ; and $R_k(i)$ = return flows corresponding to use k in region (i) .

When working with (2), the following must be considered:

- It is applied upstream-downstream, so that in the first region $(i=1)$ and $S(i-1) = 0$.
- The demands for hydropower are not included, since for that case it is assumed that $D_k(i) = R_k(i) \forall k$.
- $CP(i)$ includes surface runoff and ground water recharge due to rainfall. The net evaporation for reservoirs is computed as evaporation less rainfall.
- Since most demand and return flow volumes are not metered, demands are estimated through irrigation crop requirements and water supply per capita requirements, and return flows are estimated with return percentages.

From (2), the relative availability of water, expressed only in terms of quantity, is

$$Pa(i) = \frac{S(i) + \sum_k D_k(i)}{D_k(i)} \quad (3)$$

For practical purposes, it will be assumed that for values of $Pa(i)$ near 1.0 (e.g., between 0.7 and 1.4), supply is in equilibrium with demands. Therefore,

If $Pa(i) \geq 1.4$, there is abundant supply and $a = 1$

If $0.7 \leq Pa(i) < 1.4$, supply is in equilibrium with demands and $a = 2$

If $Pa(i) < 0.7$, supply is scarce and $a = 3$

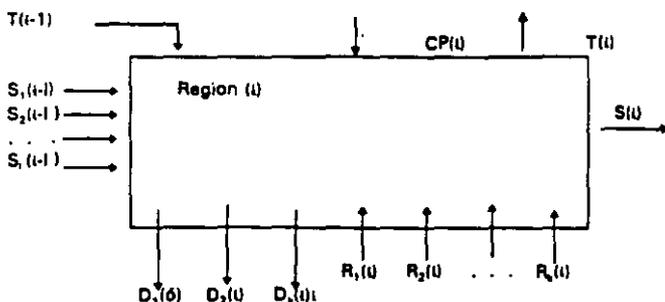


FIG. 1. Hydraulic Diagram

Eq. (2) is applied for annual average values and no particular consideration is made for the variations within a year, nor for series of dry periods. A more detailed analysis could be achieved modifying the limit values (1.4 and 0.7) in terms of the available storage capacity in the region and of rainfall variability within a year. To determine the value of b in AI, the UP is calculated by means of a simple spreadsheet that stores the values of the standards that define the suitable water quality for each particular use. The measured value (MV) for each I parameter is subtracted from the standard value (SV). To normalize the differences RN(I) between the SV and MV for all parameters, the following criteria are established:

$MV(I) \leq SV(I)$. When $SV(I)$ refers to a maximum

allowable value, $RN(I)$ is defined as 1 (4)

$MV(I) \leq SV(I)$. When $SV(I)$ refers to a minimum allowable

value $\Rightarrow RN(I) = SV(I)/MV(I)$ (5)

$MV(I) > SV(I)$. When $SV(I)$ refers to a maximum

allowable value $\Rightarrow RN(I) = MV(I)/SV(I)$ (6)

$MV(I) > SV(I)$. When $SV(I)$ refers to a minimum allowable

value, $RN(I)$ is defined as 1 (7)

$MV(I) > 0$ and $SV(I)$ must be absent (zero) $\Rightarrow RN(I) = MV(I)$ (8)

Table 1 contains some practical applications of the calculation of $RN(I)$.

The value of UP is obtained with

$$UP = \frac{1}{n} \sum_n RN(I) \quad (9)$$

where n = number of parameters measured within a region; $RN(I)$ = criteria used for comparing the mean value of a parameter I to the standard established.

It is possible with this method to vary the value of n (number and type of parameters) so that national criteria, local legislation, or even particular parameters of interest can be taken into account for a specific analysis. A particular advantage of the method is that decisions can be made regardless of the number n of quality parameters for which data are available, as long as data are available for the relevant ones, i.e., those affecting the potential use of water within a region. Moreover, a general analysis of water availability can be made in a country even if different sets of standards are used for each region, or samples that do not cover the same parameters for a long time are used.

Computed values of UP are interpreted as follows:

TABLE 1. Examples of Calculation of $RN(I)$

Parameter (1)	Average* measured value MV(I) (2)	Standard SV(I) value (3)	Case (4)	Value of RN(I) (5)
As	0.02 mg/L	Maximum of 0.05 mg/L	$MV(I) \leq SV(I)$	1
As	0.2 mg/L	Maximum of 0.05 mg/L	$MV(I) > SV(I)$	$\frac{MV(I)}{SV(I)} = \frac{0.2}{0.05} = 4$
O ₂	2 mg/L	Minimum of 4 mg/L	$MV(I) \leq SV(I)$	$\frac{SV(I)}{MV(I)} = \frac{4}{2} = 2$
O ₂	6 mg/L	Minimum of 4 mg/L	$MV(I) > SV(I)$	1
Grease and oil	10 mg/L	Absent	$MV(I) > 0$ and $SV(I) = 0$	10

*For a certain period within a desired region (I).

TABLE 2. AI for Intended Use Based on Quantity and Quality of Water in Particular Region

Quantity (a) (1)	Quality (b)		
	Suitable, 1 (2)	Requires simple and low cost treatment, 2 (3)	Requires costly treatment, 3 (4)
1 (Abundance)	11	12	13
2 (Equilibrium)	21	22	23
3 (Shortage)	31	32	33

- a. UP = 1 means that, according to available information, water quality is suitable for its intended use.
- b. UP > 1 means that water fails to fulfill the quality criteria. The higher its value, the more it deviates from the required conditions.

The computer program to compute UP highlights those parameters that cause the value of UP to deviate from 1, as well as those parameters that lead to a value of RN(I) > 1. It is possible therefore to assess whether or not specific problems are likely to arise even when the average value is equal or close to 1. Furthermore, the possibility of controlling the problem through water treatment may be assessed. Through this reasoning, a value is assigned to parameter "b," as indicated next.

b = 1, if water complies with the required quality in its natural condition (UP = 1) and therefore no treatment is necessary.

b = 2, if the required treatment is simple and economic (such as filtration), depending on the parameters that cause UP to deviate from 1.

b = 3, if a costly treatment process is necessary (such as reverse osmosis), depending on the parameters that cause UP to deviate from 1.

Note that the value assigned to *b* does not necessarily depend on the relative size of UP, but on the available treatment technology, i.e., a UP of 10³ might result from an RN of 10¹² due to the presence of fecal coliforms. However, *b* would be assigned a value of 2, since low-cost chlorination can easily control up to 2.2 MPN/100 ml.

Another example is a case where a UP of 3 resulted from an RN of 300 due to a measured concentration of arsenic of 15 mg/L; *b* would be assigned a value of 3, since costly reverse osmosis would be required. Finally, quantity *a* and qual-

ity *b* parameters are integrated in the AI as shown in Table 2 for a particular use for a specific water region. The most severe water quantity and quality limitations correspond to the last column of Table 2. For level (1,3) the easiest solution could be to change the source of supply within the same region since water is abundant in that region. For levels (2,3) and (3,3) it is necessary to evaluate the economic feasibility of applying costly treatment as compared to water transfer from another basin.

APPLICATION OF METHODOLOGY TO CASE OF MEXICO

Mexico is divided into 37 hydrological regions. Fig. 2 is a map of the hydraulic balances computed with (2). It is clear that water is scarce in the north and abundant in the south.

To evaluate water quality, the UP index was computed for each of the regions using the data collected by the National Monitoring Network and the Quality Standards for Water Use (Official Gazette December 13, 1989). Although the standards listed in Table 3 are not compulsory, they are used in Mexico to rate the possible use of water according to its quality.

Fig. 3 is a map of the value of the UP index for surface water as a source for drinking water. Table 4 presents the values of "a" and "b" determined for each of the 37 regions shown in Fig. 2, based on the analyses of the UP values corresponding to a drinking water source. Two examples of the calculation of the "a" and "b" parameters are given next. In the upper part of region 26 (Alto Pánuco), a value of 2,200 was determined for UP as the average of the values of RN(I). The following are some of the parameters that exceed the standards and cause RN(I) to be larger than 1: fecal coliform bacteria (FC), mercury (Hg), aluminum (Al), nitrites and nickel (Ni). Table 5 shows the number of times the standard values of certain parameters are exceeded for surface sources for drinking water. From Fig. 2, this region has been classified as

TABLE 3. Number of Parameters in Standards for Water Use*

Use (1)	No. of parameters (2)
Source for drinking water	113
Recreation with primary contact	14
Irrigation	33
Cattle breeding	20
Protection of aquatic life	
Fresh water	106
Salt water	99

*Official Gazette of the Federation, December 13, 1989.

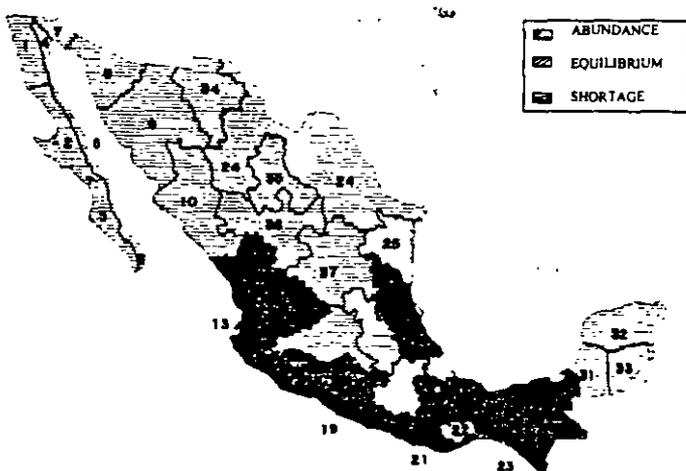


FIG. 2. Hydraulic Balance Map for Mexican Hydrological Regions

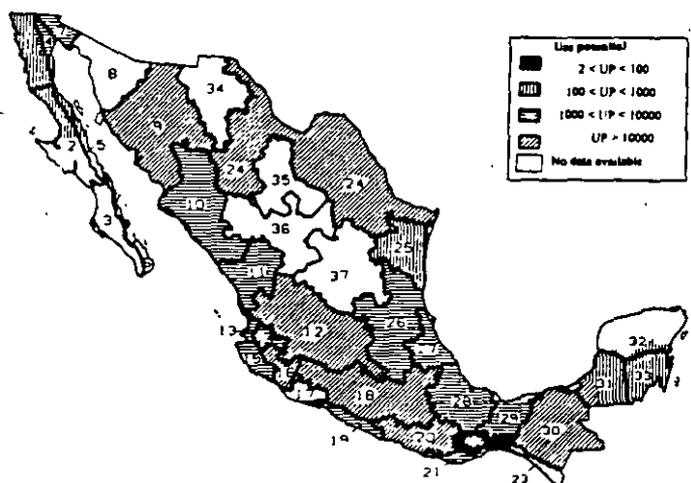


FIG. 3. UP Index Map for Water Supplies in Surface Water

TABLE 4. Values for *a* and *b* in Different Hydrological Regions of Mexico

Region (1)	Hydraulic balance (2)	<i>a</i> (3)	UP FOR SOURCES FOR DRINKING WATER				<i>b</i> (8)
			Surface		Ground Water		
			Value (4)	Type (5)	Value (6)	Type (7)	
01	Shortage	3	105	PO ₄ , MBAS	486	FC	3
02	Shortage	3	ND	—	ND	—	3
03	Shortage	3	ND	—	ND	—	—
04	Shortage	3	ND	—	ND	—	3
05	Shortage	3	ND	—	ND	—	3
06	Shortage	3	ND	—	6	FC	2
07	Shortage	3	2,200	FC	ND	—	3
08	Shortage	3	ND	—	ND	—	—
09	Shortage	3	50,730	FC	ND	—	3
10	Shortage	3	1,300	FC	ND	—	3
11	Abundance	1	3,130	FC	155	FC, PO ₄	3
12	Abundance	1	77 × 10 ⁴	FC, PO ₄	128	FC	3
13	Abundance	1	4,180	FC, SO ₄ , SS	ND	—	3
14	Abundance	1	4,220	FC	ND	—	3
15	Abundance	1	1,250	FC	380	FC	3
16	Abundance	1	13,100	FC	450	FC	3
17	Abundance	1	ND	—	ND	—	—
18	Abundance	1	7 × 10 ⁹	FC, NIT	10	FC	3
19	Abundance	1	9,650	FC, Cl	1	—	3
20	Abundance	1	72,930	FC	1	—	2
21	Abundance	1	2,800	FC, Cl	ND	—	3
22	Shortage	3	11	Cl	ND	—	1
	Equilibrium	1	—	—	—	—	—
23	Abundance	1	ND	—	ND	—	—
24	Shortage	3	2 × 10 ⁷	FC, PO ₄	ND	—	3
	Equilibrium	2	—	—	—	—	—
25	Equilibrium	2	190	FC, Ni, Al	ND	—	3
26	Shortage	2	17 × 10 ²	FC, COL, Hg	ND	—	3
	Equilibrium	3	—	Al, NIT	—	—	—
	—	—	—	Ni	—	—	—
27	Abundance	1	6,350	FC	ND	—	3
28	Abundance	1	5,090	FC	ND	—	3
	Shortage	3	—	—	—	—	—
29	Abundance	1	1,660	FC, NIT, NAT	ND	—	3
30	Abundance	1	78 × 10 ⁴	FC, NIT	1	—	2
31	Shortage	3	250	FC, NIT	3	Cl, DS	3
	Abundance	1	—	—	—	—	—
32	Shortage	3	ND	—	300	FC	—
33	Shortage	3	106	FC	4	SO ₄	3
34	Shortage	3	ND	—	1	—	1
35	Shortage	3	ND	—	SD	—	—
36	Shortage	3	ND	—	8	F	2
37	Shortage	3	ND	—	12	FC	2

Note: Al: aluminum; As: arsenic; B: boron; Cl: chlorides; CO: conductivity; COL: color; DS: dissolved solids; F: fluoride; FC: fecal coliforms; NAT: nitrates; ND: data not available; Ni: nickel; NIT: nitrites; MBAS: methylene blue active substances; PO₄: phosphates; SO₄: sulphates; and SS: suspended solids.

TABLE 5. Parameters that Exceeded Quality Standards of Surface Water as Source for Drinking Water in Region 26

Parameter (1)	Standard value (mg/L) (2)	Number of times standard value is exceeded (3)
Fecal coliform bacteria	1,000 MPN, 100 mL	13,900
Apparent color	75	3,123
Grease and oil	0	10
Methyl blue active substances	0.5	1.2
Aluminum	0.02	61
Iron	0.3	2
Mercury	0.001	500
Nickel	0.01	50

in hydraulic "equilibrium" and, therefore, *a* = 2. However, considering the required treatment for drinking water, a value of 3 is assigned to parameter "b." Therefore, the use of water could be restricted—in spite of the availability in large quantities—by the high cost of treatment needed.

Another example refers to region 16 (Armerfa-Coahuayana),

where the UP is 13,100 and the only parameter exceeding the limits set by the Standards for Water Use correspond to the fecal coliform count (FC). In this case, as indicated in Table 4, the region has an abundant supply of water and, therefore, *a* = 1; since the treatment to control the problem requires only a simple disinfection process (such as chlorination), a value of 2 is assigned to "b."

Fig. 4 shows a map of the computed values for AI in the hydrological regions.

DISCUSSION

Figs. 2 and 4 show that while in the northern regions there is a shortage of water, some water has a suitable quality; whereas in some southern regions, in spite of its abundance, the availability of water is restricted by the need for treatment, i.e., the hydraulic balance in terms of quantity is not enough to describe the "real" water availability.

As a result of the detailed analysis of data obtained during the calculation of the UP index, some general statements for water quality in the country can be made. Fig. 5 shows the



FIG. 4. AI Map for Drinking Water Sources Based on Quantity and Quality of Water in Each Region

most frequent problems found for surface and ground water sources for drinking water. In both situations, the major problem is microbiological pollution. In addition, even though there is more available data for surface water than for ground water, the former shows a systematic and conspicuous inferior quality with respect to the latter. In fact, surface water sources suitable for drinking are quite scarce and their availability for irrigation purposes are also quite limited. (Analysis for irrigation and aquatic life protection are not included in this paper.) Figs. 6 and 7 highlight the parameters that limit water availability for agricultural purposes and for the ecological protection of aquatic life; in these cases, the major restriction is also microbiological pollution.

To evaluate the problem at a national level, several maps were prepared by taking advantage of available information. Fig. 8 shows a map of the regions where water is scarce and where problems of pollution of the main sources of supply exist. Strict programs to control pollution caused by wastewater discharges should be enforced in these regions. It also shows regions with a shortage of water where large volumes used for irrigation are drawn from sources also used for the municipal water supply. Here, more efficient irrigation tech-

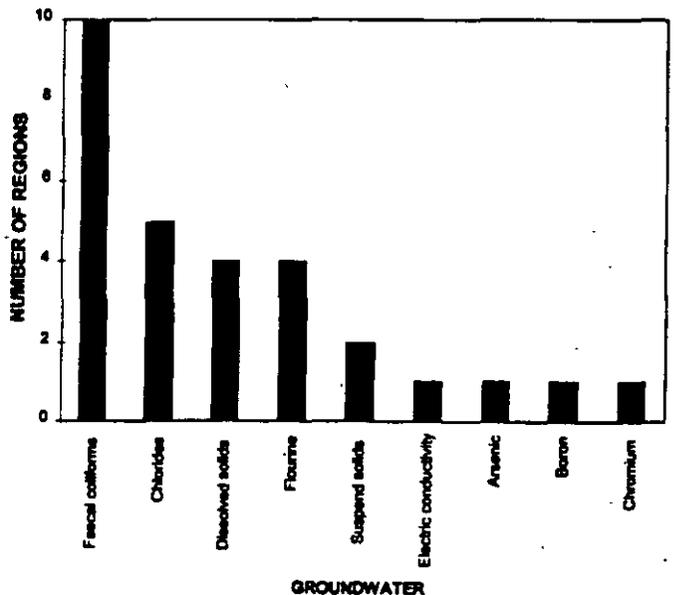
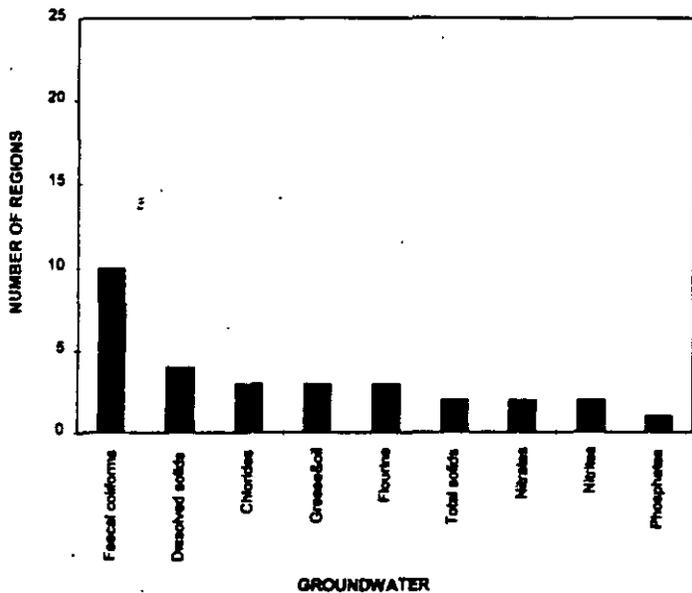
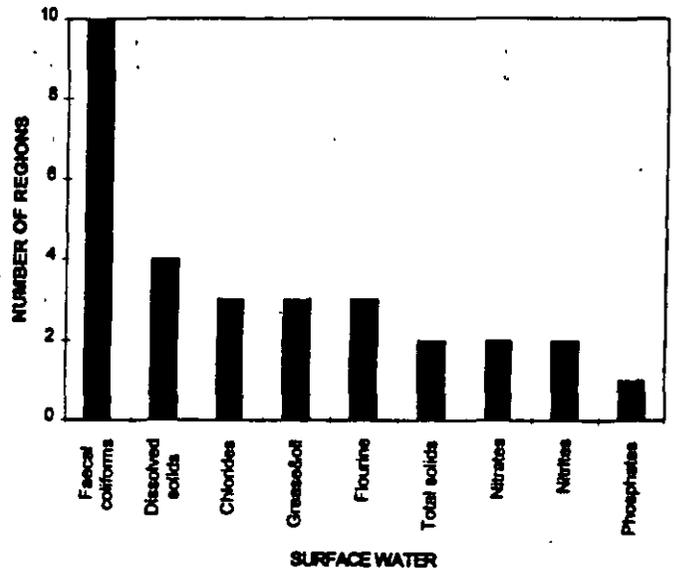
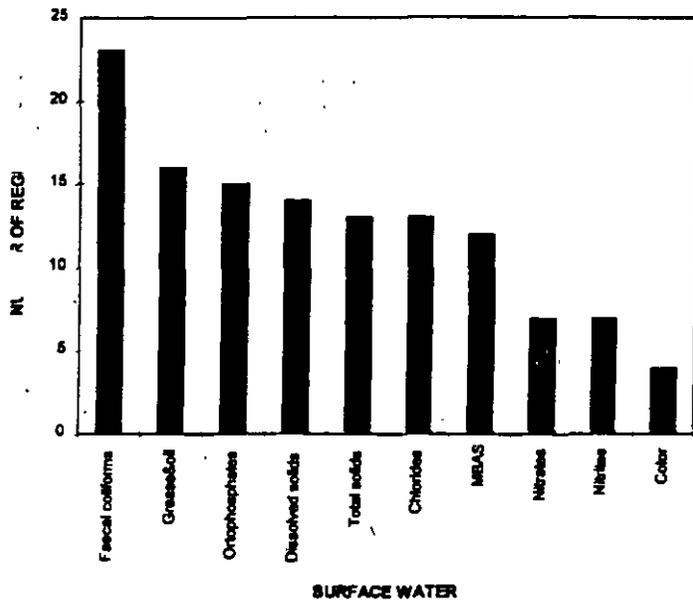


FIG. 5. Parameters Most Frequently Exceeded in Surface and Groundwater Sources for Drinking Water

FIG. 6. Parameters Most Frequently Exceeded in Surface and Groundwater Sources for Irrigation

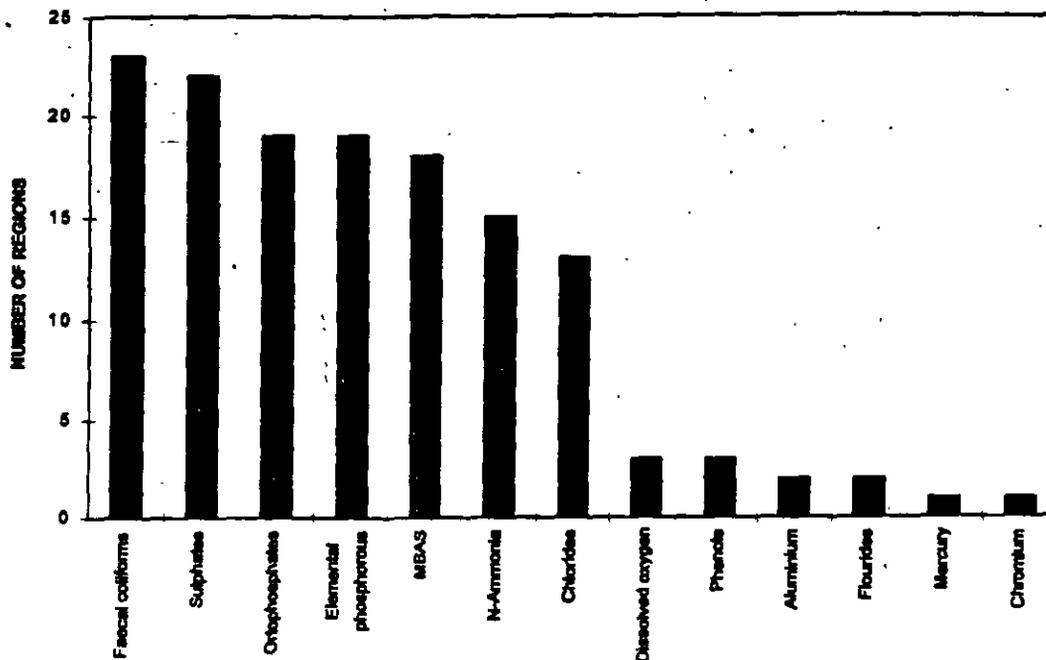


FIG. 7. Parameters Most Frequently Exceeded in Surface Water Sources for Aquatic Life Protection

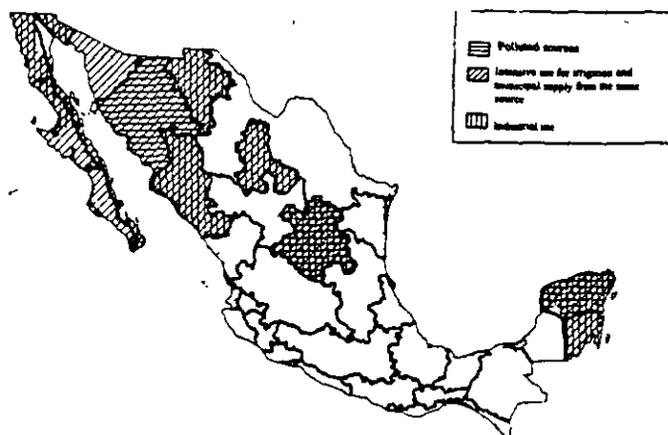


FIG. 8. Map of Regions where Conflicts Arise due to Shortage, Quality Problems and Uses of Water Supplies

nologies should be introduced so that water not used in agriculture may be allocated to human consumption. Furthermore, in the case of regions with water shortage, where industries are important users, reuse and recycling are needed.

Fig. 9 shows the status of ground water supplies in the country. It integrates regions where the drinking water supply comes predominantly from polluted and overexploited aquifers that need use regulations to achieve hydraulic equilibrium. These regions also need to carry on sanitary protection programs of wells and recharge areas to improve and preserve water quality.

In addition, the map highlights the regions where ground water is used for agriculture and industry, while drinking water is obtained either from the same sources or from poor quality surface water. If these facts are added to the problem of overexploited aquifers, it can be concluded that it is necessary to develop and implement specific programs for efficient water use. Fig. 9 also shows those regions where it is necessary to collect more data to determine reliable hydraulic balances of ground water sources.

Finally, Fig. 10 shows the availability of drinking water, taking into account both quantity and quality. The nine categories of the availability index were grouped in three classes: (1) Regions with enough water of acceptable quality; (2)

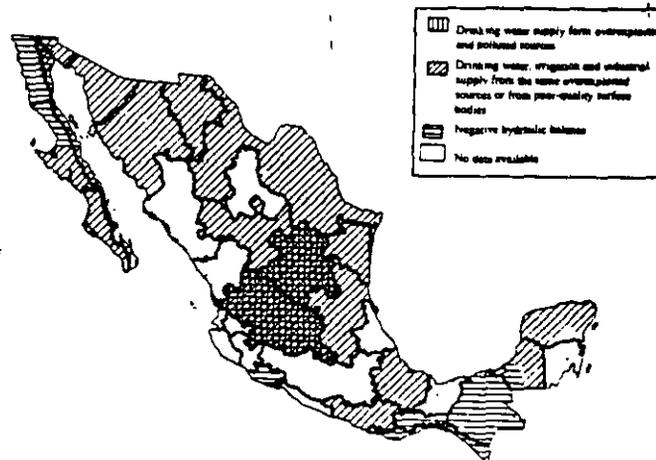


FIG. 9. Map of Status of Overexploited Aquifers, Taking Into Account Water-Quality Problems

regions with intermediate availability; and (3) regions where water is scarce and polluted.

CONCLUSIONS

From a methodological viewpoint, this paper shows that it is possible to put forward a scheme for explaining the global problem of water quantity and quality in Mexico based on the calculation of the UP and AI indices, as well as recommendations for a more rational allocation and use of water. It is also possible to prioritize solutions based on the knowledge of water pollution problems, where they are located, and the conflicts arising from the quantity-quality-use relationship. This information cannot be obtained from the regional hydraulic balances nor from the traditional pollution maps expressed in terms of the biological oxygen demand (BOD) or of the chemical oxygen demand (COD). In particular, with the available information in Mexico, it can be concluded that it is urgent to protect and disinfect drinking water supply sources. Also, to prevent the negative effects of using polluted water in irrigation, it would be advisable to provide information to farmers on the water status so that they can protect themselves during

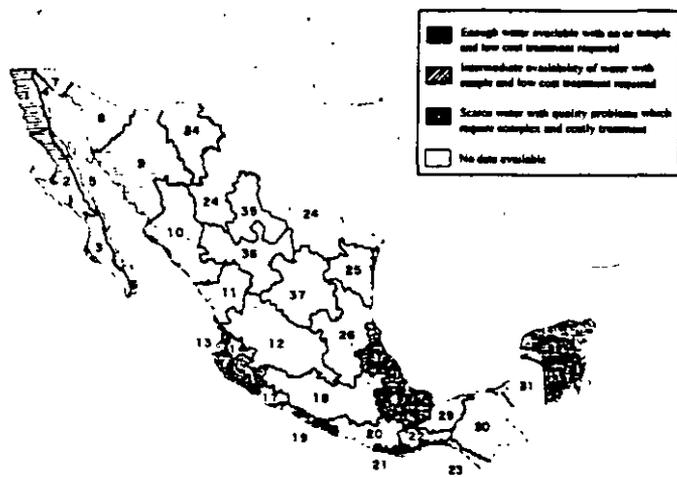


FIG. 10. AI Map Based on Quantity and Quality of Surface Water Sources for Drinking Water

irrigation operations, as well as to apply irrigation restrictions with this type of water for different crops.

Furthermore, considering that ground water shows the best quality and taking into account the overexploitation-related problems that exist in many of the regions, a change in water allocation is advisable when the source of supply is shared among agriculture, industry, and municipalities. The idea would be to reserve ground water (of better quality) for human consumption.

Agriculture (with efficiencies in the use of water of 50% and a consumption of 76% of ground water abstraction), as well as industry with enough resources to pay for the conditioning of water, should be responsible for implementing water efficiency use and recycling programs.

The analysis of the data available for Mexico confirms that it shares water quality problems, both microbiological pollution from the developing world and toxic pollution from the developed countries. Because microbiological pollution is more common and economic resources are scarce, priority should be given to low-cost treatment technologies to first reduce health problems. Of course, a few specific and well-located water-quality problems due to toxic pollution should also be dealt with, but currently, large expensive toxic-control programs are infeasible.

All of the analyses made for the Mexican case are generalized because data were averaged for large areas in each region. Many specific problems for smaller regions will become apparent as more detailed analysis are made. Better results will be achieved as more reliable data becomes available.

Finally, the proposed methodology could be easily adapted

to the conditions of other countries with simple changes. Quality standards for water use of the particular country or international standards for a first approach, could be used to get an initial overview of the problem with the available water quality data. As better field information is collected, and more realistic quality standards for water use for the particular conditions of a country are developed, a more reliable description of the problem will be obtained and better solutions will be recommended.

APPENDIX I. REFERENCES

- Crabtree, R., Cluckie, D., and Foster, C. (1987). "Percentile estimation for water quality data." *Water Res.*, 21(5), 583-590.
- Dinius, S. H. (1987). "Design of an index of water quality." *Water Resour. Bull.*, 23(5), 833-843.
- Grigg, N. (1996). *Water resources management: planning, regulations, cases*. McGraw-Hill, Inc., New York, N.Y., 501-513.
- Horton, R. K. (1985). "An index number system for rating water quality." *J. Water Pollution Control Federation*, 37.
- Landwehr, J. M. (1979). "A statistical review of a class of water quality indices." *Water Res.*, 15(2), 460-468.
- Pacey, A. (1977). *Editor water for the four thousand millions*. Pergamon Press, Oxford.
- Postel, S. (1992). *Last oasis, facing water scarcity*. W. W. Norton & Company, 191.

APPENDIX II. NOTATION

The following symbols are used in this paper:

- a = relative water availability for certain hydrological region;
- b = classification of water in terms of treatment required to upgrade its quality for intended use;
- $CP(i)$ = volume generated within region (i);
- $D_k(i)$ = demands for use k in region (i);
- (i) = region where hydraulic balance is computed;
- $(i - 1)$ = regions which discharge into region (i);
- n = number of parameters measured within region;
- $Pa(i)$ = water supply per capita requirements;
- $R_k(i)$ = return flows corresponding to use k in region (i);
- $RN(I)$ = criteria used for comparing mean value of parameter I to standard established;
- $S(i)$ = volume in excess for region (i);
- $S_i(i - 1)$ = volume in excess of other regions that flows into region (i);
- $T(i)$ = transfers made from region (i) toward other regions as result of previous commitments; and
- $T(i - 1)$ = transfers of water volumes from other regions to region (i).

Subscripts

- k = designing different uses of water; and
- l = designing regions that discharge into studied region.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE
ACUÍFEROS**

**MÓDULO 2
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

TEMA

CICLO DEL NITRÓGENO

Dra. Ma. aurora Armienta H.

**PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 1999**

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS

CICLOS DEL NITROGENO Y DEL FIERRO

Dra. Ma. Aurora Armienta H.
Septiembre 1999

CICLO DEL NITRÓGENO

1. Aspectos Generales

En el medio ambiente el nitrógeno existe en diferentes especies químicas y en más de un estado de oxidación. Se conoce como **ciclo del nitrógeno** a la circulación de las varias formas de nitrógeno a través de la litósfera, atmósfera, hidrósfera y biósfera, por medio de procesos químicos y biológicos. La forma más abundante del nitrógeno se encuentra en el aire, en el cual se presenta en su forma molecular (como N_2) y constituye alrededor del 79% en volumen (aproximadamente 39×10^{20} g de nitrógeno)

El N_2 gaseoso cambia su estado de oxidación y se convierte en compuestos químicos que contienen nitrógeno a través de procesos que se conocen como "fijación de nitrógeno". Para ello se requiere una gran cantidad de energía debido al triple enlace que une los dos átomos de nitrógeno ($N \equiv N$). La fijación biológica natural se lleva a cabo por las algas azul-verde y ciertos organismos relacionados que tienen la capacidad de la fotosíntesis, y por ciertas especies de bacterias que usan la materia orgánica como fuente de energía. Además, actualmente la producción de abono, la combustión y los cultivos de leguminosas han duplicado la cantidad fijada anualmente.

Existen pocas especies capaces de transformar el nitrógeno atmosférico en formas útiles para los organismos vivos. Estos organismos pueden recuperar y utilizar nuevamente el nitrógeno biodisponible siendo una parte fundamental del ciclo del nitrógeno (Figura 1).

La primera etapa de este ciclo, la fijación del nitrógeno, en la cual el nitrógeno atmosférico se convierte en compuestos de nitrógeno inorgánico, es efectuada principalmente (90%) por ciertas bacterias y algas azules. Una cantidad mucho menor de Nitrógeno libre es fijada por medios abióticos (rayos, radiación uv, equipo eléctrico) y por conversión a amoníaco a través del proceso Haber-Bosch.

Se reconocen 2 clases de bacterias fijadoras de Nitrógeno: bacterias de vida libre (no-simbióticas), incluyendo la ciano bacteria (alga azul-verde) Anabaena y Nostoc y tales géneros como Azotobacter, Beijerinckia, y Clostridium, y bacterias mutualistas (simbióticas) tales como Rhyzobium, asociada con las plantas leguminosas, y Spirillum lipoferum, asociada con los pastos de cereales. Las bacterias simbióticas invaden las raíces de las plantas anfitrionas, donde se multiplican y estimulan la formación de nódulos de las raíces, que son crecimientos de células de plantas y bacterias en asociación íntima. Dentro de los nódulos las bacterias convierten el Nitrógeno libre en nitratos, que la planta anfitriona utiliza para su desarrollo.

El nitrógeno queda así en forma útil para la mayoría de los organismos vivos. Además existen bacterias del suelo que obtienen su energía oxidando el amoníaco para formar nitrito (NO_2^-) y posteriormente, nitrato (NO_3^-). A este proceso se le conoce como **nitrificación**. El nitrógeno que usan las plantas está en su mayoría en su forma oxidada. Debido a la abundancia y actividad de las bacterias nitrificantes, casi todo el amoníaco que llega al suelo se oxida a nitrato. Por otro lado, las plantas y muchas bacterias son capaces de reducir el nitrato a óxido nitroso o a nitrógeno gaseoso. A este proceso se le conoce como **denitrificación**. La bacteria responsable de la denitrificación usa nitrato en lugar de

oxígeno para su proceso respiratorio en condiciones anaerobias. Esta transformación requiere una fuente de carbono orgánico para que la bacteria metabolice y se produzca CO_2 como resultado de este metabolismo. El proceso de conversión del nitrógeno orgánico a NH_4^+ se conoce como **amonificación**. Los restos de todos los seres vivos y sus productos residuales son descompuestos por microorganismos en el proceso de amonificación.

El amoníaco formado se incorpora a los aminoácidos de las plantas que luego sirven de alimento a los animales proporcionándoles los aminoácidos con los que se construyen las proteínas animales. Cuando los animales mueren las proteínas se degradan por la acción de los microorganismos y de esta manera, devuelven amoníaco al suelo donde las bacterias nitrificantes lo convierten nuevamente en nitrito y en nitrato.

2. El Nitrógeno en las Aguas Subterráneas.

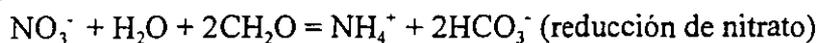
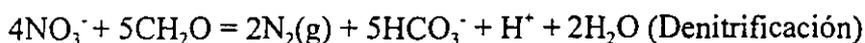
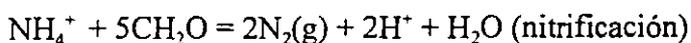
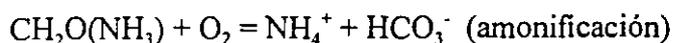
El nitrógeno disuelto, principalmente en forma de nitrato, es el contaminante más común en las aguas subterráneas.

El nitrógeno presente en los acuíferos puede provenir de diversas fuentes, tanto naturales como antropogénicas. En la atmósfera existen óxidos de nitrógeno que se forman por los procesos de combustión de carbón y productos de petróleo (que contienen por lo general cerca de 1 % de nitrógeno), y por la acción de los rayos. Los óxidos de nitrógeno de la atmósfera se transforman a nitratos que se solubilizan en el agua de lluvia, la cual contiene también amoníaco.

El nitrógeno se encuentra en el agua subterránea en forma aniónica como nitrito (con grado de oxidación III +) o nitrato (con grado de oxidación V +), o en forma catiónica como amonio, NH_4^+ (con grado de oxidación III -), también puede encontrarse en estados

intermedios de oxidación formando parte de solutos orgánicos. Algunas otras formas tales como los cianuros, CN^- (con grado de oxidación III-), pueden presentarse en aguas afectadas por contaminación.

Los procesos de transformación de una especie en otra se llevan a cabo a través de estas reacciones principales:



La influencia del hombre en el ciclo del nitrógeno incluye la producción y el uso de fertilizantes sintéticos como el amoníaco y otros compuestos de nitrógeno, además del riego con aguas negras y la utilización de estiércol como fertilizante.

En la Tabla 1 se presentan las especies más importantes en las que se encuentra el nitrógeno en las aguas naturales:

TABLA 1 Principales formas del nitrógeno en las Aguas Naturales

Grado de Oxidación	Especies
V	NO_3^-
III	HNO_2 y NO_2^-
0	N_2
-III	NH_4^+ y NH_3

El pH del agua determinará las especies predominantes para cada grado de oxidación.

Debido a las distintas formas químicas en que existe en el agua, el nitrógeno puede comportarse de manera diversa en los acuíferos (Figura 2). Los iones amonio son adsorbidos fuertemente en las superficies minerales. Las especies aniónicas como el nitrato son fácilmente transportadas por el agua y se mantienen estables en un amplio rango de condiciones. Las especies orgánicas y el nitrito son inestables en agua que contiene oxígeno y se consideran como indicadores de contaminación debida a la disposición de drenaje o basuras orgánicas. La presencia de nitrato o de amonio también puede ser indicativa de este tipo de contaminación pero en un lugar o tiempo alejado del punto de muestreo del agua. Los iones amonio y cianuro son capaces de formar complejos solubles muy estables con ciertos iones metálicos, que pueden estar presentes en algunos tipos de efluentes industriales.

En la áreas rurales puede haber concentraciones excesivas de nitratos debido al estiércol y/o a fosas sépticas. Esto ocurre principalmente donde se tiene una gran concentración de ganado o donde se utiliza el estiércol como fertilizante.

El NO_3^- contenido en el agua subterránea puede introducirse como tal a partir de residuos o fertilizantes aplicados al suelo, o bien, originarse por la oxidación del nitrógeno orgánico o NH_4^+ . Los procesos de amonificación y nitrificación normalmente ocurren arriba del nivel freático, generalmente en la zona de suelo, donde abunda la materia orgánica y el oxígeno. El nitrato es estable en presencia de oxígeno, en los suelos aireados de cultivo. Las concentraciones de NO_3^- que se encuentran normalmente en las aguas subterráneas no están limitadas por su solubilidad. Los NO_3^- puedan transportarse a grandes distancias en acuíferos someros en sedimentos con alta permeabilidad o roca fracturada, debido a que la concentración de O_2 disuelto es por lo general alta. Sin embargo, una disminución en el potencial redox del agua puede, en algunas situaciones causar la denitrificación, produciendo N_2O o N_2 . Si en estas condiciones el agua se mueve

hacia la zona no saturada, una parte del N_2O o del N_2 se pierde por degasamiento en el suelo. La denitrificación se ha observado en numerosos estudios de sistemas de suelo en el laboratorio y en el campo. Bajo condiciones reductoras la materia orgánica decaerá a amoníaco. Por ejemplo, los efluentes de fosas sépticas normalmente tienen altas concentraciones de amoníaco y poco de nitrato. Si el agua subterránea a la que se descargan tiene condiciones reductoras, el nitrógeno permanecerá en forma de amoníaco. Si, por el contrario prevalecen condiciones oxidantes, las bacterias convertirán el amoníaco a nitrato. Este proceso aunque es posible que se desarrolle en el agua subterránea, se realiza en condiciones no favorables debido a la ausencia de materia orgánica adecuada para el crecimiento de las bacterias denitrificantes. Además el tipo de suelo, la velocidad de descarga de los efluentes y el espesor de la zona no saturada influyen en las transformaciones de las especies del nitrógeno y por lo tanto en la calidad del agua subterránea.

El nitrógeno se presenta en la naturaleza en forma de dos isótopos ^{14}N y ^{15}N . El ^{14}N es el más abundante de los dos en la atmósfera. Por medio de la relación $^{15}N/^{14}N$ en los nitratos es posible distinguir si éste procede de residuos humanos y animales o de fertilizantes minerales. La relación $^{15}N/^{14}N$ se expresa comúnmente como el valor $\delta^{15}N$, que se define por:

$$\delta^{15}N (\text{‰}) = \frac{(^{15}N/^{14}N)_{\text{muestra}} - (^{15}N/^{14}N)_{\text{estándar}}}{(^{15}N/^{14}N)_{\text{estándar}}} \times 1000$$

donde ‰ significa partes por mil. Si el valor de $\delta^{15}N$ es positivo, entonces el nitrato de la muestra ha sido enriquecido en ^{15}N respecto al estándar. Para el nitrógeno el estándar es la composición atmosférica. El nitrato procedente de residuos animales y humanos generalmente tiene un $\delta^{15}N$ en exceso de + 10 ‰. Los valores de $\delta^{15}N$ para nitratos

procedentes de fertilizantes minerales se espera que sean inferiores a aquellos de residuos animales. Sin embargo, la interpretación debe ser cuidadosa ya que puede ocurrir fraccionación isotópica debido a procesos de transformación del nitrógeno. Los procesos que afectan la composición isotópica de los nitratos en las aguas subterráneas incluyen la denitrificación y la mezcla de aguas.

Los contenidos excesivos de nitrato en el agua potable en concentraciones mayores de 45 mg/L son capaces de ocasionar metahemoglobinemia en los niños pequeños. Es por ello que la concentración máxima permisible en el agua potable en México es de 5 mg/l como N de NO_3^- . La metahemoglobinemia es una condición en la cual se reduce la capacidad de los glóbulos rojos para acarrear el oxígeno. Esta afectación es causada por los nitritos que se forman por reducción de los nitratos generalmente a través de la acción microbiana dentro o fuera del organismo. La persona intoxicada toma una coloración azul debido a la reducción del oxígeno en la sangre. La población de mayor riesgo la constituyen los niños menores a 6 meses de edad.

CICLO DEL FIERRO

1. Aspectos Generales

El hierro es un elemento abundante y ampliamente distribuido en rocas y suelos. En forma de Fe_2O_3 constituye el 1.5 % de la corteza continental y como FeO el 3.5%.

Los minerales de rocas ígneas con contenidos de hierro relativamente altos incluyen los piroxenos, anfíboles, biotita, magnetita y olivino. En la mayoría de ellos el hierro se encuentra en forma ferrosa con grado de oxidación (II+). Cuando estos minerales son atacados por el agua, el hierro puede disolverse y generalmente se reprecipita como especies sedimentarias. Bajo condiciones reductoras cuando existe azufre disponible se

puede formar polisulfuros ferrosos como pirita o marcasita. Cuando el azufre es menos abundante puede formarse la siderita. En medios oxidantes las especies sedimentarias del hierro son los óxidos u oxihidróxidos como hematita o goetita. El hierro recién precipitado se presenta como hidróxido férrico con una estructura poco cristalina.

La disponibilidad del hierro para pasar a la solución acuosa está afectada fuertemente por las condiciones ambientales, especialmente por cambios en el grado o intensidad de las reacciones de oxidación o reducción. Se pueden presentar altas concentraciones de hierro ferroso disuelto en lugares donde se produzca la reducción de oxihidróxidos ferrosos o la oxidación de sulfuros ferrosos.

El hierro está presente en los residuos orgánicos en los suelos. En los procesos de oxidación y reducción del hierro juegan un papel muy importante los microorganismos, algunos de los cuales usan estas reacciones como fuentes de energía.

2. El Hierro en las Aguas Subterráneas

El diagrama potencial-pH para el Fe en las aguas subterráneas es uno de los más importantes y estudiados. En el rango típico de pH de los sistemas acuíferos el $\text{Fe}(\text{OH})_3$ precipitado es termodinámicamente estable a potenciales moderados o altos. La principal especie disuelta es el Fe(II). Arriba de pH 9.5 el monihidróxido ferroso FeOH^+ puede ser la forma predominante del Fe (II). Arriba de pH 11 los aniones $\text{Fe}(\text{OH})_3^-$ o HFeO_2^- pueden existir en el agua en concentraciones apreciables, aunque este valor de pH es muy raro en el agua subterránea. El par iónico FeSO_4 puede ser importante en soluciones conteniendo unos cuantos miligramos de sulfato por litro. Muchas moléculas orgánicas complejan al hierro ferroso, y los complejos formados pueden ser muchos más resistentes a la oxidación que los iones ferrosos libres. Cuando las aguas contienen cantidades apreciables de carbono

inorgánico y azufre a bajos valores de Eh se favorece la formación de FeCO_3 y FeS_2 que precipitan. La solubilidad del Fe puede cambiar de manera importante ante pequeñas modificaciones en el pH o el Eh del agua.

El hierro férrico puede presentarse en soluciones ácidas como Fe^{3+} , FeOH^{2+} y $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ la forma predominante y la concentración dependen del pH

El ión férrico forma complejos con sustancias orgánicas y con los iones Cl^- , F^- , SO_4^{2-} y PO_4^{3-} . Aunque generalmente los complejos orgánicos son los más importantes. El hierro férrico asociado con coloides orgánicos o material tipo húmico da a algunas aguas un color amarillo o café. Otro efecto de la materia orgánica es la reducción del ión férrico a ferroso.

Las superficies del óxi-hidróxido férrico tienen una gran capacidad de adsorción que puede afectar la concentración de constituyentes menores en aguas en las que se presente este tipo de material. En tales condiciones pueden ocurrir procesos redox de coprecipitación que controlen la solubilidad de otros metales en solución. Este proceso puede reducir la concentración de metales tóxicos en el agua y utilizarse como un método de tratamiento de las aguas naturales.

La presencia de bacterias puede aumentar o disminuir la concentración de Fe disuelto.

3. Diagrama de Predominio de Especies para el Hierro

El comportamiento químico del hierro puede predecirse teóricamente como función del pH, Eh y actividad de otros iones en solución. El diagrama Eh-pH del hierro es una gráfica bidimensional en la cual el pH se grafica en la absisa y el potencial redox en la ordenada. La aplicación de la ley de Nernst y de balances de masas permite expresar las relaciones entre las especies químicas presentes como puntos o líneas en el diagrama.

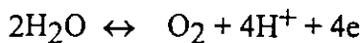
Este tipo de diagramas potencial-pH fue desarrollado por Pourbaix en Bélgica en años anteriores a la segunda Guerra Mundial. Aunque se trata de un diagrama teórico, las predicciones respecto al comportamiento del hierro se ajustan bastante a su comportamiento real.

Para la construcción de este diagrama se asumen condiciones estándar (25 °C y 1 atmósfera) y se realizan los cálculos en función de actividades.

El rango de condiciones esperadas en los sistemas acuosos está limitado obviamente por el dominio de estabilidad Eh-pH del agua.

Los límites del diagrama están dados por las reacciones de oxidación y de reducción del agua.

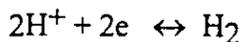
El agua se oxida según la reacción:



Para la cual la ley de Nernst será:

$$E = 1.23 + (0.06/4) \log p\text{O}_2 [\text{H}^+]^4 = 1.23 - 0.06\text{pH}$$

El agua se reduce según la reacción:



Para la cual:

$$E = 0.00 + (0.06/2) \log \frac{[\text{H}^+]^2}{p\text{H}_2}$$

$$E = -0.06 \text{ pH}$$

El diagrama Eh-pH para el hierro considerando la formación de hidróxidos, para una concentración de $Fe(III)=Fe(II) = 10^{-6}M$, se elaboraría como se explica a continuación. Las actividades de las fases sólidas y del agua se consideran igual a 1.

$$Fe^{3+}/Fe^{2+} = 0.78V$$

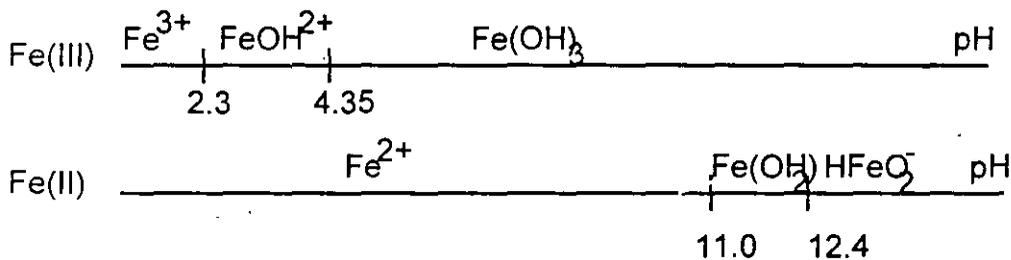
$$K_{eq} = 10^{-2.3} = [FeOH^{2+}] [H^+]/[Fe^{3+}] \quad \text{para } Fe^{3+} + H_2O \leftrightarrow FeOH^{2+} + H^+$$

$$K_{eq} = 10^{-3.4} = [Fe(OH)_2^+] [H^+]/[Fe(OH)^{2+}] \quad \text{para } FeOH^{2+} + H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_2^+ + H^+$$

$$pK_s Fe(OH)_2 = 15.1$$

$$K_{eq} = 10^{-31.58} = [HFeO_2^-] [H^+]^3 / [Fe^{2+}] \quad \text{para } Fe^{2+} + 2H_2O \leftrightarrow HFeO_2^- + 3H^+$$

Por facilidad se puede iniciar la construcción del diagrama especificando las especies de Fe^{2+} y de Fe^{3+} en los diversos rangos de pH:



Evolución del sistema Fe(III)/Fe(II) en función del pH

Para $pH < 2.3$:

El sistema es independiente del pH. El potencial es igual a 0.77V

Para $2.3 < pH < 4.3$:

El sistema $FeOH^{2+}/Fe^{2+}$ depende del pH según

$$FeOH^{2+} + H^+ + e \leftrightarrow Fe^{2+} + H_2O \quad E = 0.91 - 0.06pH + 0.061 \log \frac{[FeOH^{2+}]}{[Fe^{2+}]}$$

Para $4.3 < \text{pH} < 11.0$:

El sistema $\text{Fe}(\text{OH})_3/\text{Fe}^{2+}$ es función del pH según



Para $\text{pH} > 12.4$:

El sistema $\text{Fe}(\text{OH})_3/\text{HFeO}_2^-$ es independiente del pH según



Para construir el diagrama Eh-pH con base en estas reacciones y ecuaciones se dibujan las líneas correspondientes y se delimitan de esta manera los campos de estabilidad de cada una de las especies químicas (Figura 3). Para interpretar el diagrama, la ubicación del punto que corresponda para ciertos valores de pH y Eh definirá la forma química predominante en la que se encuentra el Fe en el agua.

4. *Papel de las Bacterias en la Precipitación del Hierro*

Termodinámicamente las bacterias pueden influir el comportamiento del hierro en el agua por los siguientes procesos:

Procesos en los cuales las bacterias ejercen un efecto catalítico para acelerar las reacciones que son termodinámicamente favorables pero que ocurrirían muy lentamente en ausencia de las mismas. En este tipo de procesos participan bacterias tales como *Gallionella*, *Crenothrix* y *Peptothrix* que oxidan el hierro ferroso. Estos géneros requieren oxígeno, por lo tanto viven en ambientes en los que el hierro ferroso es inestable.

Procesos que requieren la contribución de energía de otra fuente para alterar el status del hierro y pueden ser promovidos por las bacterias que consumen alguna otra sustancia como fuente de energía.

Además, las bacterias oxidantes del azufre es muy importante tienen un papel muy importante en la producción del drenaje ácido de minas, que involucra la disolución del hierro a través de la aceleración de la reacción de oxidación de minerales tales como pirita y arsenopirita.

REFERENCIAS

Alpers C.N., Blowes D.W., 1994, Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation, ACS Symposium Series, Washington D.C.

Andres A.S., 1993, Nitrate contamination of Ground and Surface Watersm Coastal Sussex County, Delaware, Hydrological Science and technology, AIH, 9pp 106-128.

Armienta M.A., 1988, La Contaminación de las Aguas Subterráneas, Comunicaciones Técnicas IGF, UNAM, Serie Investigación No. 76, 40 pp.

Chapelle F.H. and D.R. Lovley, 1992, Competitive Exclusion of Sulfate Reduction by Fe(III)-Reducing Bacteria: a Mechanism for Producing Discrete zones of High-Iron Ground Water, Groundwater, 30, pp 29-36.

Cherry J.A., 1984, Groundwater Contamination, MAC Short Course Handbook 10, Ed. M. A. Fleet Cap. 11 pp 269-306.

Cherry J.A., R.W. Gillham and J.F. Barker, 1984, contaminants in Groundwater: Chemical Processes, en: Studies in Geophysics, Groundwater Contamination, National Academy Press, Washington D.C., pp 46-64.

Drever J.I., 1982, The Geochemistry of natural Waters, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J., 388 pp.

Fetter C.W., 1993, Contaminant Hydrogeology, Macmillan Publ. Co., NY.

Foster S.S.D., 1989, Diffuse Pollution of groundwater by Agriculture-Lessons learnt and Future Prospects, in: J.E. Moore, A.A. Zaporozec, S.C. Csallany and T. C. Varney (eds.) Recent Advances in Groundwater Hydrology, AIH, pp 185-194.

Freeze R.A., J.A. Cherry, 1979, Groundwater, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 604 pp.

Garrels R.M. and C.L. Christ, 1965, *Solutions, Minerals and Equilibria*, Harper & Row, N.Y., 450 pp.

Garrels R.M., 1976, A survey of low Temperature Water-Mineral Relations, en: *Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater hydrology*. Proceedings of and Advisory group Meeting, Vienna, Austria, 27-31 Junio, 1975, AIEA.

Gillham R.W. and L.R. Webber, 1969, Nitrogen Contamination of Groundwater by Barnyard Leachates, *Journal WPCF*, pp 1752-1762.

Gillham R.W. and J.A. Cherry, 1978, Field Evidence of denitrification in Shallow Groundwater flow Systems, *Water Poll. Res. Canada*, 13, pp 53-70.

Gshwend P. M. and M.D. Reynolds, 1987, Monodisperse Ferrous Phosphate colloids in and Anoxic Groundwater Plume, *J. of Contaminant Hydrology*, 1, pp 309-327.

Hem J.D., 1992, *Study and Interpretation of the chemical Characteristics of Natural Water*, Geological Survey Water Supply Paper 2254, Washington D.C., 264 pp.

Hiscock K.M., Dennis P.F., Feast N.A., Fairbairn J.D., 1997, Experience in the use of stable nitrogen isotopes to distinguish groundwater contamination from leaking sewers in urban areas, En: *Groundwater in the Urban Environment*, Chilton et al.s (eds), Balkema, Rotterdam, p 427-432.

Lloyd J.W., J.A. Heathcote, 1985, *Natural Inorganic hydrochemistry in relation to groundwater*, Clarendon Press Oxford, n.Y., 296 pp.

Mariotti A., 1986, La dénitrification dans les eaux Souterraines, Principes et Méthodes de son identification: Une Revue, *J. of Hydrology*, 88, pp 1-23.

Mariotti A., 1998, Nitrate: un polluant de longue durée, *Pour la Science*, 249, p 60-65.

Pankow J.F., 1991, *Aquatic Chemistry Concepts*, Lewis Publishers, Chelsea, 683 pp.

Riversa C.N., Barrett M.H., Hiscock K.M., Dennis P.F., Feast N.A., Lerner D.N., 1996, Use of nitrogen isotopes to identify nitrogen contamination of the Serwood sandstone aquifer beneath the city of Nottingham, United Kingdom, *Hydrogeology Journal*, 4, 1996.

Snoeyink V.L., D. Jenkins, 1987, *Química del Agua*, Limusa, México D.F., 508 pp.

Stumm W. and J.J. Morgan, 1981, *Aquatic Chemistry*, John Wiley & Sons, N.Y., 780 pp.

Thornton I., 1983, *Applied Environmental Geochemistry*, Academic Press, N.Y., 501 pp.

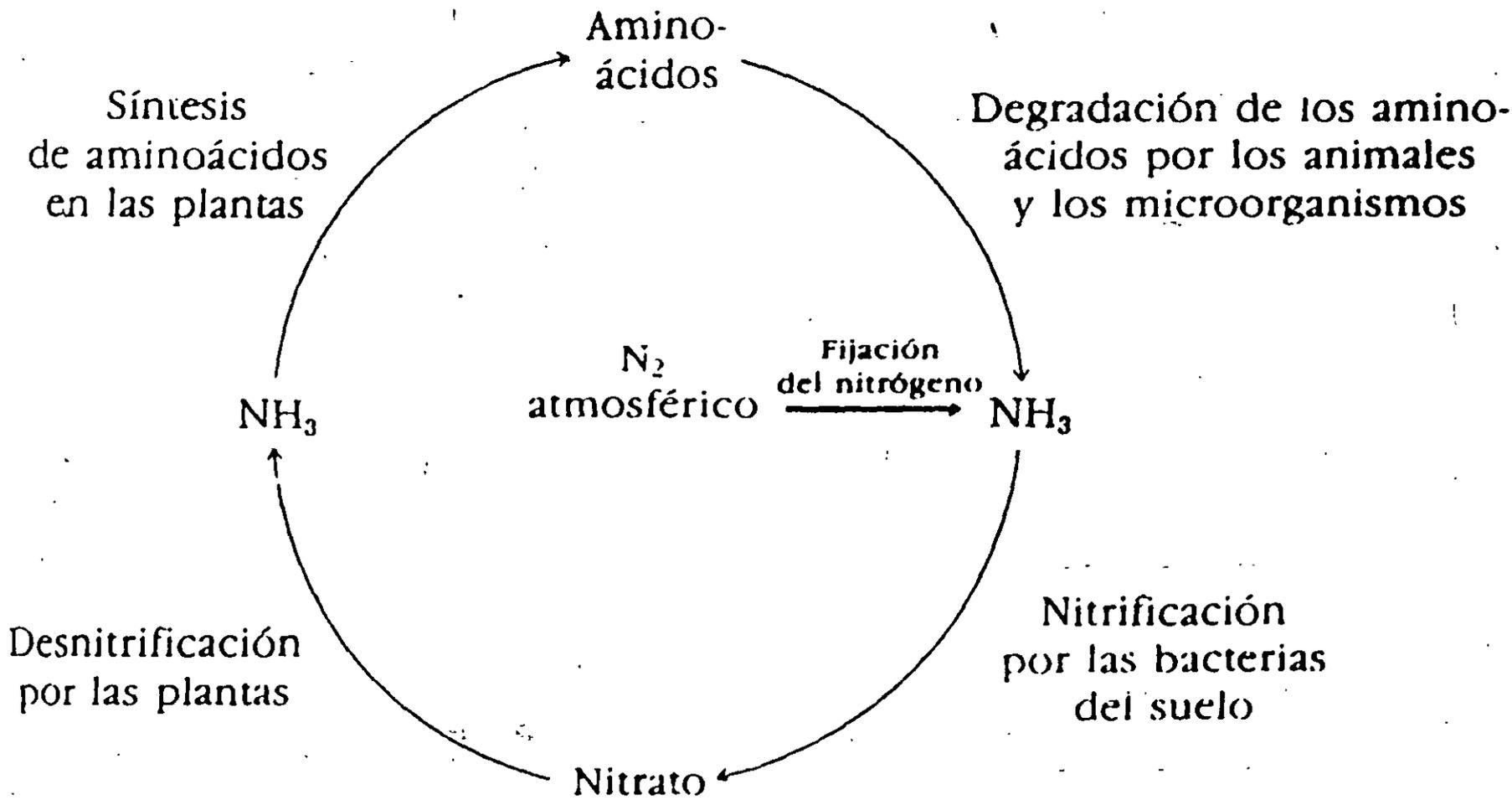


Figura 1

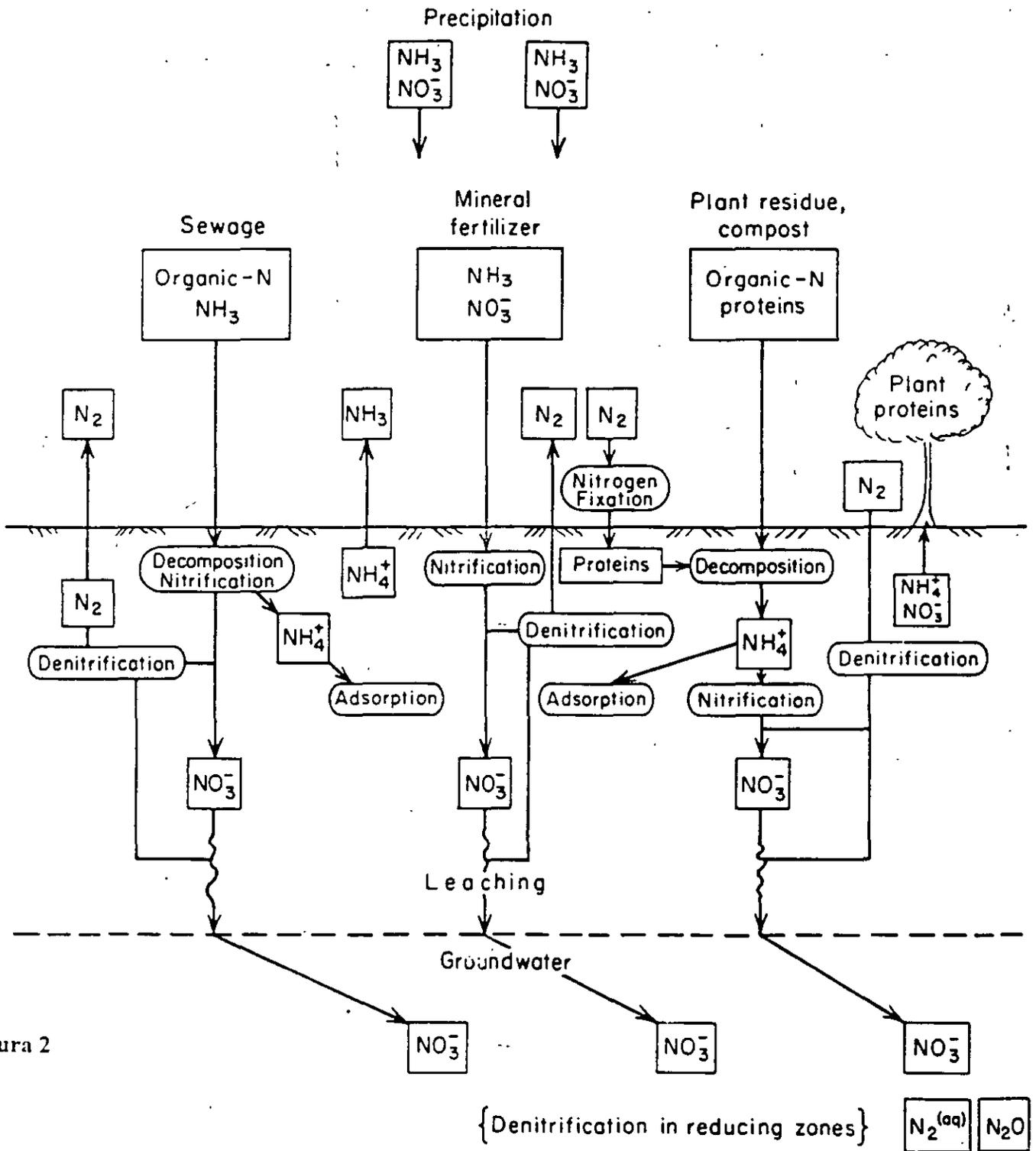
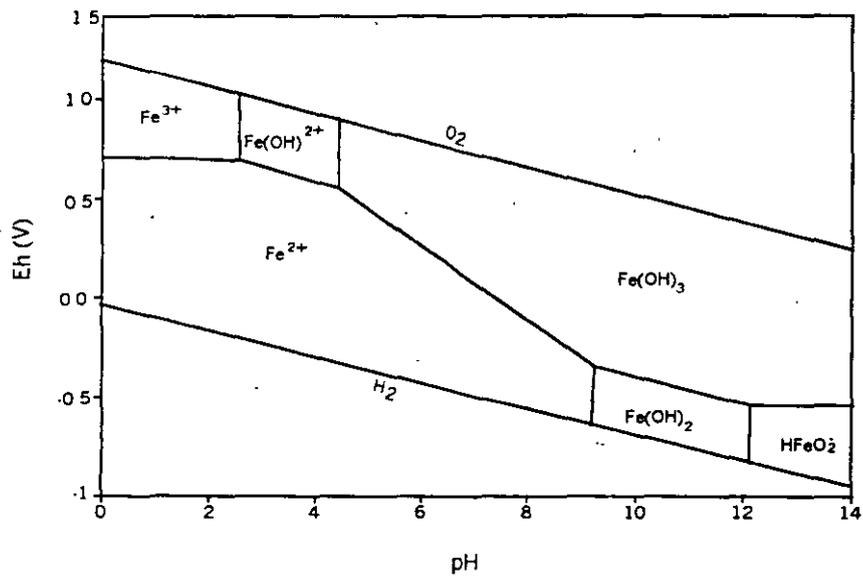


Figura 2





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

TEMA :

RELLENOS SANITARIOS

**ING. HERIBERTO BARCENAS RAMÍREZ
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE - OCTUBRE 1999**

División de Educación Continua
Facultad de Ingeniería
U.N.A.M.

XI CURSO INTERNACIONAL
DE CONTAMINACIÓN DE
ACUÍFEROS

TEMA:
RELLENOS SANITARIOS

Responsable:
Ing. Heriberto Bárcenas Ramírez
INGENIERÍA PARA EL CONTROL DE RESIDUOS MUNICIPALES E
INDUSTRIALES, S.A. DE C.V.

30 de septiembre 1999

México, D.F.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. ANTECEDENTES.....	7
2.1 DEFINICIÓN E HISTORIA DEL RELLENO SANITARIO.....	7
2.2 EL RELLENO SANITARIO EN LOS SISTEMAS DE MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES.....	7
2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL RELLENO SANITARIO.....	9
2.3.1 Ventajas	9
2.3.2 Desventajas:	10
3. PROBLEMÁTICA DE LA DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES.....	12
3.1 CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	13
3.2 CONTAMINACIÓN DEL AIRE	14
3.3 RIESGOS A LA SALUD DE LA POBLACIÓN.....	16
4. PRINCIPIOS BÁSICOS Y MÉTODOS DE OPERACIÓN.....	17
4.1 MÉTODOS PARA CONSTRUIR Y OPERAR UN RELLENO SANITARIO.....	17
4.1.1 Método de Trinchera o Celda Excavada.....	18
4.1.2 Método de Área	20
4.1.3 Método de Rampa	20
4.2 REACCIONES QUE OCURREN EN EL RELLENO SANITARIO.....	23
4.2.1 Reacciones Biológicas.....	23
4.2.2 Reacciones Químicas.....	23
4.2.3 Reacciones Físicas	24
5. METODOLOGÍA PARA LA INSTALACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO.....	25
6. SELECCIÓN DEL SITIO PARA EL RELLENO SANITARIO.....	27
6.1 METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DEL SITIO.....	28
6.2 IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE ZONAS DE ESTUDIO.....	28
6.3 IDENTIFICACIÓN DE SITIOS POTENCIALES.....	29
6.4 EVALUACIÓN Y CRIBADO DE LOS SITIOS POTENCIALES.....	29
6.5 SELECCIÓN FINAL DEL SITIO.....	30
7. DISEÑO DE RELLENOS SANITARIOS.....	35
7.1 METAS BÁSICAS DEL RELLENO SANITARIO.....	35
7.2 CONSIDERACIONES DEL USO FINAL DEL SITIO.....	35
7.3 PASOS PARA EL DISEÑO DE UN RELLENO SANITARIO.....	35
8. PROCEDIMIENTOS DE DISPOSICIÓN DE RESIDUOS.....	39
8.1 REVISIÓN DEL PLAN DE RELLENO	39
8.2 CONTROL DE ACCESO Y OPERACIÓN DE BÁSCULA.....	40
8.2.1 Detección de residuos prohibidos	41
8.2.2 Irregularidades en los vehículos.....	42
8.2.3 Control de Tráfico	42
8.2.4 Recepción de Residuos.....	44
8.3 PRACTICAS DE DISPOSICIÓN DE RESIDUOS.....	45
8.3.1 Construcción de celda.....	46
8.3.2 Cobertura	52
8.3.3 Prácticas de operación recomendables	53

8.3.4 <i>Uso Efectivo de Maquinaria</i>	55
9. PROCEDIMIENTOS DE CONTROL DE ASENTAMIENTOS LIXIVIADOS Y BIOGAS.	59
9.1 PROCESOS DE DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS	59
9.1.1 <i>Velocidad de la descomposición</i>	60
9.2 HUNDIMIENTOS Y ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES.	60
9.2.1 <i>Hundimientos</i>	60
9.2.2 <i>Asentamientos diferenciales</i>	61
9.2.3 <i>Control de asentamientos</i>	62
9.2.4 <i>Identificación de la presencia de asentamientos</i>	62
9.3 MANEJO DE LIXIVIADOS.	62
9.3.1 <i>Migración de Lixiviados</i>	63
9.4 MANEJO DEL BIOGÁS.....	72
9.4.1 <i>Biogás</i>	73

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población que ha experimentado en las últimas décadas las principales ciudades de Latinoamérica, debido a la concentración de actividades económicas e industriales, ha propiciado una fuerte demanda de los servicios públicos, rebasando la capacidad de las autoridades para la prestación de éstos con la cantidad y calidad que se requiere. Uno de los servicios que se ve seriamente afectado por el crecimiento urbano, es el Servicio de Aseo Urbano, el cual está integrado por la recolección, barrido, transferencia, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos municipales.

La disposición final de los residuos sólidos es la última etapa del Sistema de Aseo Urbano de cualquier ciudad y está íntimamente relacionada con la preservación del ambiente, así como con la salud de la población, por lo que se le debe tratar y controlar mediante un sistema adecuado que minimice los impactos negativos hacia el entorno ecológico.

No obstante, que se tiene plena consciencia de la importancia que reviste el mantener una adecuada disposición final de los residuos sólidos municipales, en la actualidad aún prevalece la práctica del "tiradero a cielo abierto" en la mayoría de las ciudades de nuestro país. Tal práctica consiste en el depósito incontrolado de residuos sólidos directamente en el suelo, estimulando la contaminación del aire, agua y suelo, así como generando problemas de salud pública y marginación social, restringiéndose este último aspecto a los individuos dedicados a la "pepena" de subproductos con cierto valor intrínseco.

Dentro de las alternativas viables para la disposición final de los residuos sólidos municipales, y conforme a las condiciones actuales de los países latinoamericanos, se cuenta con el método de relleno sanitario

El relleno sanitario, como ya se mencionó, es el método empleado para la correcta disposición de los residuos sólidos, por lo que como toda obra de ingeniería éste tiene que ser planeado y diseñado previamente para asegurar su correcta construcción y operación.

Históricamente, a nivel mundial, el relleno sanitario ha sido el método más aceptado desde un punto de vista económico para la disposición a largo plazo de los residuos sólidos generados por las comunidades humanas. Aún con la implementación de los sistemas de prevención de la generación de residuos, el

reciclaje o los sistemas de procesamiento, ha permanecido el relleno sanitario como un componente imprescindible de los sistemas de Manejo de Residuos Sólidos Municipales.

Por lo anterior, se puede decir que el relleno sanitario, constituye el componente de mayor relevancia dentro dichos sistemas en cualquier ciudad. Y precisamente debido a esto, en la práctica se ha logrado un desarrollo impresionante en la ingeniería aplicada a este tipo de instalaciones, durante las dos últimas décadas en los países desarrollados, debido a la fuerte reglamentación ambiental que se ha establecido en dichos países.

Ahora bien, actualmente se plantea la necesidad de implantar sistemas alternos que absorban los volúmenes crecientes de residuos, desplazando el uso del relleno sanitario por considerarlo riesgo para el ambiente. Sin embargo, la experiencia en el mundo ha demostrado que el relleno sanitario forma parte integrante de las soluciones alternativas planteadas, dado que siempre habrá que hacer algo con aquellos residuos que no pueden ser reciclados y/o que no tienen un uso específico. De la misma manera, los materiales residuales que permanecen después que los residuos sólidos han sido sometidos a un proceso de separación en una Instalación para la Separación de Materiales (MRF, por sus siglas en inglés) o sometidos a un proceso de conversión de productos o energía, deben contar con un sitio de disposición final para su confinamiento.

Dada la importancia que reviste la adecuada disposición final de los residuos sólidos municipales en el control y preservación de la contaminación de los acuíferos, se ha considerado pertinente incorporar el conocimiento del sistema de relleno sanitario como una parte esencial para asegurar la no afectación de los cuerpos de agua subterráneos, por el depósito de los residuos de tipo municipal.

2. ANTECEDENTES

2.1 Definición e Historia del Relleno Sanitario.

La disposición final de los residuos sólidos ha sido practicada por varios siglos. En realidad, hace 2000 años los griegos enterraban sus residuos sólidos sin compactar. En 1930, en la ciudad de Nueva York y Fresno, California, iniciaron la compactación de los residuos con equipo pesado y cubriéndolos, así el término de "Relleno Sanitario" fue inventado.

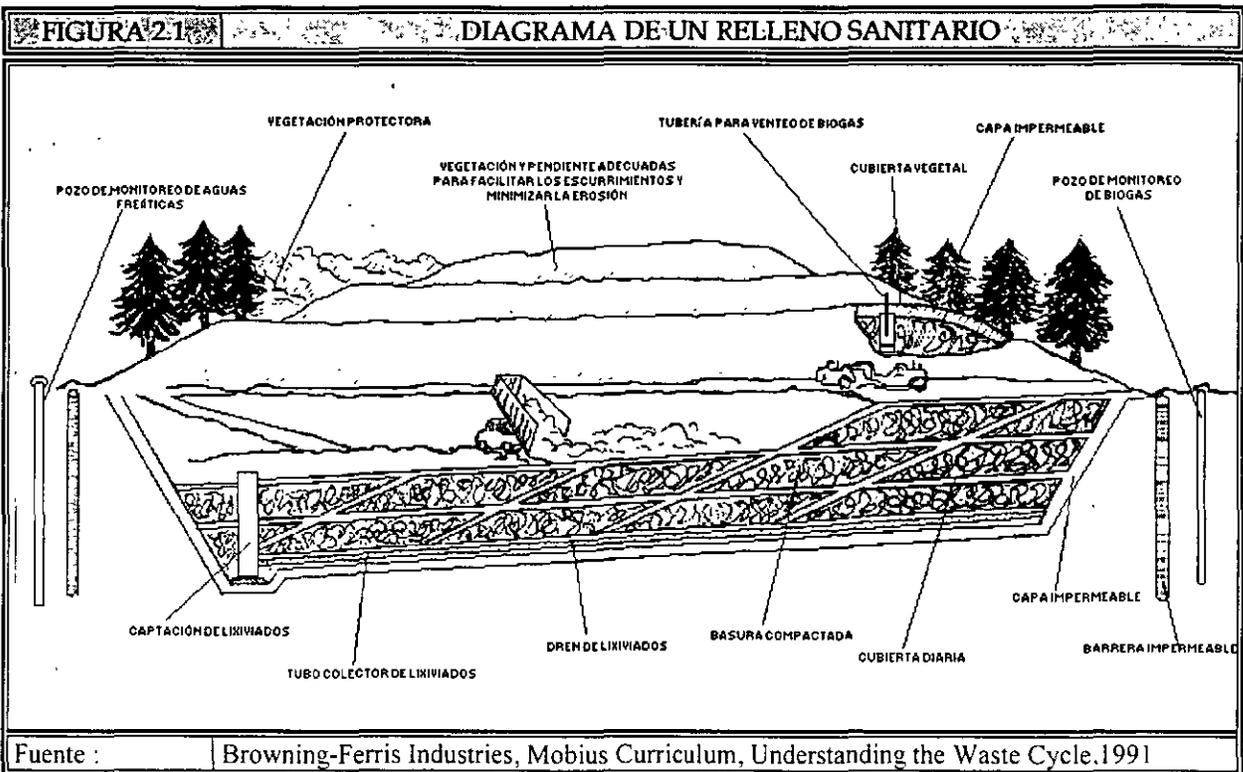
Un relleno sanitario, es tradicionalmente definido como un método de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos en el suelo, de tal manera que proteja el ambiente, mediante el extendido de los residuos en capas delgadas, compactándolas al menor volumen posible y cubriéndolas con tierra al término de cada día de trabajo.

El relleno sanitario es la instalación física usada para la disposición final de los residuos sólidos municipales sobre la superficie del suelo. En el pasado, el término de relleno sanitario fue usado para denotar simplemente el sitio en el cual los residuos eran depositados en el suelo y cubiertos al final de cada día de operación. En la actualidad, el relleno sanitario se refiere a una instalación ingenieril para la disposición de los residuos sólidos municipales, diseñada y operada para minimizar los impactos a la salud pública y al ambiente. Actualmente, el relleno sanitario moderno cuenta con elementos de control lo suficientemente seguros y modernos y su éxito radica en el adecuado diseño y por su puesto en una óptima operación.

En la Figura 2.1, se ilustran un diagrama de un Sistema de Relleno Sanitario con sus diferentes componentes.

2.2 El Relleno Sanitario en los Sistemas de Manejo de Residuos Sólidos Municipales.

La disposición final de residuos sólidos segura y confiable a largo plazo, debe ser un componente importante del Manejo Integral de Residuos Sólidos. Ya que estos últimos se consideran como los materiales que ya no tienen un uso y que no pueden ser recuperados para los sistemas productivos.



Cuando se evalúa la utilidad de cada uno de los elementos funcionales, así como la efectividad y economía de todas las interfaces y conexiones entre esos diferentes elementos, se puede desarrollar un Sistema de Manejo Integral de Residuos. En este contexto, dicho sistema, puede definirse como la selección y aplicación de técnicas, tecnologías y programas de manejo factibles, con la finalidad de alcanzar objetivos y metas específicas para el manejo de residuos. Debido a la legislación que se está adoptando, el Manejo Integral de Residuos Sólidos, también está desarrollándose en respuesta a los cambios e implementación de las leyes, los reglamentos y las normas.

También se ha establecido una jerarquización de actividades para el manejo de residuos, en la legislación de diferentes países.

La jerarquización (arreglo en orden de importancia), se puede utilizar para establecer la prioridad de las acciones para implementar los programas de manejo de residuos. La jerarquización del Manejo Integral de Residuos Sólidos más comúnmente adoptada por los países desarrollados y coincidentemente la que recomienda la U.S. Environmental Protection Agency (EPA), está compuesta por los siguientes elementos: reducción en la fuente, reciclaje, combustión y

relleno sanitario, que en otros casos, se modifica de la siguiente manera: reducción en la fuente, reciclaje, transformación o tratamiento y relleno sanitario.

De cualquier forma, los diferentes elementos del Manejo Integral de Residuos Sólidos deben estar siempre interrelacionados en cualquier programa o sistema y haber sido seleccionados para complementarse unos a otros.

El desarrollo e implementación de un plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos consiste en la selección de la mezcla adecuada de tecnologías y alternativas para satisfacer las cambiantes necesidades locales de manejo de residuos al mismo tiempo que se cumple con los ordenamientos legales.

Al final, algo se debe hacer con (1) los residuos sólidos que no pueden ser reciclados y no pueden tener un uso futuro; (2) los materiales residuales que permanecen después que los residuos sólidos han sido sometidos a un proceso de separación en una Instalación para la Separación de Materiales (MRF, por sus siglas en inglés); y (3) los materiales residuales que permanecen después que los residuos sólidos han sido sometidos a un proceso de conversión de productos o energía.

Existen solamente dos alternativas disponibles para el manejo a largo plazo de los residuos sólidos o materiales residuales: disposición sobre o en el manto térreo y disposición en el fondo del océano. El relleno sanitario, cuarto nivel de la clasificación del Manejo Integral de Residuos Sólidos, involucra la disposición controlada de los residuos sobre o en el manto térreo y es por mucho el método más común de disposición de residuos. El relleno sanitario se encuentra en el nivel más bajo de la jerarquización del Manejo Integral de los Residuos Sólidos, porque representa el último medio deseable para manejar los residuos de la sociedad (Tchobanoglous G., 1993)

2.3 Ventajas y Desventajas del Relleno Sanitario.

2.3.1 Ventajas.

- ◆ *El relleno sanitario como uno de los métodos de disposición final de los residuos sólidos municipales, es la alternativa más económica; sin embargo, no hay que olvidar que es necesario asignar recursos financieros y técnicos suficientes para la planeación, diseño, construcción y operación.*

- ◆ *La inversión inicial de capital es inferior a la que se necesita para la implementación de un sistema de tratamiento tal como la separación, composteo o incineración.*
- ◆ *Cuando se dispone de material para la cobertura de los residuos sólidos en el mismo sitio, esta condición es generalmente la más económica de las diferentes opciones para la disposición final.*
- ◆ *El relleno sanitario es un método final para la disposición de los residuos sólidos, que no requiere de operaciones adicionales, tal como el caso de la incineración o el composteo, los cuales requieren un sitio y de operaciones adicionales para la disposición de los productos finales.*
- ◆ *Se recuperan terrenos antes considerados como improductivos o marginales transformándolos en áreas útiles para la creación de parques, zonas recreativas y esparcimiento, o simplemente áreas verdes.*
- ◆ *Es un método flexible, dado que en caso de incrementar la cantidad de residuos por disponer se requiere únicamente de muy poco equipo y personal.*
- ◆ *El gas metano generado por la descomposición de la fracción orgánica contenida en los residuos sólidos, puede ser atractivo para su aprovechamiento como fuente de energía no convencional, dependiendo de las características del sitio.*

2.3.2 Desventajas:

- ◆ *La construcción de un relleno sanitario, por la oposición de la población debido a dos aspectos fundamentales: la falta de conocimiento sobre el método de relleno sanitario y la desconfianza en los servidores públicos de la localidad.*
- ◆ *Se requiere de una supervisión permanente para mantener un alto nivel de las operaciones y asegurar que no habrá fallas a futuro.*
- ◆ *Cuando no existen terrenos cercanos a las fuentes de generación de residuos sólidos, debido al crecimiento urbano, el costo de transporte se verá fuertemente afectado.*

- ◆ *La relativa cercanía de los rellenos a las áreas urbanas puede provocar serios problemas de queja pública.*
- ◆ *Existe un alto riesgo, sobre todo en los países del tercer mundo, que por la carencia de recursos económicos para la operación y mantenimiento, se convierta el relleno sanitario en tiradero a cielo abierto.*
- ◆ *Puede presentarse eventualmente la contaminación de aguas subterráneas y superficiales cercanas, así como la generación de olores desagradables y gases, si no se toman las debidas medidas de control y de seguridad.*
- ◆ *Los asentamientos diferenciales que sufren los rellenos sanitarios con respecto al tiempo, impide que estos sean utilizados una vez que se han concluido las operaciones.*

3. PROBLEMÁTICA DE LA DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES.

La disposición final de los residuos sólidos, tradicionalmente, se ha orientado al depósito incontrolado de los mismos, en lugares inapropiados, tales como: barrancas y cauces de ríos, lagos y lagunas, minas abandonadas, zonas pantanosas y áreas geológicamente inestables.

Las causas de la inadecuada disposición final se originan básicamente por las siguientes situaciones:

- Negligencia.
- Insuficiente presupuesto.
- Desconocimiento de las técnicas de disposición final.
- Control del sitio por parte de los diferentes grupos de pepenadores.

Para la instalación de estos sitios, definitivamente, no existe un estudio preliminar, por lo que son creados de manera arbitraria.

La inconsciente disposición final de los residuos sólidos, ha provocado problemas de contaminación del agua, aire y suelo, así como de proliferación de fauna nociva, aspectos que se describen con detalle más adelante. A éstos se adiciona la problemática social de los grupos de pepenadores, primordialmente por las condiciones insalubres en que viven y realizan sus actividades. El temor a perder su única fuente de trabajo, provoca que estos grupos se opongan y desconfíen de cualquier alternativa encaminada a mejorar las técnicas de disposición final y/o a la clausura y saneamiento de los tiraderos a cielo abierto.

Por lo anterior, es de esperarse que la solución a esta situación dentro de la fase del sistema de aseo urbano, deba involucrar acciones de tipo social, porque no hay que olvidar el papel tan importante que juegan dichos grupos en la recuperación de subproductos extraídos de los residuos sólidos, los que constituyen una opción viable bajo otro contexto.

El conocimiento de la dependencia que existe entre los tiraderos, el ambiente y la salud humana, constituye la parte medular para establecer un plan de acción encaminada al control de estos sitios, ya sea mediante su rehabilitación o la clausura y saneamiento definitivo, así como los controles y medidas de mitigación pertinentes para "remediar" los efectos presentes y evitar los que dañen al entorno a futuro.

Por lo anterior, a continuación se señalan los principales problemas que generan los tiraderos a cielo abierto:

3.1 Contaminación del suelo y de las aguas subterráneas

Tomando en consideración que en la mayoría de los casos los sitios a cielo abierto carecen de una cubierta de material (tierra), se propicia un medio altamente permeable que permite la fácil entrada del agua de lluvia a los estratos de residuos que se encuentran en el interior del sitio, provocando con ello la saturación del medio y la percolación hacia el fondo; presentándose, a la vez, en este trayecto la disolución de sustancias y la suspensión de partículas contenidas en los residuos sólidos. Simultáneamente, existen otras sustancias que son solubles al agua y generadas como producto de los procesos de descomposición biológica de la materia orgánica incluida en los residuos sólidos, produciendo finalmente un líquido altamente contaminante conocido como lixiviado.

Los lixiviados pueden migrar hacia las aguas subterráneas o superficiales, lo que está en función de las condiciones topográficas y geohidrológicas del sitio, generando de esta forma la degradación de la calidad de agua, y poniendo en peligro la salud de la población cuando es utilizada como fuente de abastecimiento o para uso recreativo o pecuario.

El riesgo que puede tener el ser humano, radica en la ingestión de la supuestamente agua potable, el contacto directo que tenga con lagos y ríos, y, finalmente, por la bioacumulación de algunas sustancias como los metales pesados (plomo, cadmio, etc.) en peces o cualquier otro organismo de consumo humano que esté en contacto con agua mezclada con lixiviados.

3.2 Contaminación del aire

La disposición de los residuos sólidos a cielo abierto, origina graves problemas a la atmósfera, así como olores desagradables y problemas a la salud de la población circundante a través de los siguientes mecanismos:

- Incendios y/o la quema de residuos sólidos.
- La combustión de biogás.
- Suspensión de polvos y partículas por el viento.

1). Incendios y/o quema de residuos sólidos.

La incineración de diversos materiales combustibles se ocasiona por factores naturales o inducidos. Dentro de los primeros, se cuentan diferentes causas que carecen de respaldos técnicos, tales como:

- El efecto de lupa que pueden provocar los vidrios sobre materiales como cartón y papel o las altas temperaturas en estos, durante días calurosos.
- La presencia de sustancias o materiales de origen industrial que llegan a entrar en combustión, bajo ciertas condiciones de temperatura y humedad.

Y en los segundos, básicamente:

- Las de incendios de los tiraderos a cielo abierto, que son provocados consciente o inconscientemente por los individuos que directamente se hallan involucrados con las actividades realizadas en dichos lugares.

Dentro de las situaciones más comunes que originan incendios, se tienen las siguientes:

- La quema de los residuos sólidos de manera intencional en algunos tiraderos, con la finalidad de aumentar la capacidad volumétrica del sitio y/o controlar de forma errónea la proliferación de roedores e insectos nocivos.

- La quema incontrolada de materiales plásticos que contienen metales de valor comercial, tales como llantas, cables eléctricos, etc., por parte de los pepenadores, o a la práctica de fogatas por éstos mismos, para diversos fines.

2. Combustión de biogás.

Por la degradación biológica a que están sujetos los residuos que se encuentran en estratos bajos, en donde la descomposición de los residuos orgánicos en ausencia de oxígeno (descomposición anaerobia) producen biogás, el cual está constituido por bióxido de carbono y gas metano, así como por ácido sulfhídrico y elementos orgánicos a nivel traza.

Los elementos traza, integrados en el biogás, son los responsables de los olores desagradables que caracterizan a los tiraderos a cielo abierto, además de ser elementos que causan daños potenciales a la salud, cuando el hombre se expone a éstos por tiempo prolongado (inhalación).

Cuando se presentan incendios en los tiraderos, el biogás es el responsable de avivar y mantener el fuego por sus características combustibles; además de hacer más difíciles las labores de control en este tipo de siniestros.

Los mecanismos de transporte del biogás hacia la población colindante, se dan básicamente a través del viento y suelo, en éste último es posible por medio de una migración horizontal, estimulada por las condiciones permeables del piso y las presiones internas que provoca el mismo gas.

Con relación a los efectos respecto al ambiente, se tiene que los componentes del biogás contribuyen al incremento de los siguientes problemas:

- Al deterioro de la capa de ozono que cubre a la tierra.
- Al efecto de invernadero, que consiste en el incremento de la temperatura de la tierra.
- A la lluvia ácida, propiciada por la presencia de ácido sulfhídrico.

Otro efecto importante que contribuye al impacto del aire y causa molestias a la población, es la generación de olores, los cuales son originados por:

- Descomposición de los residuos sólidos.
- Orgánicos volátiles arrastrados por el biogás.
- Animales en estado de descomposición
- Afloramiento y acumulación de lixiviados en proceso de degradación.

3.3 Riesgos a la salud de la población.

Como se mencionó en la sección anterior, las capas inferiores de cualquier tiradero a cielo abierto, son un medio propicio para que exista la generación de biogás, el que se caracteriza por ser un hidrocarburo combustible.

Cuando el gas metano alcanza una concentración del 5 al 15%, se corre el riesgo de explosión o de que se dé la combustión de manera violenta.

A parte de que, en lugares cerrados (casetas de control, viviendas, fosas, alcantarillas etc.) es latente el riesgo de asfixia, ello porque el bióxido de carbono es más pesado que el aire, por lo que este componente desplaza al aire. Ahora bien, los aspectos, antes mencionados, representan un mayor riesgo cuando hay asentamientos humanos en los alrededores al sitio de disposición final.

Dentro de la fauna nociva, que prolifera en los tiraderos a cielo abierto, se consideran dos grupos: roedores e insectos voladores (moscas, mosquitos, etc.) y rastreros (cucarachas).

Los roedores son transmisores de enfermedades mortales, tales como: leptospirosis, la peste bubónica, tifus murino y rabia. Asimismo, dañan la propiedad y contaminan los alimentos.

Los insectos voladores y rastreros, muchas de las veces, son transmisores de gérmenes de enfermedades como la fiebre tifoidea, disentería basilar, amibiasis, encefalitis, entre otros.

4. Principios Básicos y Métodos de Operación.

El relleno sanitario es un método de ingeniería recomendado para la disposición final de los residuos sólidos municipales, por medio del cual los residuos se depositan en el suelo, se esparcen y se compactan al menor volumen posible y se cubren con una capa de tierra al término de las operaciones del día.

La Sociedad Norteamericana de Ingenieros Civiles, ASCE, define: *"Relleno sanitario es una técnica para la disposición de los residuos en el suelo sin causar perjuicios al ambiente y sin causar molestias o peligro para la salud y seguridad pública; este método utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos en la menor área posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable y cubriéndolos con una capa de tierra en la frecuencia necesaria o por lo menos al fin de cada jornada"*.

El objetivo del relleno sanitario es establecer una barrera entre el ambiente y los residuos sólidos, reducir y controlar las emisiones gaseosas y evitar la infiltración y fugas de los líquidos lixiviados que contienen una combinación de microorganismos y sustancias tóxicas producidas durante la descomposición de los residuos. La disposición final de los residuos sólidos en un relleno sanitario contribuye considerablemente a evitar el contacto directo de éstos con el ambiente, se previene el acceso y la proliferación de fauna nociva y los residuos se concentra en un área bien definida que puede ser controlada. El objetivo final de la aplicación de esta técnica es lograr que los residuos no causen ningún efecto nocivo en la salud pública ni en el ambiente.

4.1 Métodos para Construir y Operar un Relleno Sanitario

Los terrenos que se seleccionen para la construcción y operación del relleno sanitario pueden ser planos, ondulados, escarpados, bancos de material de préstamo abandonados o terrenos que presenten una combinación de estas características, siempre y cuando el sitio cumpla con la Normatividad especificada, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales

El procedimiento de construcción y método de relleno sanitario se seleccionará una vez conocido el perfil del terreno disponible, que podrá ser de trinchera, de área y/o una combinación de ambos.

4.1.1 Método de Trinchera o Celda Excavada¹

Este método se utiliza normalmente en terrenos planos, en donde existe un buen espesor de material disponible y el nivel freático se encuentra lo suficientemente profundo para evitar la contaminación del acuífero.

Los residuos sólidos son depositados en celdas o trincheras previamente excavadas, en donde el material, producto de la excavación, es utilizado como material de cubierta diaria y final. El procedimiento consiste en abrir trincheras o celdas a intervalos que sean adecuados para la estabilidad de los taludes y en profundidades de 2 a 3 m, con el apoyo de equipo mecánico; la profundidad de la trinchera o celda estará limitada por la profundidad del nivel de aguas freáticas, la permeabilidad del subsuelo y la dureza del terreno, pudiendo tener en ocasiones hasta 7 m de profundidad.

Los residuos sólidos son depositados en el fondo de la trinchera o celda, se extienden y se compactan con equipo mecánico y posteriormente se cubren con la tierra producto de la excavación, compactándola con el mismo equipo, todo esto en ciclos diarios (ver Figuras 3.1 y 3.2.).

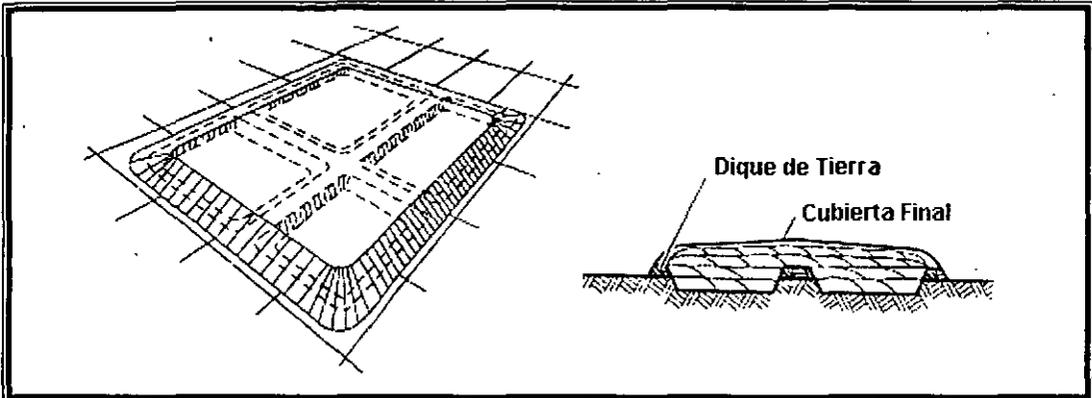
Es importante señalar, que en el pasados este método era concebido exclusivamente como el de trinchera, sin considerar el aprovechamiento de l volumen disponible del nivel del suelo hacia arriba, convirtiéndolo en un método costoso por las extensiones de terreno requerido.

En la actualidad, ante la escasez de terreno y la necesidad de ampliar la vida útil de los rellenos sanitarios, este método considera la utilización integra del espacio disponible de los terrenos, utilizando la variante de la excavación de celdas, la cual se ha vuelto una práctica muy utilizada.

¹ Tchobanoglous G Theisen H and Vigil, S. "Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS. 1993

FIGURA 4.1

MÉTODO DE TRINCHERA O CELDA EXCAVADA

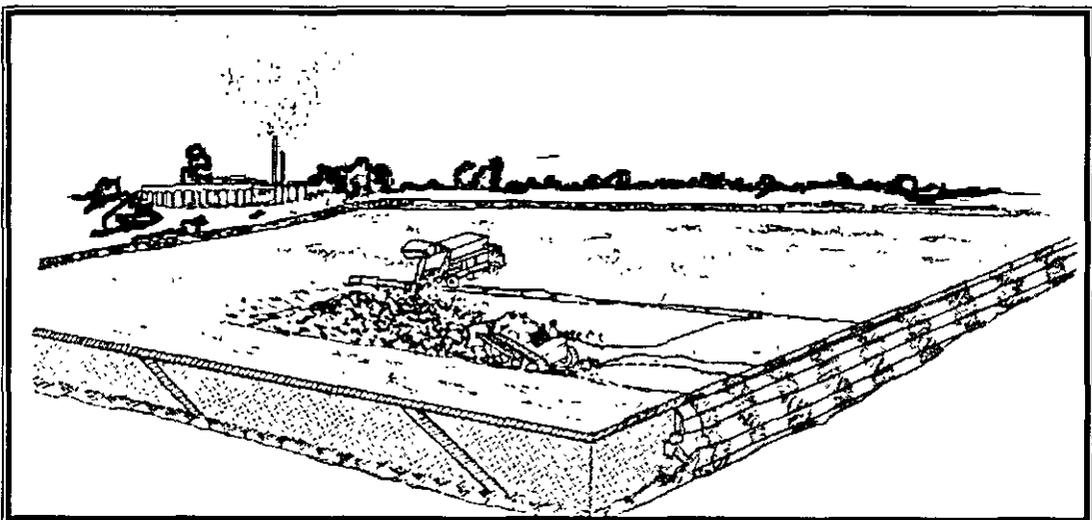


FUENTE

Tchobanoglous G. Theisen H. and Vigil, S., "Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management Issues McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1993

FIGURA 4.2

EJEMPLO DE LA OPERACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO CON EL MÉTODO DE TRINCHERA



FUENTE

Brunne D. and Keller D., Sanitary Landfill Design and Operation ; USEPA, Washington D.C., 1972

4.1.2 Método de Área

Este método de Área se utiliza cuando en el terreno no es posible excavar una trinchera o celda, o cuando el nivel freático se encuentra muy cerca de la superficie del terreno. Un punto importante de este método es que el banco de material para la cubierta, deberá estar en áreas adyacentes o lo más cercano posible al sitio de operación.

El método consiste en depositar los residuos sobre el talud inclinado, se compactan en capas inclinadas para formar la celda que después se cubre con tierra. Las celdas se construyen inicialmente en un extremo del área a rellenar y se avanza hasta terminar en el otro extremo (ver Figura 3.3 y 3.4).

Es importante señalar, que cuando se carece totalmente de bancos de material para la cobertura, existen alternativas de utilización de composta o cubiertas sintéticas móviles, cumpliendo de esta forma con los objetivos del relleno sanitario.

4.1.3 Método de Rampa.

Este método, es considerado como una variante del método de trinchera o de celda excavada y es considerado como el más eficiente ya que permiten ahorrar el transporte del material de cubierta y aumentan la vida útil del relleno. En la Figura 3.5 se presenta un esquema simplificado de la operación de un relleno sanitario utilizando este método.

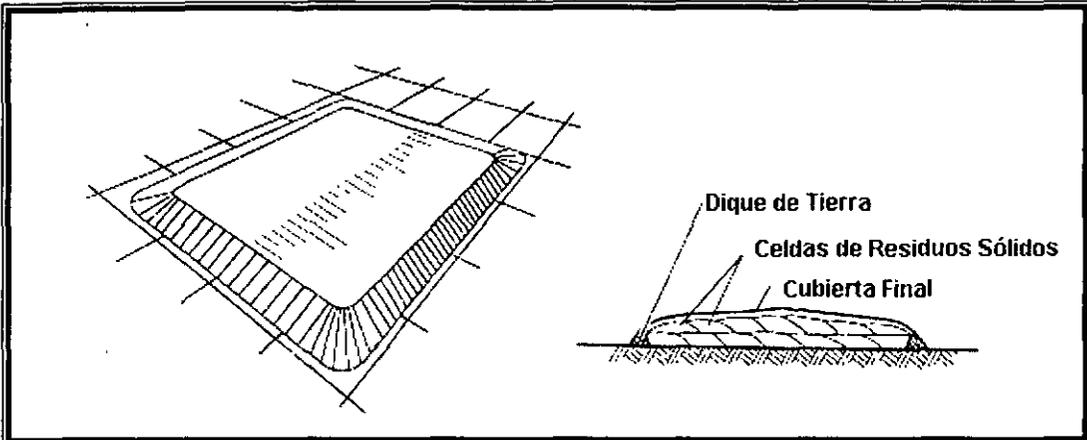
Los residuos son esparcidos y compactados en pendiente. El material de cubierta es obtenido directamente del frente de trabajo y compactado sobre los residuos sólidos conformados. Frecuentemente, una porción de la excavación se almacena para ser utilizado en un futuro en los trabajos de sello final.

La técnica de depósito y compactado de residuos sólidos a través del método de rampa, varía de acuerdo con la geometría del sitio, las características de disponibilidad de material de cubierta, la geohidrología, el sistema de control de biogás y lixiviados y el acceso al sitio.

Esta técnica puede utilizarse en barrancas, desfiladeros, oquedades, etc., por lo que el control de escurrimientos frecuentemente es un factor crítico en el diseño y operación.

FIGURA 4.3

MÉTODO DE AREA

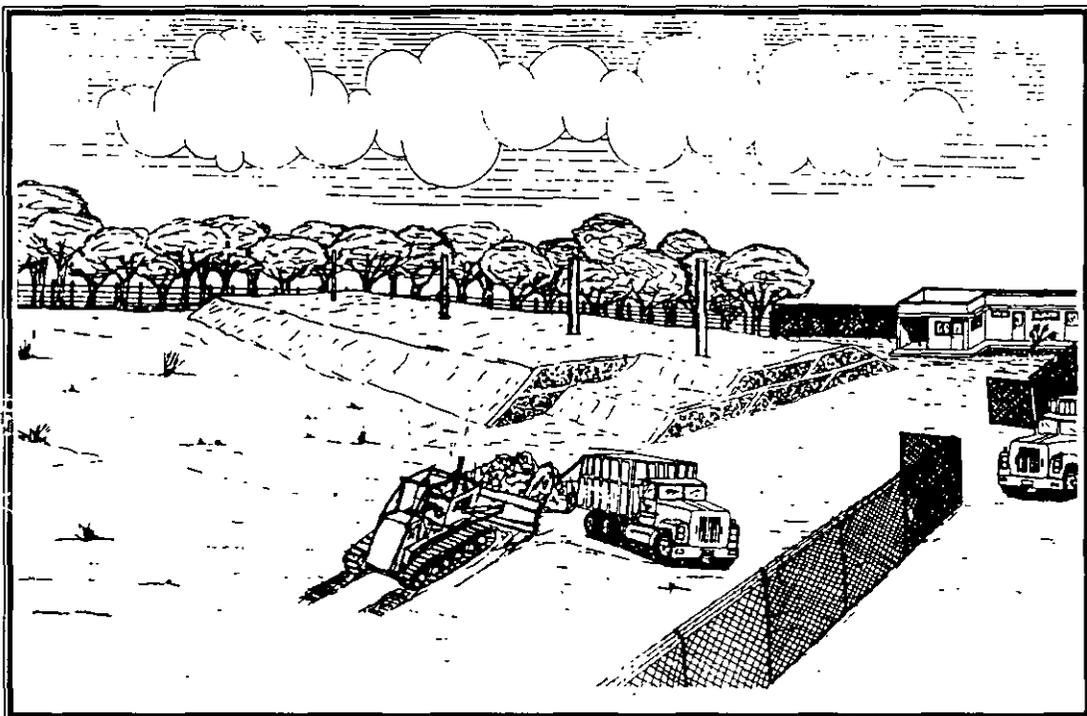


FUENTE

Tchobanoglous G. Theisen H. and Vigil, S., "Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management Issues McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1993

FIGURA 4.4

EJEMPLO DE LA OPERACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO CON EL MÉTODO DE ÁREA

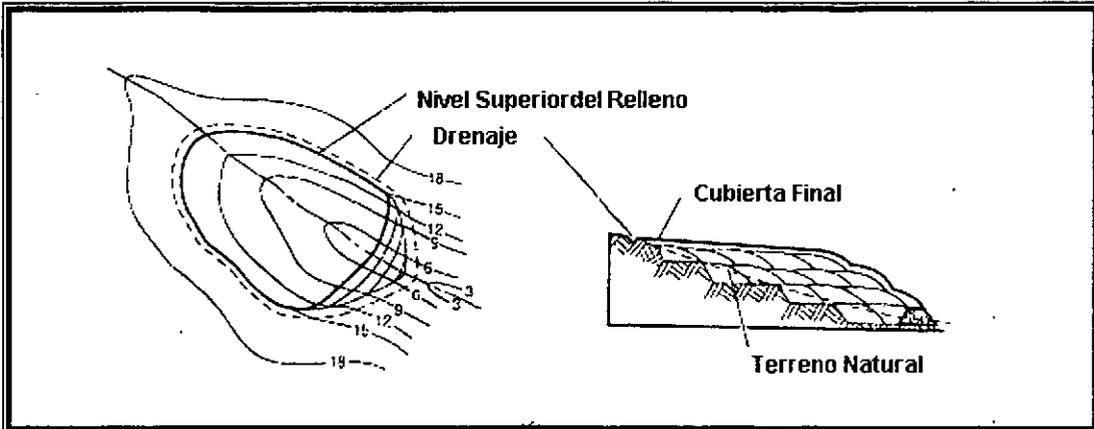


FUENTE

SEDESOL, "Manual Técnico -Administrativo para el Servicio de Limpia Municipal", Primera Edición, 1996.

FIGURA 4.5

MÉTODO DE RAMPA

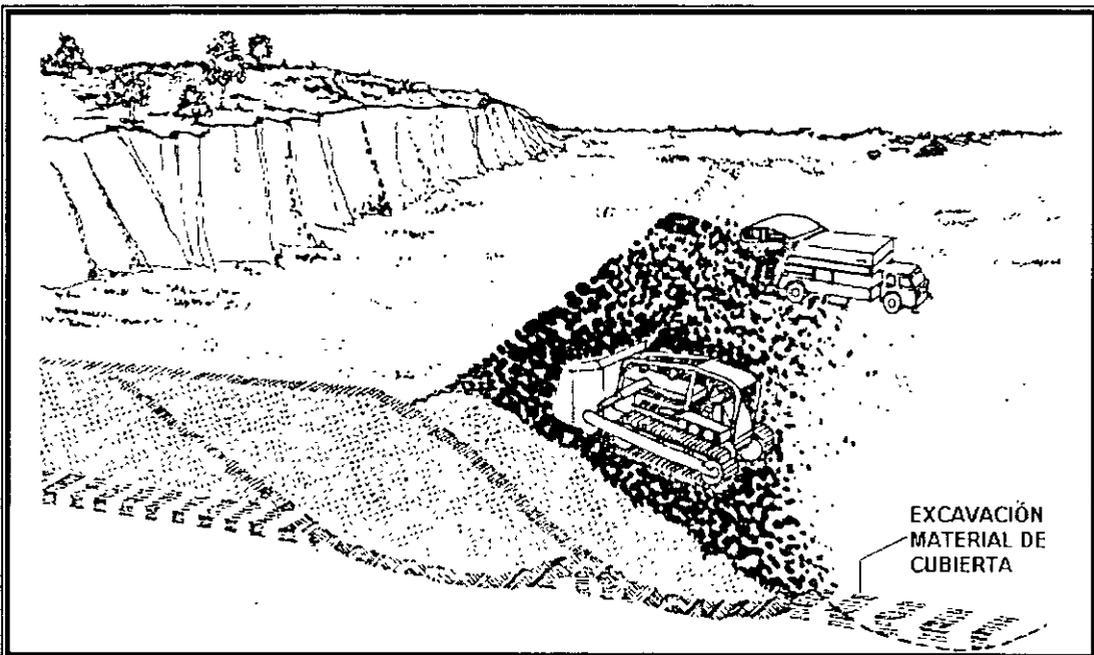


FUENTE

Tchobanoglous G. Theisen H. and Vigil, S., "Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management Issues McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1993

FIGURA 4.6

EJEMPLO DE OPERACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO CON EL MÉTODO DE RAMPA



FUENTE

Brunne D. and Keller D., Sanitary Landfill Design and Operation ; USEPA, Washington D.C., 1972

4.2 Reacciones que Ocurren en el Relleno Sanitario.

Los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario sufren una serie de cambios biológicos, químicos y físicos de manera simultánea e interrelacionada. Estos cambios se describen de manera general, con el propósito de que los operadores de rellenos sanitarios tengan una idea más amplia de los procesos internos que se presentan cuando los residuos son confinados.

4.2.1 Reacciones Biológicas.

Las más importantes reacciones biológicas que ocurren en los rellenos sanitarios son aquellas asociadas con la fracción orgánica contenida en los residuos sólidos municipales la cual conlleva a la generación de gases y eventualmente líquidos. El proceso de descomposición inicia de forma aeróbica (en presencia de oxígeno), una vez que los residuos fueron cubiertos se inicia esta etapa hasta que el oxígeno es consumido por la actividad biológica. Durante la etapa de descomposición aeróbica se genera principalmente un gas llamado bióxido de carbono. Una vez que el oxígeno se ha consumido, la descomposición se lleva a cabo de manera anaeróbica (ausencia de oxígeno) y en esta etapa la materia orgánica se transforma principalmente en bióxido de carbono, metano y cantidades traza de amoníaco y ácido sulfhídrico. Asimismo, muchas otras reacciones químicas son llevadas a cabo a través de la actividad biológica.

4.2.2 Reacciones Químicas.

Las reacciones importantes que ocurren dentro del relleno sanitario abarcan la disolución y suspensión de materiales y productos de conversión biológica en los líquidos que percolan a través de los residuos sólidos, la evaporación y vaporización de compuestos químicos y agua, dentro de la masa envolvente de biogás, la adsorción de compuestos orgánicos volátiles y semi volátiles dentro de los materiales del relleno, la deshalogenación y descomposición de compuestos orgánicos y las reacciones de óxido-reducción que afectan la disolución de metales y sales metálicas. La disolución de los productos de conversión biológica y otros compuestos, particularmente los compuestos orgánicos, dentro de los lixiviados es un punto muy importante, porque estos materiales pueden ser transportados fuera del relleno sanitario con los lixiviados. Estos compuestos orgánicos pueden ser posteriormente incorporados a la atmósfera a través del suelo (cuando se tiene una fuga) o a través de las instalaciones de tratamiento de lixiviados. Otras importantes reacciones químicas que se presentan, son aquellas entre ciertos compuestos orgánicos y las capas de arcilla las cuales alteran las

propiedades y estructura de la misma. Las interrelaciones de estas reacciones químicas dentro del relleno sanitario no son bien conocidas.

4.2.3 Reacciones Físicas

Los cambios físicos más importantes en el relleno sanitario están asociados con la difusión de gases dentro y fuera del relleno, el movimiento de lixiviados en el relleno sanitario y subsuelo y los asentamientos causados por la consolidación y descomposición de los materiales depositados.

El movimiento de gases y las emisiones son consideraciones de particular importancia para el manejo del sistema. Por ejemplo, cuando el biogás se encuentra atrapado, la presión interna puede causar agrietamiento de la cubierta y fisuras, entonces el agua penetra a través de esas grietas y la humedad genera una mayor producción de gas, causando un mayor agrietamiento. La fuga de biogás acarrea trazas de compuestos carcinogénicos y teratogénicos que son incorporados al ambiente. Además dado que el biogás contiene un alto porcentaje de metano, existen riesgos de explosión o combustión.

5. METODOLOGÍA PARA LA INSTALACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO

De manera preliminar, se puede decir que el relleno sanitario constituye un verdadero proyecto de ingeniería y como tal deberá, reunir una secuencia lógica de pasos que permitan llevar al proyecto a un feliz término. En el Cuadro 4.1, se muestran los pasos a seguir para el establecimiento de un relleno:

CUADRO 5.1		SECUENCIA DE ACTIVIDADES PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO
ETAPA	CARACTERÍSTICAS	
A. SELECCION DEL TERRENO Estudio de selección del terreno (opciones)	<ul style="list-style-type: none"> • Criterios urbanísticos • Criterios ecológicos. • Criterios operativos • Criterios económicos 	
B. ADQUISICION DEL TERRENO		
C. PROYECTO EJECUTIVO Estudios básicos	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio demográfico • Estudio de generación de residuos • Estudio de Geología • Estudio topográfico del terreno • Estudio geohidrológico y geofísico • Estudio de mecánica de suelos 	
Diseño del relleno (principales conceptos)	<ul style="list-style-type: none"> • Método de operación • Preparación del terreno • Diseño del sistema de disposición final (celdas, franjas, capas y perfil final) • Análisis de contaminación del suelo • Sistema de impermeabilización • Sistema de control de biogas • Sistema de control de lixivados • Sistema de monitoreo ambiental • Obras complementarias (oficinas, talleres, báscula, canunos drenes, mallas etc.) 	
Determinación del equipamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Maquinaria y equipo para la construcción • Maquinaria y equipo operativo • Maquinaria y equipo complementario 	
Manual de operación	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción general • Etapas • Procedimientos para las excavaciones • Procedimientos para la construcción • Procedimientos para el confinamiento de residuos • Organización del personal • Reglamento interno de trabajo 	
Estudio económico	<ul style="list-style-type: none"> • Costo de inversiones, Costo operativo, Programa de inversiones y costo unitario 	

CUADRO 5.2 SECUENCIA DE ACTIVIDADES PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO (CONTINUACIÓN)

ETAPA	CARACTERISTICAS
Planes de clausura Evaluación ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Uso final del terreno • Plan de clausura • Identificación y evaluación de impactos ambientales • Medidas de prevención y mitigación
D. CONSTRUCCION Y EQUIPAMIENTO Obras civiles Equipamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Preparación del terreno • Obras de acceso y protección • Obras de infraestructura • Obras complementarias • Maquinaria y equipo básico • Equipo complementario
E. OPERACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Administración • Operación • Control técnico
	<ul style="list-style-type: none"> • Montoreo

6. SELECCIÓN DEL SITIO PARA EL RELLENO SANITARIO

La selección de un sitio es el primer paso en el diseño de un relleno sanitario. La importancia de una adecuada planeación del proceso de selección es vital para asegurar que el diseño cumpla con todos los requerimientos que aseguren su adecuada ubicación y futura operación. El reconocimiento no solamente de factores técnicos, sino también de factores ambientales, económicos, sociales y políticos, es vital. El objetivo del estudio de selección de sitios es encontrar un sitio donde la disposición de los Residuos Sólidos Municipales (RSM) pueda realizarse económicamente con el mínimo trastorno del ambiente y la salud humana. De forma general y a nivel internacional se ha establecido que un relleno sanitario ideal debe tener las siguientes características:

- Compatible con los planes de uso del suelo, del área en que se asienta.
- Fácilmente accesible en cualquier clima, para los vehículos esperados durante su etapa de operación.
- Contar con medidas de seguridad, contra la contaminación potencial del agua superficial y subterránea.
- Contar con medidas de seguridad, contra el movimiento incontrolado del gas originado por los residuos sólidos depositados.
- Contar con la cantidad adecuada de material de cobertura, de fácil manejo y compactación.
- Estar ubicado en un área donde la operación del relleno no impactará en forma negativa los recursos sensibles del ambiente.
- Ser lo suficientemente grande para recibir los residuos de la comunidad por servir durante un intervalo de tiempo razonable.
- Ser el sitio más económico disponible y cumplir con los requisitos para la disposición de residuos sólidos, conforme a las restricciones de la legislación aplicable o en su defecto conforme a los criterios internacionalmente aceptados.

6.1 Metodología de Selección del Sitio.

El uso de una metodología específica para la selección de un sitio para disposición final de residuos sólidos es benéfico, ya que de esta forma se puede mostrar que se analizó un buen número de sitios potenciales y con los criterios más significativos, antes de seleccionar un sitio en particular para los estudios detallados y la posible implementación del relleno. El proceso recomendado generalmente en la selección de sitios para la instalación de un relleno sanitario consiste en las siguientes etapas:

1. IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE ZONAS DE ESTUDIO
2. IDENTIFICACIÓN DE SITIOS POTENCIALES
3. EVALUACIÓN Y CRIBADO DE LOS SITIOS POTENCIALES
4. SELECCIÓN FINAL DEL SITIO

6.2 Identificación y Evaluación de Zonas de Estudio.

En este caso se considera conveniente delimitar aquellas áreas que dentro de la extensión del territorio municipal, presentan las condiciones menos adversas para albergar un sitio de disposición final de RSM. El primer paso es la determinación del radio máximo del área de estudio, con base en las distancias de transporte desde las estaciones de transferencia y/o los centroides de las áreas potenciales de servicio; y el segundo paso, la determinación de las restricciones legales, físicas, demográficas, sociales, estéticas y sanitarias.

Una forma de identificación de las zonas factibles es a través de la utilización de cubiertas (acetatos) que se superponen sobre un plano, cada acetato identifica las áreas con limitaciones moderadas o severas para determinado criterio. Dentro de los criterios que se utilizan, destacan los siguientes:

- ◆ Geología.
- ◆ Hidrología subterránea.
- ◆ Zonas de preservación ecológica.
- ◆ Zonas susceptibles de desarrollo urbano.
- ◆ Hidrología superficial.
- ◆ Uso potencial del suelo.
- ◆ Topografía.

- ◆ Infraestructura de comunicación y conducción.
- ◆ Importancia arqueológica e histórica.
- ◆ Edafología.
- ◆ Climatología lluviosa.
- ◆ Climatología en sequía.

De esta manera, se eliminan las zonas menos deseables, por sus diversas características, que corresponderán a las áreas restringidas.

Las investigaciones del subsuelo deben ser realizadas para aquellos sitios potenciales con las características más deseables.

Una vez, sobrepuestas las cubiertas con los criterios en donde se identifican aquellas áreas con limitaciones para ubicación de un sitio de disposición final, se procede a descartarlos y ha enfocar el análisis sobre aquellas zonas que tienen vocación para los fines perseguidos. Un ejemplo de esta metodología se ilustra en la Figura 6.1.

6.3 Identificación de Sitios Potenciales

Una vez conocidas las áreas que pueden ser estudiadas y después de establecer el tamaño del relleno requerido para recibir los residuos del área poblacional o urbana de interés, por un cierto número de años, la búsqueda de sitios viables dentro de dichas áreas puede comenzar, manteniendo siempre presentes las restricciones tanto técnicas como legales, que se estudien para la ubicación de sitios.

6.4 Evaluación y Cribado de los Sitios Potenciales

En la metodología para el cribado de los sitios potenciales se toman en cuenta consideraciones técnicas, económicas y de aceptación pública. La metodología puede incluir diversos sistemas de calificación, así como algunos análisis de tipo subjetivo. Normalmente se recomienda realizar la investigación de 3 a 5 sitios potenciales e identificar los problemas de cada uno, ya que las investigaciones de campo pueden proporcionar información complementaria. Sin embargo, el grado de detalle y la intensidad de la investigación variará de un sitio a otro.

Dentro de las consideraciones técnicas se tienen las siguientes:

◆ Consideraciones Técnicas.

- a) Distancia de transporte.
- b) Tamaño y vida del sitio
- c) Topografía.
- d) Agua superficial.
- e) Suelos y geología
- f) Agua subterránea.
- g) Cantidad y compatibilidad del suelo (material de cobertura).
- h) Vegetación.
- i) Áreas ambientalmente sensibles.
- j) Áreas de importancia arqueológica e histórica.
- k) Accesos al sitio.
- l) Uso del suelo.

◆ Consideraciones económicas.

◆ Consideraciones de aceptación pública.

6.5 Selección Final del Sitio.

En esta etapa final se debe considerar, además de los resultados del proceso de evaluación y clasificación de los sitios, las alternativas de uso del sitio terminado y determinar el uso para cada sitio potencial. El mejor sitio será aquel cuyo uso final sea acorde con los planes de desarrollo de la zona en que se asienta y además presente la mayor prioridad en la clasificación realizada previamente.

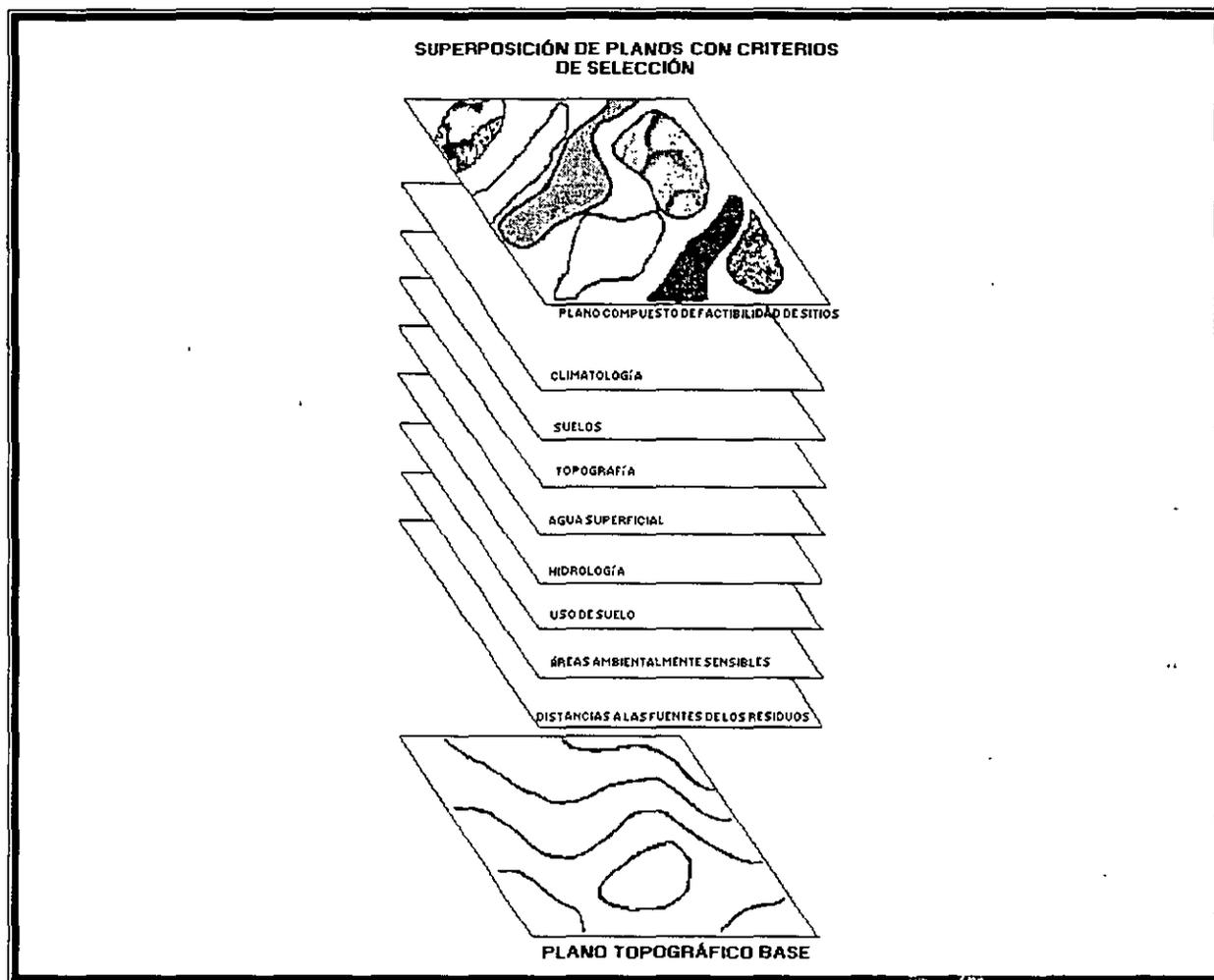
En el Cuadro 6.1, se muestran los principales factores con algunas características que permitirán a los Ayuntamientos mejorar el proceso de selección de sus terrenos para ubicar los rellenos sanitarios. Obviamente la selección debe estar respaldada por especialistas y por estudios técnicos y científicos para garantizar la prevención y control de la contaminación ambiental, así como el cumplimiento de la anteriormente referida.

Es importante señalar que independientemente a este criterio de selección, para el caso de México, existe la Norma Oficial Mexicana NOM-083/ECOL-1996, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales. En el Cuadro 6.2, se presentan los principales criterios que hay que considerar para elegir el terreno que tenga mayor vocación y en La Figura 5.2, se muestra diagrama de flujo del proceso

de selección de un sitio de disposición final de residuos sólidos, para que se cumpla con la norma de referencia.

FIGURA 6.1

SELECCIÓN DE SITIOS



Para validar la selección del sitio, la norma contempla el desarrollo de estudios básicos: geología, hidrogeología y estudios complementarios, los cuales se mencionan en la sección siguiente. Un punto importante que contempla la norma es la aplicación de tecnologías y sistemas equivalentes, con los cuales se pueden elegir sitios de disposición final de residuos sólidos, implantando obras que acrediten técnicamente que no se afectaría negativamente al ambiente. También es importante que los estudios básicos se conduzcan considerando la Norma NOM-083/ECOL-1996.

CUADRO 6.1 FACTORES PARA EVALUAR LA SELECCION DE UN SITIO PARA RELLENO SANITARIO

Conceptos	Opciones		
	Excelente	Buena	Regular
Vida útil	Mayor de 16 años	10 a 15 años	Menor de 10 años
Tierra para cobertura	Autosuficiente	Acarreo cercano	Acarreo lejano
Topografía	Minas a cielo abierto hondonadas naturales	Hondonadas	Otros
Vías de acceso	Cercanas y pavimentadas	Cercanas, transita- bles	Lejanas y transitables
Vientos dominantes	En sentido contrario a la mancha urbana	En ambos sentidos de la mancha urbana	En sentido de la mancha urbana
Ubicación del sitio	De 5 a 10 km. de la mancha urbana	Entre 3 y 5 ó 10 y 15 km. de la mancha urbana	Menor de 3 km. y mayor de 15 km. de la mancha urbana
Geología	Impermeables	Semimpermeables	Permeables
Geohidrología (Manto acuífero)	Más de 50 m de profundidad ó inexistente	Entre 30 y 50 m de profundidad y pobre	Menor de 30 m de profundidad y de mediano a rico
Hidrología Superficial	No hay corrientes superficiales	Lejano de corrientes superficiales (> 50 m)	Cerca de corrientes superficiales (< 50 m)
Tenencia de la tierra	Terreno propio	Terreno rentado a largo plazo	Terreno rentado a corto plazo

CUADRO 6.2

CRITERIOS PARA UBICACIÓN DE SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES
NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-083/ECOL-1996

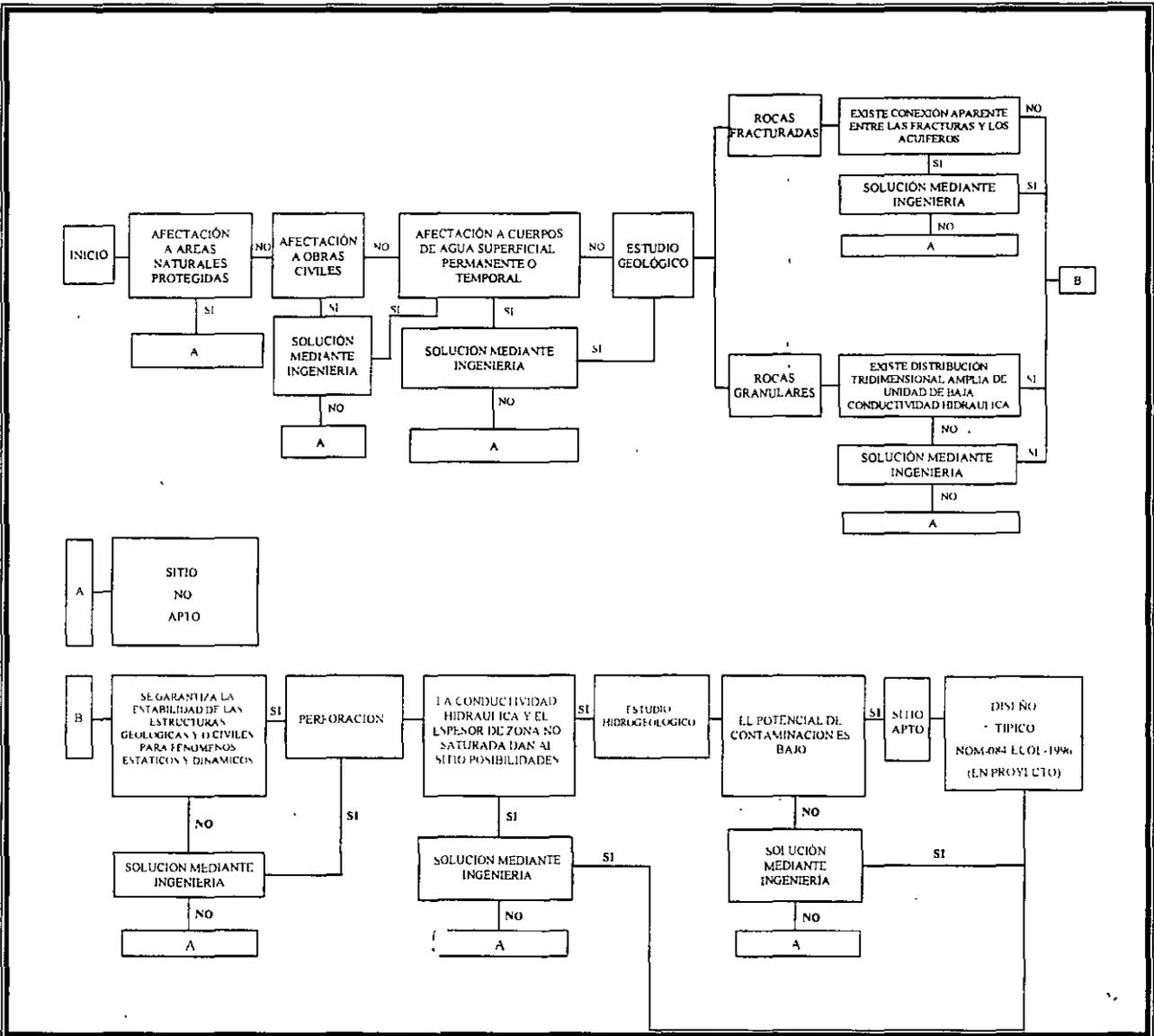
CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
ASPECTOS GENERALES	♦ Restricción por afectación a obras civiles o áreas naturales protegidas.
	♦ Las distancias mínimas a aeropuertos son: De 3000 m (tres mil metros) cuando maniobren aviones de motor a turbina. De 1500 m (mil quinientos metros) cuando maniobren aviones de motor a pistón.
	♦ Respetar el derecho de vía de autopistas, ferrocarriles, caminos principales y caminos secundarios
	♦ No se deben ubicar sitios dentro de áreas naturales protegidas.
	♦ Se deben respetar los derechos de vía de obras públicas federales, tales como oleoductos, gasoductos, poliductos, torres de energía eléctrica, acueductos, etc.
	♦ Debe estar alejado a una distancia mínima de 1500 m (mil quinientos metros), a partir del límite de la traza urbana de la población por servir, así como de poblaciones rurales de hasta 2500 habitantes ¹
	♦ Se debe localizar fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años. En caso de no cumplir lo anterior se debe demostrar que no exista la obstrucción del flujo en el área de inundación o posibilidad de deslaves o erosión que provoquen arrastre de los residuos sólidos.
ASPECTOS HIDROLÓGICOS	♦ El sitio de disposición final de residuos sólidos municipales no se debe ubicar en zonas de pantanos, marismas y similares
	♦ La distancia de ubicación del sitio, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, debe ser de 1000 m (mil metros) como mínimo y contar con una zona de amortiguamiento tal que pueda retener el caudal de la precipitación pluvial máxima presentada en los últimos 10 años en la cuenca, definida por los canales perimetrales de la zona.
	♦ Debe estar a una distancia mínima de 60 m (sesenta metros) de una falla activa que incluya desplazamiento en un periodo de tiempo de un millón de años
ASPECTOS GEOLÓGICOS	♦ Se debe localizar fuera de zonas donde los taludes sean inestables, es decir, que puedan producir movimientos de suelo o roca, por procesos estáticos y dinámicos.
	♦ Se deben evitar zonas donde existan o se puedan generar asentamientos diferenciales que lleven a fallas o fracturas del terreno, que incrementen el riesgo de contaminación al acuífero.
	♦ En caso de que el sitio para la disposición final de los residuos sólidos municipales esté sobre materiales fracturados, se debe garantizar que no exista conexión con los acuíferos de forma natural y que el factor de tránsito de la infiltración (f) sea $<3 \times 10^{-10}$ seg ⁻¹ .
ASPECTOS HIDROGEOLOGICOS	♦ En caso de que el sitio para la disposición final de los residuos sólidos municipales esté sobre materiales granulares, se debe garantizar que el factor de tránsito de la infiltración (f) sea $<3 \times 10^{-10}$ seg ⁻¹ .
	♦ La distancia mínima del sitio a pozos para extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero tanto en operación como abandonados, debe estar a una distancia de la proyección horizontal por lo menos de 100 m (cien metros) de la mayor circunferencia del cono de abatimiento, siempre que la distancia resultante sea menor a 500 m (quinientos metros), esta última será la distancia a respetar
	♦ En caso de que el sitio para la disposición final de los residuos sólidos municipales esté sobre materiales fracturados, se debe garantizar que no exista conexión con los acuíferos de forma natural y que el factor de tránsito de la infiltración (f) sea $<3 \times 10^{-10}$ seg ⁻¹ .

NOTA

(1) En caso de no cumplirse con esta restricción, se debe demostrar que no existirá afectación alguna a dichos centros de población.

FUENTE: NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-083-ECOL-1996

FIGURA 6.1 **DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LAS DIFERENTES ETAPAS DE LOS ESTUDIOS PARA LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS**



FUENTE NORMA OFICIAL MEXICANA
NOM-083-ECOL-1996

7. DISEÑO DE RELLENOS SANITARIOS.

7.1 Metas Básicas del Relleno Sanitario

El diseño del sistema de disposición final debe mantener muy presente las metas (Robinson, W, 1986 y GRCD, 1988) primordiales para cumplir con la filosofía propia del relleno sanitario, estas metas son las siguientes :

- Cumplir con toda las regulaciones aplicables.
- Proteger el ambiente físico (agua subterránea, agua superficial , suelo y aire)
- Minimizar las molestias de la operación (ligeros, polvo, fuego).
- Minimizar los costos (inicial, operación y total).
- Minimizar el impacto a cuerpos de agua, controlando e impidiendo escurrimientos superficiales.
- Minimizar el tiempo de descarga a los usuarios.
- Proteger a los trabajadores y usuarios.
- Optimizar el espacio del relleno sanitario y prolongar al máximo la vida útil.
- Mantener la estética del lugar

7.2 Consideraciones del Uso Final del Sitio.

El uso final del relleno sanitario debe ser considerado durante la fase de diseño, a fin de garantizar el mejor uso futuro del área. La planeación en la fase más temprana posible minimizará los costos y maximizará la utilidad del sitio después de la clausura.

7.3 Pasos para el Diseño de un Relleno Sanitario.

Dado que tanto el residente del relleno sanitario y/o personal operativo, tendrán acceso a las memorias del proyecto ejecutivo de relleno sanitario, para conocer el plan de operación propuesto y demás información valiosa para el entendimiento del sistema en su conjunto, a continuación se describen de manera global los diferentes pasos que deben seguirse para asegurar un diseño efectivo:

1. Determinación de las cantidades y características de los residuos sólidos por disponer.

- *Actual.*
- *Proyectada.*

2. - Recopilación de información para el sitio.

a.- Preparación de planos de las condiciones del sitio (dentro y fuera).

b.- Preparación de planos base de las condiciones existente cerca del sitio.

- Propiedades aledañas.
- Topografía y pendientes.
- Cuerpos de agua superficial.
- Caminos.
- Instalaciones.
- Usos del suelo.

c.- Recopilación de información geohidrológica y preparación de planos del sitio.

- Suelo (profundidad, textura, estructura, densidad, porosidad, permeabilidad, humedad, facilidad de excavado, estabilidad, pH y capacidad de intercambio catiónico).
- Lecho rocoso (profundidad, tipo, presencia de fracturas y localización de afloramientos).
- Agua subterránea (profundidad promedio, fluctuaciones estacionales, gradiente hidráulico y dirección de flujo, velocidad de flujo, calidad y usos).

d.- Recopilación de datos climatológicos.

- *Precipitación.*
- *Evaporación.*
- *Temperatura.*
- *Días de helada.*
- *Dirección de vientos.*

e.- Identificación y evaluación de la regulación.

- Leyes federales, estatales y locales.
- Normas y estándar de diseño.

3.- Diseño del área de relleno.

a. Selección del método de operación : basado en la topografía, tipo de suelo, lecho rocoso y profundidad del acuífero.

b. Especificaciones de dimensiones de diseño.

- Ancho, altura, profundidad de celda.
- Espesor de cubierta diaria, intermedia y final.

c. Especificaciones de los elementos de la operación.

- Uso de la cubierta.
- Método de aplicación de cubierta.
- Requerimientos de importación de material de cubierta.
- Requerimientos de equipo.
- Requerimientos de personal.

4.- Elementos de diseño.

a. Control de lixiviados.

b. Control de biogás.

c. Control de escurrimientos.

d. Caminos de acceso.

e. Áreas de trabajo especial.

f. Manejo de residuos especiales.

g. Estructuras.

h. Instalaciones.

i. Cercado.

j. Alumbrado.

k. Caseta de vigilancia.

l. Pozos de monitoreo.

m. Paisaje.

5.- Preparación del diseño.

- a. Desarrollo preliminar del plan de las áreas de relleno.
- b. Desarrollo de los planos del relleno.
 - Planos de excavación.
 - Secuencia de llenado.
 - Perfil final.
 - Controles del sitio.
- c. Cálculo de volumen de residuos sólidos, volumen de material de cubierta requerido y vida útil.
- d. Desarrollo de los planes definitivos.
 - Áreas de llenado normal.
 - Áreas de trabajo especial.
 - Control de lixiviados y biogás.
 - Control de aguas superficiales.
 - Caminos de acceso.
 - Instalaciones generales.
 - Cercado.
 - Instalaciones de monitoreo.
- e. Preparación de plano en planta y con secciones transversales.
 - Desplante.
 - Perfil final.
 - Fases intermedias de llenado.
- f. Preparación de detalles constructivos.
 - Control de lixiviados y biogás.
 - Control de aguas superficiales.
 - Caminos de acceso.
 - Pozos de monitoreo.
- g. Preparación del plano de uso final.
- h. Preparación del informe.

- i. Preparación del impacto ambiental.
- j. Preparación del manual de operación.

8. PROCEDIMIENTOS DE DISPOSICIÓN DE RESIDUOS

Un relleno sanitario localizado y diseñado cuidadosamente puede convertirse en un tiradero a cielo abierto, si no es adecuadamente operado. Cada instalación destinada para relleno sanitario tiene características únicas que solo pueden ser aprendidas mediante el conocimiento, la experiencia y el continuo entrenamiento.

La operación y el mantenimiento adecuado de un relleno sanitario es necesario para:

- Evitar que el relleno sanitario se convierta en un tiradero a cielo abierto.
- Reducir los impactos negativos potenciales en aire, agua y suelo.
- Minimizar o eliminar los impactos hacia las propiedades adyacentes.
- Reducir los costos de operación (a largo plazo).
- Incrementar la capacidad volumétrica y ampliar al máximo la vida útil.
- Establecer y mantener buenas relaciones públicas.
- Reducir los conflictos con las instancias reguladoras o normativas.
- Reducir accidentes, demandas e indemnizaciones.
- Demostrar la capacidad operativa.
- Satisfacer las necesidades de disposición final de residuos sólidos de la región.

Los procedimientos de operación para un relleno sanitario pueden variar, dependiendo de diferentes factores, entre los que se puede citar el tipo de relleno, el clima, las cantidades, tipos de residuos por recibir, la regulación a nivel local, estatal etc. Sin embargo, se pueden establecer ciertas actividades que son muy similares para todos los sitios, como una guía para quienes deben encargarse de su adecuado funcionamiento (GRCDA,1988).

8.1 Revisión del Plan de Relleno

Como punto de partida, se puede decir que cualquier relleno sanitario bien manejado debe contar con un plan de operación y desarrollo futuro. Esos planes definirán de manera clara y precisa, cómo se desarrollará un proyecto de relleno

sanitario, abarcando desde la fase de construcción de la primer celda de residuos sólidos hasta la fase de la clausura final del sitio.

El plan de operación que normalmente se prepara dentro del proyecto de diseño, es un elemento básico para utilizarse como una primera fuente de información, sobre los aspectos técnicos del relleno y las actividades que se realizarán para su adecuada operación.

Considerando que la mayoría de los rellenos sanitarios que se proyectan en nuestro país, tienen una vida útil relativamente grande (generalmente más de 10 años), es necesario que el personal consulte regularmente el plan de operación, con la finalidad de que el responsable del relleno sanitario, tenga la plena certeza que las operaciones y el desarrollo del sistema se están realizando, conforme a las especificaciones establecidas en el mediano y largo plazo, o en todo caso, servirá para identificar el momento oportuno para modificar o adecuar los procedimientos de operación vigentes, principalmente pensando en los cambios que se requerirán conforme a los nuevas disposiciones legales que se promulguen. En este caso, es posible preparar una transición suave hacia un nuevo plan de operación acorde con los cambios actuales.

Las partes de un plan para la operación de un relleno sanitario contendrán como mínimo los siguientes aspectos:

- ◆ MANEJO DE RESIDUOS EN EL FRENTE.
- ◆ DIRECCIÓN DE FLUJO DEL TRÁFICO.
- ◆ EXCAVACIÓN, TRANSPORTE Y COLOCACIÓN COTIDIANA DEL MATERIAL DE CUBIERTA.
- ◆ INSPECCIÓN DIARIA DEL SITIO Y MANTENIMIENTO.
- ◆ EL REGISTRO RUTINARIO DE LA CARGA QUE INGRESAN LOS VEHÍCULOS RECOLECTORES.



8.2 Control de Acceso y Operación de Báscula.

La caseta de control y el área de pesaje representan la primera fase de las operaciones del relleno sanitario y constituye el principal control para:

- ◆ DETECTAR RESIDUOS SÓLIDOS PROHIBIDOS.
- ◆ LOCALIZAR IRREGULARIDADES EN LOS VEHÍCULOS.

- ◆ DIRIGIR LOS VEHÍCULOS AL ÁREA ADECUADA.
- ◆ COMUNICARSE CON EL CONDUCTOR.
- ◆ REGISTRAR LA ENTRADA DE LOS VEHÍCULOS.

Es indispensable que los rellenos sanitarios cuenten con un sistema de pesaje, dado que se debe conocer la cantidad de residuos sólidos que ingresan, con el fin de establecer parámetros de control de la operación, así como para la asignación de tarifas y cobros. Cuando no hay básculas, el checador de acceso debe ser muy diestro en la determinación precisa del volumen de residuos en los vehículos, normalmente, debe contar con indicadores de capacidad de carga de cada tipo de vehículos, los cuales son generados con base en estadísticas de pesaje de vehículos en otros sitios.

El operador de la báscula registrará en la bitácora los datos de cada vehículo, pesarlo, registrar el peso de la tara (si se conoce), cobrar, generar facturas o recibos y documentos de pesaje, pesar los vehículos después de la descarga para generar los pesos de tara y administrar esta parte de la operación. En el capítulo 7 del presente manual, se muestran formatos tipo para el registro del acceso y pesaje de los vehículos.

8.2.1 Detección de residuos prohibidos.

Dado que no es posible separar los residuos que son transportados por los vehículos recolectores y/o de transferencia, en la entrada, la revisión del contenido de estos vehículos debe hacerse en el frente de trabajo. Otros tipos de vehículos, especialmente aquellos que no tienen una procedencia definida deben inspeccionarse en la entrada. Estos vehículos representan el grupo más sospechoso para el ingreso de residuos prohibidos al sitio.

Es recomendable que las listas de residuos no autorizados se actualicen de manera regular y entregarse a los controladores de acceso y del frente de trabajo, siendo opcional la entrega de dicho lista a los transportistas para una mejor comprensión de que residuos no pueden ingresar al sitio. Los vehículos que transporten residuos no autorizados deberán detenerse en la entrada y reportarse al residente del relleno para tomar las medidas a que haya lugar. La inspección directa de la carga contribuye a que el transportista sea más cuidadoso de los residuos que transporta y con ello minimizar la posibilidad del ingreso de residuos no autorizados de manera irregular.

8.2.2 Irregularidades en los vehículos.

Algunas de las posibles violaciones que se pueden detectar en la entrada son:

- ◆ Cargas sin cubrir.
- ◆ Transporte de líquidos y su posible escurrimiento.
- ◆ Negligencia e incumplimiento de medidas de seguridad.
- ◆ Sobrepeso en los vehículos.
- ◆ Otros.

Es conveniente para los responsables del sitio coordinarse con la policía municipal y otras instituciones encargadas de la aplicación de la legislación relativa al transporte, con el fin de asegurar que se cumpla con las disposiciones legales establecidas para evitar irregularidades en el peso, la cubierta de la carga del vehículo, el escurrimiento de líquidos; ya que de lo contrario se pueden originar problemas a la población aledaña a las vías de acceso al relleno, creando descontento y rechazo a la existencia del sitio de disposición final. Independientemente de lo anterior, se debe cuidar que dichas disposiciones se cumplan debido a que se puede poner en riesgo la seguridad de los mismos habitantes. La solución más efectiva a este problema es evitar el acceso de aquellos vehículos que no acaten dichas disposiciones.

8.2.3 Control de Tráfico.

Hay rellenos que tienen varias áreas de operación. En ocasiones las áreas dependen de el tipo de vehículos, tales como los de descarga automática contra los de descarga manual. En otros sitios el tipo de residuos, por ejemplo, residuos de jardinería, determinan a donde debe ir el vehículo. En la mayoría de los rellenos es una práctica de operación cambiar frecuentemente los frentes de trabajo en función de las condiciones del clima y otros factores. Adicionalmente a los señalamientos adecuados, el controlador de acceso o el operador de la báscula, deben proporcionar instrucciones verbales a los conductores, para agilizar las actividades y evitar confusiones.

Comunicación con el conductor

La mayoría de las operaciones en la báscula y el acceso dependen de la comunicación con los conductores de los vehículos. Los transportistas que ingresan por primera vez necesitarán ayuda para llegar al área de descarga, conocer el reglamento y los procedimientos del relleno, pago de las tarifas, etc.

Los vehículos desconocidos deben checarsse para verificar que no están cometiendo irregularidades y sus conductores responder respecto al tipo de residuos que transportan. Esta es el área donde se deben checar los contenedores vacíos para certificar su lavado, contarlos o en todo caso para aprobar su descarga. Lo mismo se aplica para residuos especiales.

La caseta de control de acceso es el lugar donde se establece el trato directo con los usuarios del relleno sanitario. El trato debe ser amable y cortés, pero debe dejarse sentir que el sitio tiene reglas y procedimientos que deben seguirse. Los transportistas deben estar conscientes de que no tienen ningún otro derecho más que la descarga de sus residuos, previamente autorizada y su disponibilidad para el uso de la instalación depende del cumplimiento de todos los requisitos necesarios y del reglamento interior del relleno sanitario.

Registros.

En la caseta de acceso o en la zona de pesaje se hacen y conservan todos los registros del relleno. El ámbito de esta actividad puede variar de un sitio a otro. La primer función del control de acceso es registrar la entrada y salida de los vehículos. Si es posible, se deben registrar las horas correspondientes. Particularmente en los sitios grandes, es importante saber que todos los vehículos han salido del relleno a la hora de cerrar. La conservación de los registros sobre el tiempo que tarda cada vehículo en revisión puede proporcionar criterios que puedan ser utilizados para mejorar la eficiencia de operación.

El control de planeación, presupuestos y costos requiere de registros exhaustivos y precisos. El peso de los residuos que ingresan al sitio constituye la estadística más importante. Todos los cálculos relacionados con los costos y la eficiencia se basan en esta cifra. El volumen de los residuos recibidos es insignificante para el cálculo de los costos relevantes, la eficiencia de operación, la vida útil esperada y otros parámetros importantes. El encargado del control generalmente debe registrar información sobre:

- ◆ Identificación del vehículo.
- ◆ Peso bruto del vehículo.
- ◆ Tara del vehículo (pesando directamente o de registros anteriores).
- ◆ Fecha y hora de entrada y salida.
- ◆ Tipo de residuos (domiciliarios, industriales, especiales, etc.).
- ◆ Cargos y facturación.
- ◆ Peso del material de cobertura importado.
- ◆ Cualquier información especial.

Estos datos deben resumirse y concentrarse para cada día. Se requieren reportes semanales, anuales o mensuales. La revisión rutinaria de estos registros en forma estadística pueden ayudar a los operadores en la planeación e implementación de los ajustes necesarios para la operación. En el Capítulo 7, del presente manual se describe con detalle la forma de llenar dichos registros.

8.2.4 Recepción de Residuos.

El residente del relleno debe ser capaz de distinguir entre los residuos no peligrosos que pueden ser aceptados en el relleno y los residuos que la Ley define como peligrosos. Para facilitar la toma de decisiones y por lo tanto prohibir la entrada de residuos peligrosos al relleno, todos los rellenos deben operar bajo las siguientes condiciones:

➤ *El relleno debe aceptar únicamente:*

- ◆ Los residuos sólidos considerados como no peligrosos por la legislación ambiental vigente. Si se trata de residuos especiales o industriales deben ir acompañados de un certificado de no peligrosidad, emitido por la autoridad competente.
 - ◆ En el caso de los residuos industriales, las pruebas de caracterización de un residuo en particular, podrán considerarse válidas durante un año contado a partir de la fecha de su realización, por lo que las cargas subsecuentes de residuos provenientes del mismo proceso podrán ser recibidas únicamente con una declaración del generador de que no se ha modificado el proceso empleado, o en las materias primas utilizadas en la instalación generadora del residuo.
- *Cualquier tipo de residuo cuyo estado o clasificación no estén adecuadamente definidos, requiere de una aprobación por escrito, de la autoridad correspondiente, previamente a su aceptación.*
- *También para el caso de los residuos especiales o industriales, el transportista deberá presentar además una declaración escrita de que los residuos transportados al relleno son los mismos recibidos del generador y que no se les han agregado materiales adicionales.*
- *En ningún caso el relleno deberá aceptar residuos considerados como peligrosos por los listados o las pruebas de laboratorio establecidas por la legislación ambiental vigente. De éstos, los que más comúnmente llegan a los rellenos son los siguientes:*

- ◆ Cadáveres o partes de animales.
 - ◆ Residuos hospitalarios (contaminados).
 - ◆ Materiales altamente combustibles o explosivos (Gasolinas, aceites, etc.).
 - ◆ Excremento o estiércol sin previa estabilización biológica.
 - ◆ Residuos de procesos industriales.
- *No se deben aceptar en el relleno líquidos, ni suelos o cualquier otro sólido con líquidos.*
- *Tampoco es recomendable la aceptación de (Carroll, 1996):*
- ◆ Residuos o materiales cuyo tamaño o peso excedan los límites y/o capacidades de los equipos utilizados para su manejo y disposición final.
 - ◆ Residuos de construcción, mantenimiento o demolición de obras civiles o generados por constructores o contratistas profesionales.
 - ◆ Partes y accesorios automotrices.
- *Opcionalmente y dependiendo de las políticas del organismo responsable y/o de lo que establezca la legislación aplicable, se podrá restringir la recepción de (Carroll, 1996):*
- ◆ Residuos generados fuera de la jurisdicción territorial de la entidad correspondiente.
 - ◆ Llantas usadas, con diámetros mayores de 0.80 m. o montadas en el rin, así como en cantidades superiores a cuatro unidades por semana, para los particulares.
 - ◆ Baterías automotrices o industriales.

8.3 Prácticas de Disposición de Residuos.

Como se ha mencionado en los primeros capítulos de este documento, existen dos métodos básicos para la operación de los rellenos sanitarios: el de Trinchera y el de Área. Otras opciones son simplemente modificaciones de los dos métodos anteriormente señalados. El método de trinchera es muy difícil de ejecutar, debido a que los diseños actuales demandan la implementación de un sistema de impermeabilización (natural o artificial) de la base del relleno y de sistemas de captación y desalojo de lixiviados. El método de área es actualmente el más utilizado, principalmente porque se adapta con mayor facilidad a la existencia de

la infraestructura mencionada. En todo caso los diseños actuales, admiten excavaciones mayores para alcanzar la profundidad deseada y proceder a la construcción de sistemas de impermeabilización y captación de lixiviados, para posteriormente operar el sitio mediante el método de área.

La *celda* diaria constituye el elemento constructivo primario y común de cualquier relleno sanitario. En la Figura 8.1, se muestra la morfología de la celda diaria, para una mejor visualización de la misma. Los residuos sólidos recibidos son esparcidos y compactados en capas dentro de un área perfectamente delimitada y hasta un volumen definido. Al término de cada día de operación, el área ya ocupada con residuos compactados, es cubierta completamente con una capa delgada de tierra, que posteriormente es compactada. De esta forma, los residuos compactados y cubiertos diariamente con este material, constituyen una celda. Una serie de celdas adyacentes en forma lateral o transversal y con una misma altura, forman una *franja*. Una serie de franjas adyacentes y con una misma altura, forman una *capa* y una o más capas, pueden formar el total del área de *relleno sanitario* o una *etapa* del mismo, como se ilustra en la Figura 7.1, presentada en la sección 2, de estas notas.

Cuando los residuos son confinados en una celda, las posibilidades de que se inicie fuego interno se reducen al mínimo y en todo caso éste no puede propagarse fácilmente, la fauna nociva como roedores, moscas principalmente, no pueden tener acceso fácil a los residuos para conseguir alimento o madrigueras, también se reduce la cantidad de materiales expuestos a los elementos ambientales con lo que se minimiza la dispersión de residuos, microorganismos y polvos, al igual que se mitigan o eliminan olores y la producción de lixiviados, facilitando finalmente el control de los gases que emanan de las celdas del relleno.

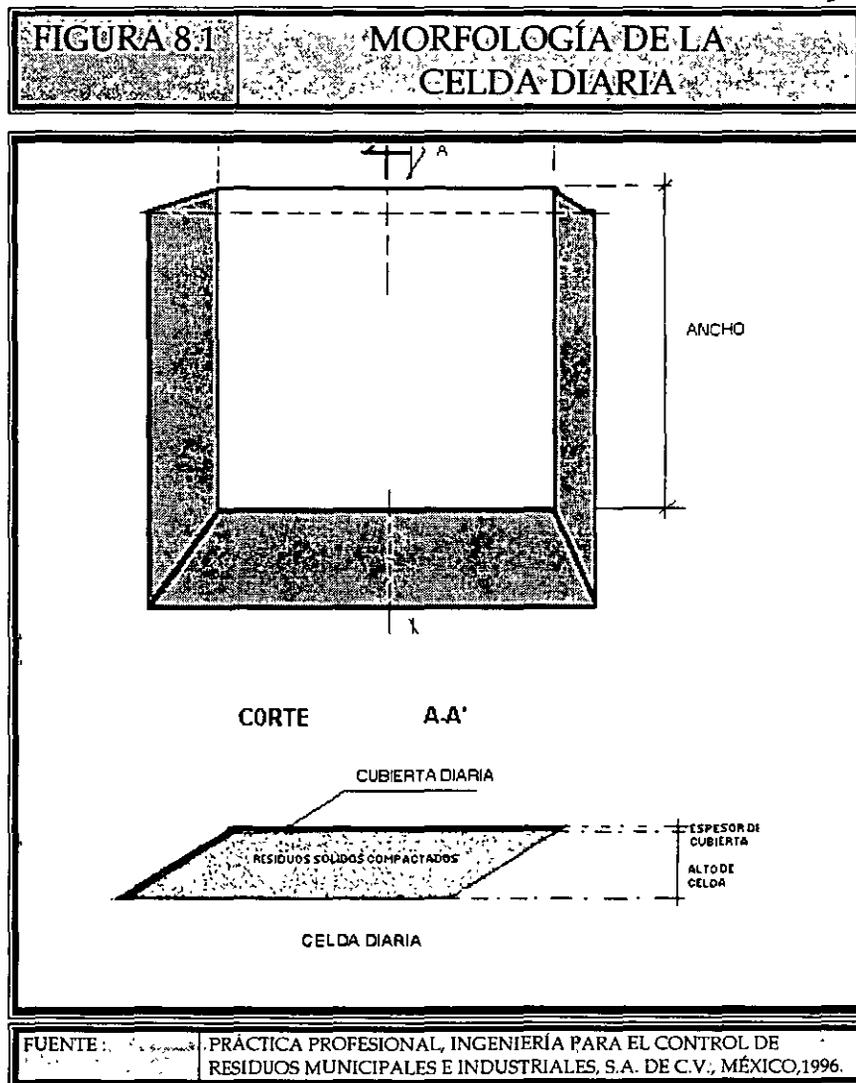
8.3.1 Construcción de celda

Una celda es construida mediante la compactación de residuos sobre una pendiente en capas sucesivas del mismo espesor. Los residuos son depositados al pie del frente de trabajo y empujados sobre el talud. Los pasos adecuados para la construcción de la celda se describen a continuación:

- Descargar los residuos sólidos sobre el área que conformará el correspondiente frente de trabajo del día.
- Usar estacas de nivelación para el control de la altura de la celda y dar la pendiente adecuada para facilitar el drenaje por gravedad. El nivel de la

superficie superior de la celda debe ser entre 2 y 5 por ciento, mientras que la altura de celda comúnmente es de aproximadamente 2.4 a 3.5 m.

- ☑ Las dimensiones de la celda están especificadas en el proyecto y pueden consultarse también en el plan de relleno. Estas dimensiones deberán coincidir con el volumen de los residuos compactados en el sitio, al final del día de trabajo.



- ☑ Sin embargo, si por alguna razón no se conocen las dimensiones que deberá tener la celda o es necesario modificarlas de manera emergente, algunas recomendaciones útiles son las siguientes; a) el ancho del frente de trabajo

depende del número de vehículos que transportan residuos al área de operación y la cantidad de equipo disponible para el esparcido y compactación. Por razones de seguridad, el ancho del frente de trabajo no deberá ser reducido a menos de tres veces el ancho de la hoja topadora del equipo utilizado y no debe exceder los 45 m, ya que con dimensiones mayores llega a ser muy difícil de manejar, a menos que haya una gran cantidad de equipo disponible y que su operación sea supervisada estrictamente; b) en cuanto a la altura adecuada para las celdas no existe regla alguna, sin embargo, algunos diseñadores prefieren 2.5 m. o menos, presumiblemente porque esta altura no causará problemas de asentamientos severos; c) la densidad recomendable para los residuos sólidos de una celda terminada es superior a 600 Kg/m^3 .

- ☑ Esparcir los residuos sólidos en el frente de trabajo en capas de 0.30 a 0.60 m de espesor (ver Figura 8.2).
- ☑ Compactar los residuos sólidos con entre 3 y 5 pasadas sobre el talud.
- ☑ Una vez compactados los residuos del día, se descargan sobre los mismos el material para la cubierta diaria.
- ☑ Esparcir y compactar el material de cobertura, manteniendo un espesor mínimo de 15 cm. Dependiendo del tipo de suelo de donde provenga el material de cubierta, puede requerir un espesor mayor. Por ejemplo, material suelto tal como la arena puede penetrar dentro de espacios abiertos en los residuos. Por esta razón si los residuos no son compactados adecuadamente se requerirá mayor cantidad de material de cobertura (Figura 8.3).

En las Figuras 8.4. y 8.5, se ilustra y se presenta un flujograma de las actividades mínimas que se deben realizar para construir adecuadamente una celda de residuos sólidos, componente elemental del relleno sanitario.

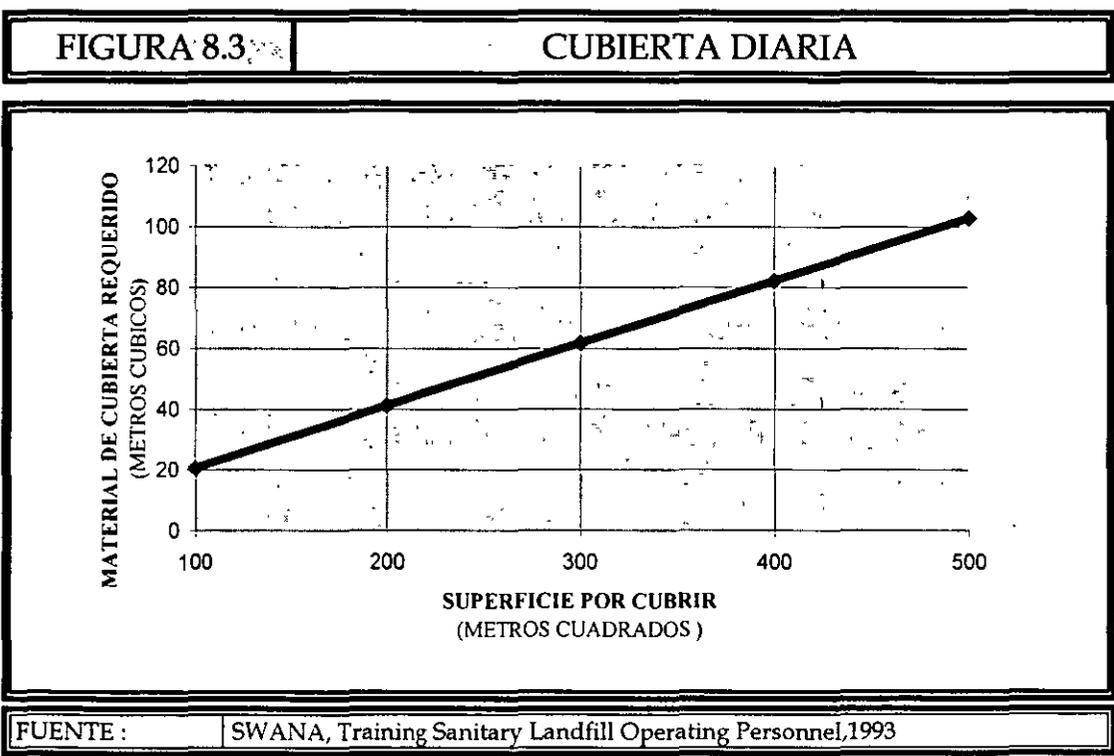
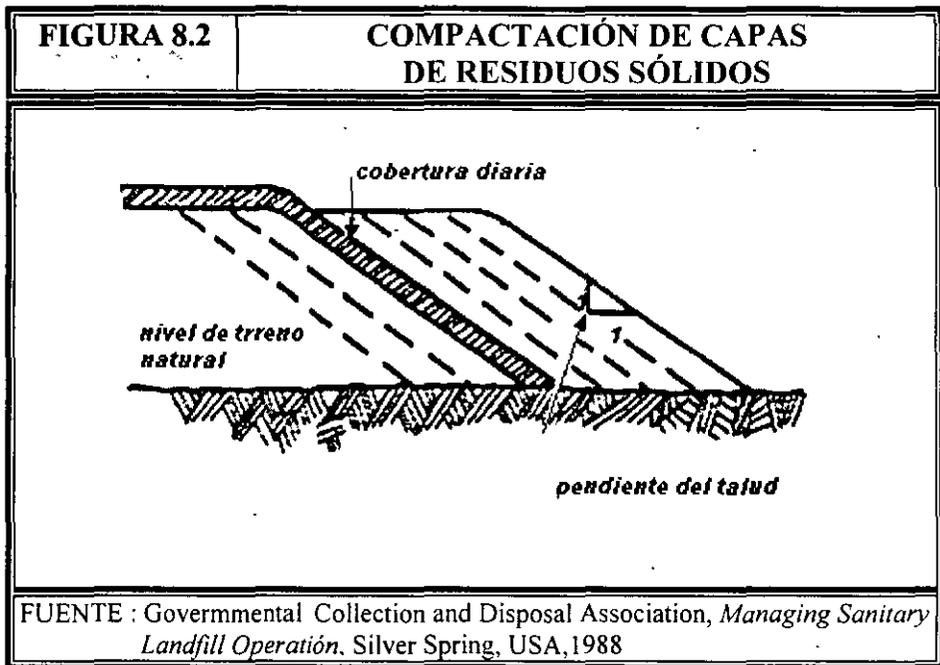


FIGURA 8.4 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE CELDA DIARIA (A)

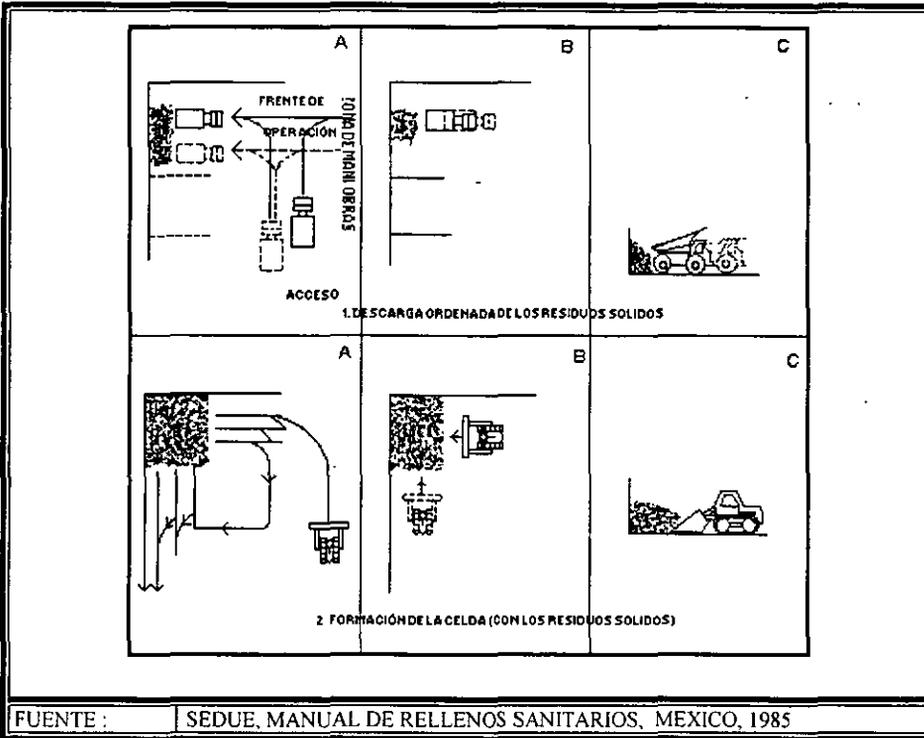
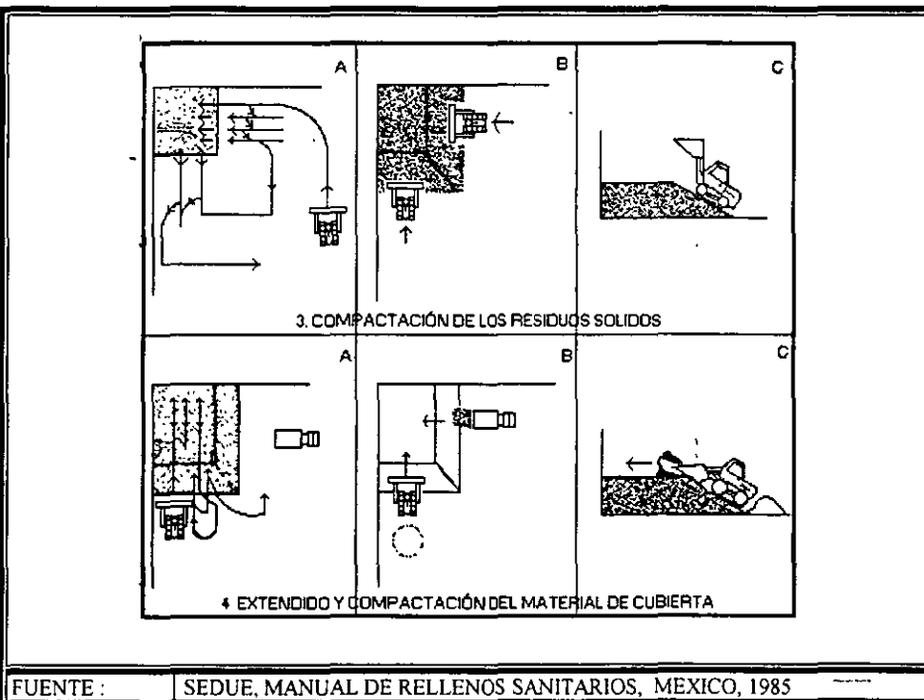
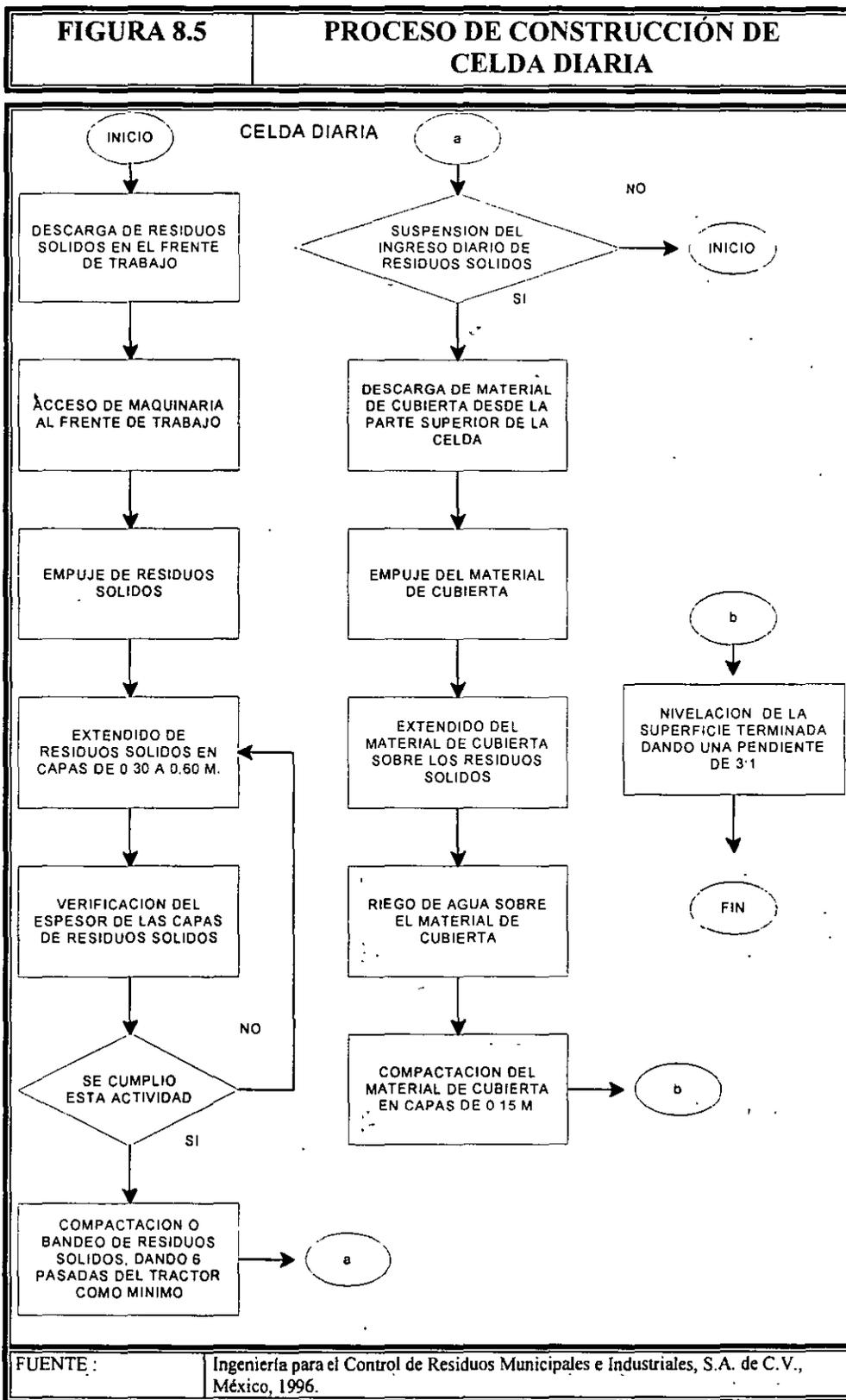


FIGURA 8.4 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE CELDA DIARIA (B)





8.3.2 Cobertura.

Cubierta Intermedia.

La superficie que envuelve la celda diaria terminada y que estará expuestas al ambiente por un período de más de una semana, hasta que se coloque una nueva celda sobre ésta, sufrirá los efectos de las condiciones climatológicas y posiblemente el frecuente paso de vehículos. Normalmente estas superficies son cubiertas adicionalmente, con una capa de 0.30 m de espesor de tierra compactada. A esta capa se le conoce como cubierta intermedia y tiene la función de proteger a la cubierta diaria y prevenir la intrusión de agua al relleno por un período más largo. Para la colocación de la cubierta intermedia, se debe seguir el siguiente procedimiento :

- Una vez que se tiene una superficie rellena, ya sea una franja o una capa, en la cual no se tenga previsto depositar residuos sólidos por un tiempo largo; se descargará sobre la cubierta diaria, el material para la conformación de la cubierta intermedia.
- Esparcir y compactar el material de cobertura, manteniendo un espesor mínimo de 30 cm.

Cubierta final

Cuando el relleno ha alcanzado el nivel planeado, se deberá colocar una cubierta final de no menos de 60 cm de espesor. Esta cubierta es necesaria para permitir el tráfico ligero y minimizar los efectos que ocasionan los asentamientos diferenciales, tal como el afloramiento de residuos por el efecto de fracturas y agrietamientos. Esta cubierta, también ayudará a evitar que la lluvia fluya hacia el interior de los residuos confinados:

- Una vez que se tiene una área de una capa, etapa o la totalidad del relleno, terminadas; descargar sobre el área por cubrir, el material para la cubierta final.
- Posteriormente, se extenderá el material y se compactará el material de cobertura, manteniendo un espesor mínimo de 30 cm.
- Esparcir y compactar el material de cobertura, manteniendo un espesor mínimo de 60 cm.

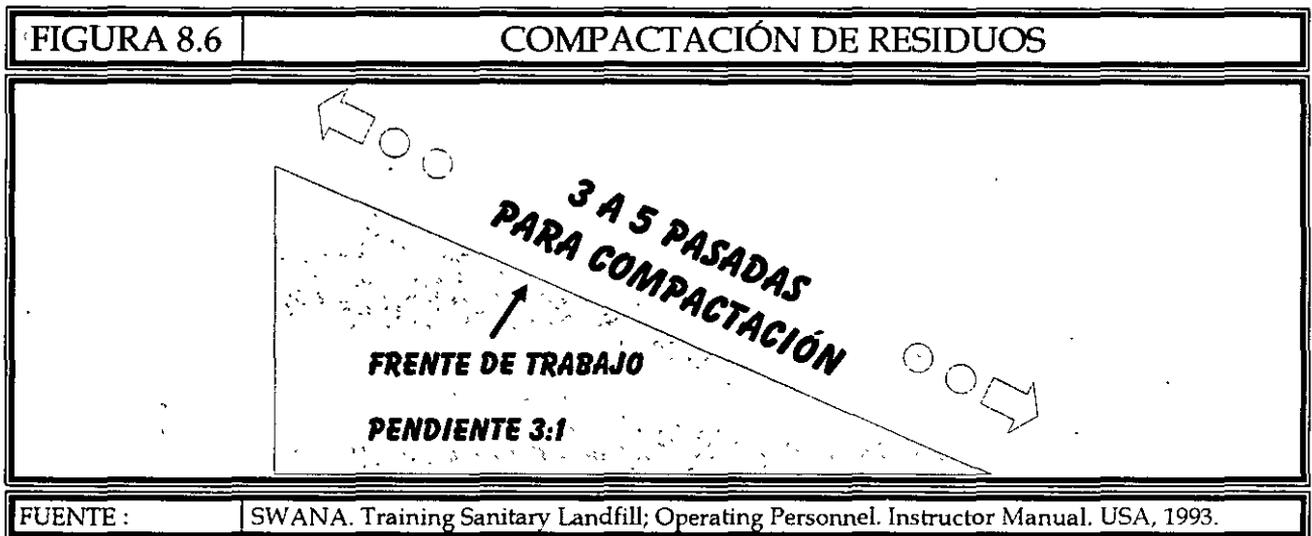
Hay algunas tendencias hacia el uso de geosintéticos como parte de la cubierta final. Para ello es necesario considerar factores de diseño muy especiales que aseguren el funcionamiento efectivo de dicha cubierta.

8.3.3 Prácticas de operación recomendables.

A continuación se presenta una serie de recomendaciones para lograr una efectiva operación del relleno sanitario :

- ☑ No se debe realizar disposición alguna cuando no este presente un supervisor. El sitio debe ser cerrado cuando no se cuente con el personal suficiente para la prestación del servicio.
- ☑ Mantener el menor ancho posible en el frente de trabajo.
- ☑ Mantener una separación de 2.5 a 3.0 m entre los equipos de compactación y los vehículos recolectores o de transferencia.
- ☑ Todos los residuos recibidos en el relleno deben ser dispuestos sanitariamente y no deberá exceder un periodo de 48 horas después de su ingreso.
- ☑ Los residuos deben trabajarse inmediatamente después de ser depositados en el frente de trabajo y no permitir que se acumulen en montículos o que únicamente los residuos se conformen de una a dos veces por día.
- ☑ Para asegurar el máximo aprovechamiento de la capacidad del relleno, la residuos deben vaciarse en la base de la celda o rampa de disposición y trabajarse en ese mismo nivel. Este "fondo de descarga" reduce las posibilidades de esparcimiento de papeles debido al viento, permite máxima compactación y mejora el control de los residuos. Otra ventaja es que cuando los residuos están depositados en un área pequeña, también es menor la cantidad de material de cubierta que se utiliza.
- ☑ Los residuos deben ser esparcidos en la superficie del frente de trabajo en capas de entre 30 y 90 cm.
- ☑ Nunca se debe depositar residuos en el frente de ataque de aquellas áreas, en donde se estén efectuando maniobras de excavación.

- ☑ Los residuos esparcidos en el frente de trabajo se deben compactar conforme a los requerimientos de compactación establecidos en el proyecto ejecutivo y en concordancia con el plan de operación (generalmente con un mínimo de cuatro pasadas es suficiente, si la compactación se realiza con tractores de rueda metálica o de cadenas).
- ☑ Los residuos son manejados eficientemente, si éstos son esparcidos sobre un talud 3:1, utilizando maquinaria sobre orugas; pero se pueden obtener excelentes resultados en superficies planas, si se trabaja con equipo con ruedas dentadas. Utilizando un talud con determinada pendiente, se favorece el ahorro de material de cubierta, así como un menor tiempo en el extendido y compactado de los residuos. Sin embargo, la pendiente excesiva en los taludes (taludes mayores de 3:1), se obtiene una menor compactación (Ver Figura 8.6).



- ☑ Una vez que se ha cargado, mediante el equipo de movimiento de tierras, una cantidad de material de cubierta, no deberá descargarse en ningún lugar hasta que se defina el lugar en donde se colocará.
- ☑ El material de cobertura se debe humedecer lo suficientemente para lograr la compactación adecuada, además para controlar el arrastre del material por efecto del viento. Ahora bien, se debe tener cuidado de dosificar el agua necesaria para lograr el objetivo propuesto; pero se debe tener mucho cuidado de no agregar agua en exceso, debido a que se generan problemas de atascamiento y/o escurrimientos que afectan las propiedades de la cubierta de material generándose problemas operativos.

- ☑ Es recomendable remover cualquier acumulación de agua pluvial sobre las superficies rellenas, dentro de un período de 72 horas, después de haber identificado dicho problema.
- ☑ Cuando se presentan lluvias de alta intensidad sobre el frente de trabajo, el agua acumulada debe ser bombeada hacia los canales de agua pluvial o fuera del sitio, antes de proceder a la descarga de residuos sólidos.
- ☑ Todas las depresiones que aparezcan sobre las superficies ya trabajadas, deben ser rellenas lo más pronto posible, para evitar la acumulación de agua y de esta forma minimizar la posibilidad de infiltración de agua hacia los estratos inferiores.
- ☑ La aceleración de la degradación de los residuos depositados en el relleno, mediante la adición de microorganismos o enzimas con acción específica, solamente tendrá sentido, si se cuenta con un plan bien definido que establezca la ubicación del área designada para este programa, composición del o los aditivos, método, cantidad y frecuencia de aplicación, así como las medidas de seguridad requeridas.
- ☑ Si por alguna razón se reciben residuos especiales o industriales (aún siendo no peligrosos), deberán disponerse separadamente de los residuos de origen municipal. No debe haber disposición conjunta.

8.3.4 Uso Efectivo de Maquinaria.

La construcción de un relleno sanitario requiere de equipo pesado, conforme al grado de dificultad que presente el sitio para ello. Generalmente, este elemento de trabajo resulta ser una fuente importante en las inversiones destinadas al control de los residuos sólidos y por lo tanto, su uso efectivo es vital para el desarrollo eficiente de las operaciones en el relleno sanitario. La operación y el mantenimiento del equipo ocupan una lugar clave en los costos asociados con la operación de los sistemas de disposición final. Por tal razón, la adecuada selección del equipo por utilizar, debe realizarse de manera racional y tomando en cuenta el método de operación y las condiciones reales de trabajo a las que estarán sujetas.

Las funciones básicas del equipo para un relleno sanitario caen dentro de las siguientes categorías:

- ◆ Preparación del sitio incluyendo desmonte y despalme.
- ◆ Compactación y manejo de residuos.
- ◆ Excavación, transporte y aplicación de cubierta diaria.
- ◆ Esparcimiento y compactación de la cubierta final.
- ◆ Funciones de apoyo.

Con base en el tamaño de la instalación, el mismo equipo puede ser utilizado en más de una de las tres categorías. La versatilidad se convierte en una consideración esencial para la selección de equipo en situaciones en las cuales será utilizado para más de una sola función.

Funciones relativas al suelo:

La excavación, el manejo y la compactación de los suelos utilizados como sistema de impermeabilización o material de cobertura son los aspectos que deben considerarse cuando se determinan las funciones del equipo para el relleno. Los procedimientos y equipos utilizados para estas actividades difieren solo ligeramente de los utilizados para otras operaciones de movimiento de tierras. En consecuencia, el grado de mecanización y sofisticación del equipo disponible para el relleno sanitario, en una situación dada, no diferirá marcadamente de las actividades que son características en las operaciones de movimiento de tierras. Esta limitación se extiende a las variaciones en los procedimientos y requisitos específicos que se tienen que reunir, debido a las condiciones topográficas y características específicas del suelo. Por ejemplo, los equipos de ruedas, generalmente son eficientes para la excavación de suelos en los que predominan la arena, la grava, las arcillas limosas y los limos arcillosos. Por otra parte el equipo con cadenas o rieles es recomendable para trabajos en sitios que presentan problemas de accesibilidad y materiales difíciles de manejar. Otras variantes pueden ser de tipo estacionales. Si los suelos se van a mover en distancias menores a 100 m, los cargadores y bulldozers pueden servir perfectamente para ese propósito. Para distancias mayores se deben utilizar otros equipos.

Funciones relativas a los residuos.

Las funciones del equipo relacionadas con los residuos sólidos son el empuje, extendido, compactación y cobertura.

La función de compactación demanda atención total debido a sus efectos a muy corto y largo plazo sobre la operación del relleno y la velocidad y extensión de los asentamientos, principalmente porque tiene una influencia importante en la capacidad del relleno (Figura 8.7). El equipo pesado especialmente diseñado

para la compactación es aparentemente más efectivo y eficiente que el equipo ligero diseñado especialmente para el movimiento de tierras. Sin embargo, el peso puede ser significativamente compensado, incrementando el número de pasadas de equipo ligero sobre los residuos. El número de pasadas necesarias para obtener la compactación suficiente requerida también depende del contenido de humedad y de la composición de los residuos.

El equipo para el relleno debe ser resistente porque las condiciones para su uso se encuentran muy lejos de las ideales. Los radiadores presentan una alta frecuencia de saturación con partículas, lo que los daña considerablemente y el cuerpo y las partes operativas del equipo pueden dañarse por los residuos protuberantes o voluninosos. Las llantas, aún las de uso rudo, pueden resultar pinchadas o cortadas, reduciendo su vida útil.

Funciones de Apoyo.

Con respecto a las etapas inicial y subsecuentes de construcción del relleno, se necesitará equipo de apoyo para la instalación de los sistemas de control ambiental tales como las geomembranas impermeables y cubiertas, las instalaciones para el manejo de lixiviados y los venteos para gas.

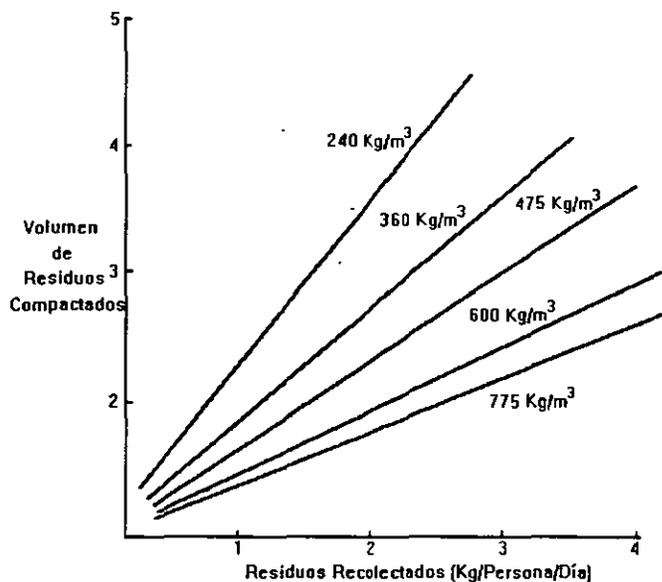
Las funciones de apoyo durante la fase de operación incluyen la extensión y el mantenimiento de los caminos hasta el frente de trabajo del relleno, control de polvos y combate de incendios. A menos que los vehículos de recolección y transporte estén equipados con sistemas de autodescarga, el equipo de soporte puede ser requerido para ayudar en la descarga. Si el trabajo es abundante la descarga se puede complementar manualmente. Este sería el caso con los vehículos de recolección más viejos. Generalmente algunas de las funciones de apoyo (tales como la ampliación y el mantenimiento de caminos) pueden ser realizadas durante la fase de operación mediante la maquinaria utilizada para la distribución y compactación.

Algunos aspectos especiales sugeridos para aplicarse en la operación de rellenos sanitarios son:

- La descarga se debe realizar a corta distancia del frente de trabajo, evitando que los vehículos recolectores y de transferencia interfieran con la actividades de la maquinaria pesada.
- Cercado completo de las máquinas (lateralmente y en la parte superior);

FIGURA 8.7

DENSIDAD Y VOLUMEN EN EL RELLENO



Relaciones entre la Densidad y el Volumen por Hectárea por Año

FUENTE :

CalRecovery, Inc., Handbook for the Design of Sanitary Landfills in Developing Countries, 1995.

- Resguardar carters;
- Proteger el radiador;
- Instalar alarmas;
- Montar guardias;
- Resguardar furgones vacíos (cargadores y tractor con cuchilla);
- Limpiadores anteriores y posteriores;
- Sistema para detectar en las máquinas baja presión de aceite y alta temperatura del agua; pesada carga de aire del sistema de limpieza;
- Ruedas especiales para compactación de rellenos, reemplazare, (en compactadores);
- Extinguidor
- El desmonte se realizará por etapas para no favorecer las tolvaneras.
- Uso de Tractores de Cadenas

9. PROCEDIMIENTOS DE CONTROL DE ASENTAMIENTOS LIXIVIADOS Y BIOGAS.

9.1 Procesos de Descomposición de los Residuos

Antes de analizar las prácticas de manejo de los lixiviados y biogás, es importante comprender de manera general los principios de la descomposición de los residuos dentro del relleno sanitario. El objetivo de comprender dicho proceso, se basa en lo siguiente:

- ◆ La localización y el diseño de las instalaciones están apoyadas en los impactos ambientales potenciales derivados de los productos que resulten de la descomposición.
- ◆ Las prácticas de operación afectan directamente la velocidad de la descomposición de los residuos sólidos.
- ◆ Los efectos adversos pueden ser planeados para minimizar sus consecuencias; y
- ◆ La viabilidad de la clausura y post-clausura es seriamente afectada también por los productos generados durante la descomposición de la materia orgánica.

Todos los residuos sólidos sufren cierto grado de descomposición, pero la fracción orgánica es la que sufre los cambios más importantes. Los subproductos de la descomposición están integrados por líquidos, gases y sólidos. La descomposición se lleva a cabo a través de procesos químicos y biológicos, como se mencionó en el Capítulo 2 de este manual. En la Cuadro 8.1, se presentan las diferentes categorías de residuos, los procesos y los subproductos generados.

CUADRO 9.1		DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS	
RESIDUOS	PROCESOS	SUBPRODUCTOS	
Materiales orgánicos (papel, alimentos, trapo, etc.)	Biológico (Microorganismos)	Líquidos, gases y sólidos.	
Residuos inorgánicos (metales)	Químico (Oxidación)	Compuestos de metales	
Otros residuos	Biológicos y Químicos	Según el tipo de residuos	
FUENTE :	Governmental Collection and Disposal Association, Inc., Training Course Manual, Managing Sanitary Landfill Operation, 1988.		

9.1.1 Velocidad de la descomposición

Hay diferentes factores que afectan la velocidad de descomposición de los residuos sólidos. Estos incluyen las características físicas, químicas y biológicas de los residuos, tales como :

- ◆ Tamaño de partícula.
- ◆ Forma de partícula
- ◆ Densidad
- ◆ Composición.
- ◆ Componentes químicos.
- ◆ Número y distribución de microorganismos
- ◆ Oxígeno
- ◆ Humedad.
- ◆ Temperatura.
- ◆ pH

Debido a la complejidad de las reacciones potenciales e interacciones, la cantidad, la velocidad de generación y los componentes químicos de los subproductos no puede ser fácilmente determinados. Sin embargo, en la mayoría de las veces, es mejor diseñar y operar las instalaciones para reducir la generación de los mismos.

9.1.2 Efectos de la descomposición.

Hay tres principales eventos que ocurrirán en el relleno sanitario por la degradación de los residuos sólidos :

- HUNDIMIENTOS Y ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES.
- GENERACIÓN Y MIGRACIÓN DE BIOGAS.
- GENERACIÓN Y MIGRACIÓN DE LIXIVIADOS.

9.2 Hundimientos y Asentamientos Diferenciales.

Este es el problema más obvio y más fácil de controlar.

9.2.1 Hundimientos.

Los hundimientos (asentamientos uniformes o fallas) de el relleno ocurren lentamente con el tiempo y éste es causado por:

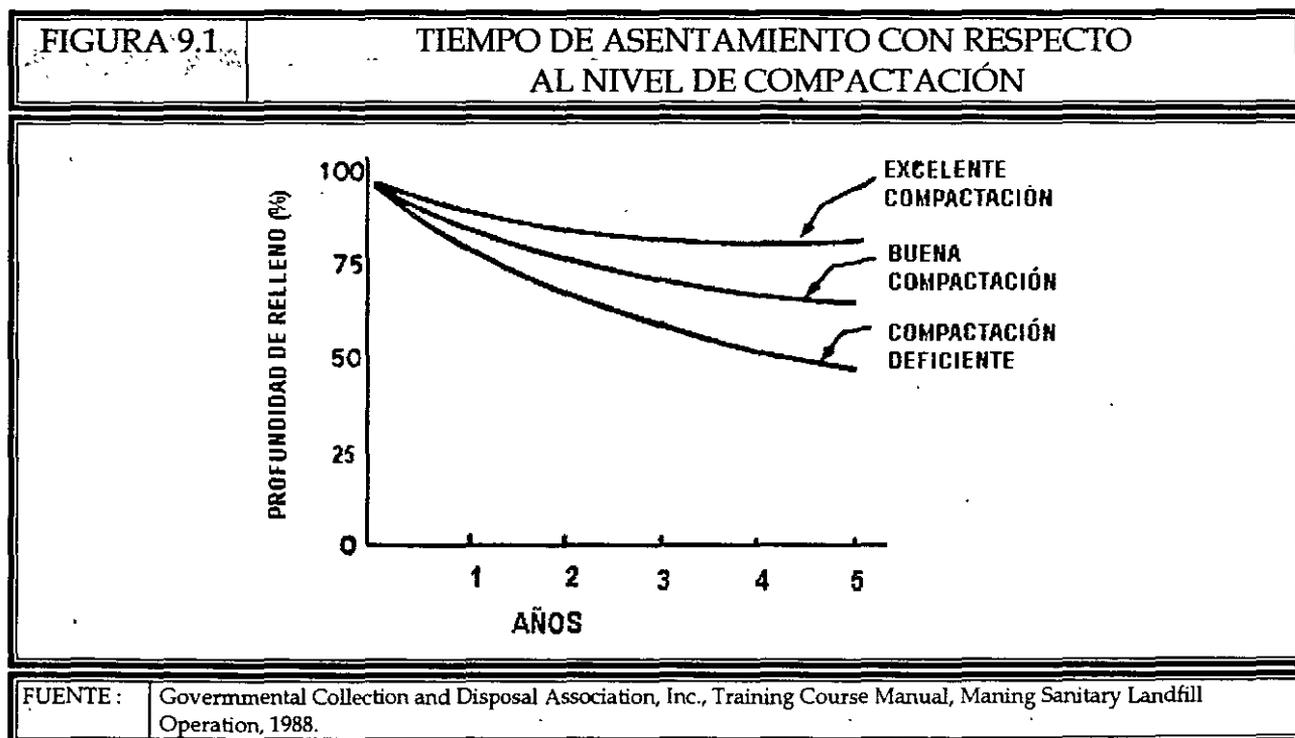
- ◇ Peso del relleno (con respecto a la altura).
- ◇ Descomposición de los residuos sólidos (disminución del volumen)
- ◇ Compactación deficiente.

El control se efectúa por medio de la compactación de los residuos sólidos. En la Figura 9.1, se presenta el asentamiento potencial con respecto al tiempo, basado en el grado de compactación.

9.2.2 Asentamientos diferenciales.

Los asentamientos de ciertas áreas rellenas son llamados asentamientos diferenciales y originan depresiones de diversos tamaños, su ocurrencia se da de manera aleatoria a través del tiempo. Los problemas básicos creados por los asentamientos diferenciales incluyen el encharcamiento de agua, incrementando la generación de lixiviados, la producción de biogás y la reducción del crecimiento de especies vegetales. Los asentamientos diferenciales son provocados por:

- ◆ Tráfico vehicular
- ◆ Compactación deficiente.
- ◆ Depósito de grandes cantidades de residuos orgánicos a lado de residuos inorgánicos e inertes (diferentes velocidades de degradación).
- ◆ Llenado irregular de las celdas.
- ◆ Asentamiento de materiales o el llenado de huecos provocados por la descomposición.



9.2.3 Control de asentamientos.

Los métodos de control de asentamientos incluyen:

- Buena compactación
- Separado o recuperación de materiales de los residuos voluminosos.
- Compactación de los residuos voluminosos lo más posible
- Mantener el área de trabajo liso y uniforme.
- Acondicionamiento de caminos con materiales inertes.
- Nivelación de áreas para favorecer los escurrimientos.
- Llenar las depresiones con material de relleno si estas son evidentes.
- Durante la construcción del sitio, las grandes depresiones pueden ser rellenadas con residuos fácilmente manejables (domiciliarios) para renivelar.

9.2.4 Identificación de la presencia de asentamientos.

La identificación de los problemas de asentamientos se hace a través de la observación directa sobre las áreas rellenadas.

- ◆ Agrietamiento en la cubierta
- ◆ Depresiones visibles.
- ◆ Fracturas profundas.
- ◆ Estancamiento de agua.

9.3 Manejo de Lixiviados.

Cuando el agua pasa (percola) a través de varios materiales, remueve algo de los sólidos, a esta agua y lo que contiene se llaman lixiviado.

El lixiviado es de aspecto desagradable, comúnmente tiene mal olor y puede contaminar las aguas subterráneas y superficiales. Contiene materia orgánica e inorgánica. Algunos de estos materiales son tóxicos a los humanos y los animales. Esto significa que el lixiviado se debe mantener alejado de lagos y corrientes, así como del agua subterránea que puede consumir la gente.

La producción de lixiviados se puede prevenir:

- MANTENIENDO LOS LÍQUIDOS FUERA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS**
- MANTENIENDO EL AGUA DE LLUVIA FUERA DEL RELLENO**

La legislación (en países desarrollados) requiere que los lixiviados que hayan sido generados, se recolecten y traten para su disposición final. Este requerimiento dio como resultado la exigencia de dos o más capas de impermeabilización en el fondo de los rellenos. En un sistema de doble capa impermeable se requiere también de un sistema de detección de fugas. Un relleno diseñado y construido con doble capa impermeable tiene una muy baja probabilidad de que el lixiviado pueda escapar, pero existe el riesgo.

Se han probado también capas impermeables hechas con materiales naturales tales como arcilla fina, o sintéticos como plásticos. En el futuro los más utilizados serán los plásticos.

Es necesario perforar pozos de monitoreo de agua subterránea alrededor del relleno. Los requerimientos básicos son de un pozo aguas arriba del área de relleno y tres aguas abajo. Las muestras colectadas de estos pozos se analizan. Esto se hace para asegurar que el lixiviado no llegue al manto freático.

El estancamiento del agua causará el ingreso de más agua al relleno. Las causas más comunes del estancamiento son:

- Depresiones en la superficie del relleno.
- Prácticas inadecuadas de construcción y fallas del sistema de impermeabilización en la reproducción del contorno de superficies planas y pendientes, así como en la operación donde se llega a obstruir el drenaje.

9.3.1 Migración de Lixiviados

Las buenas prácticas de operación pueden resultar en una reducción de la generación de lixiviados. No hay técnicas que eliminen absolutamente la generación de lixiviado y éste no representa ningún problema, a menos que migre desde el punto de generación hacia las aguas superficiales o subterráneas.

Características de Migración

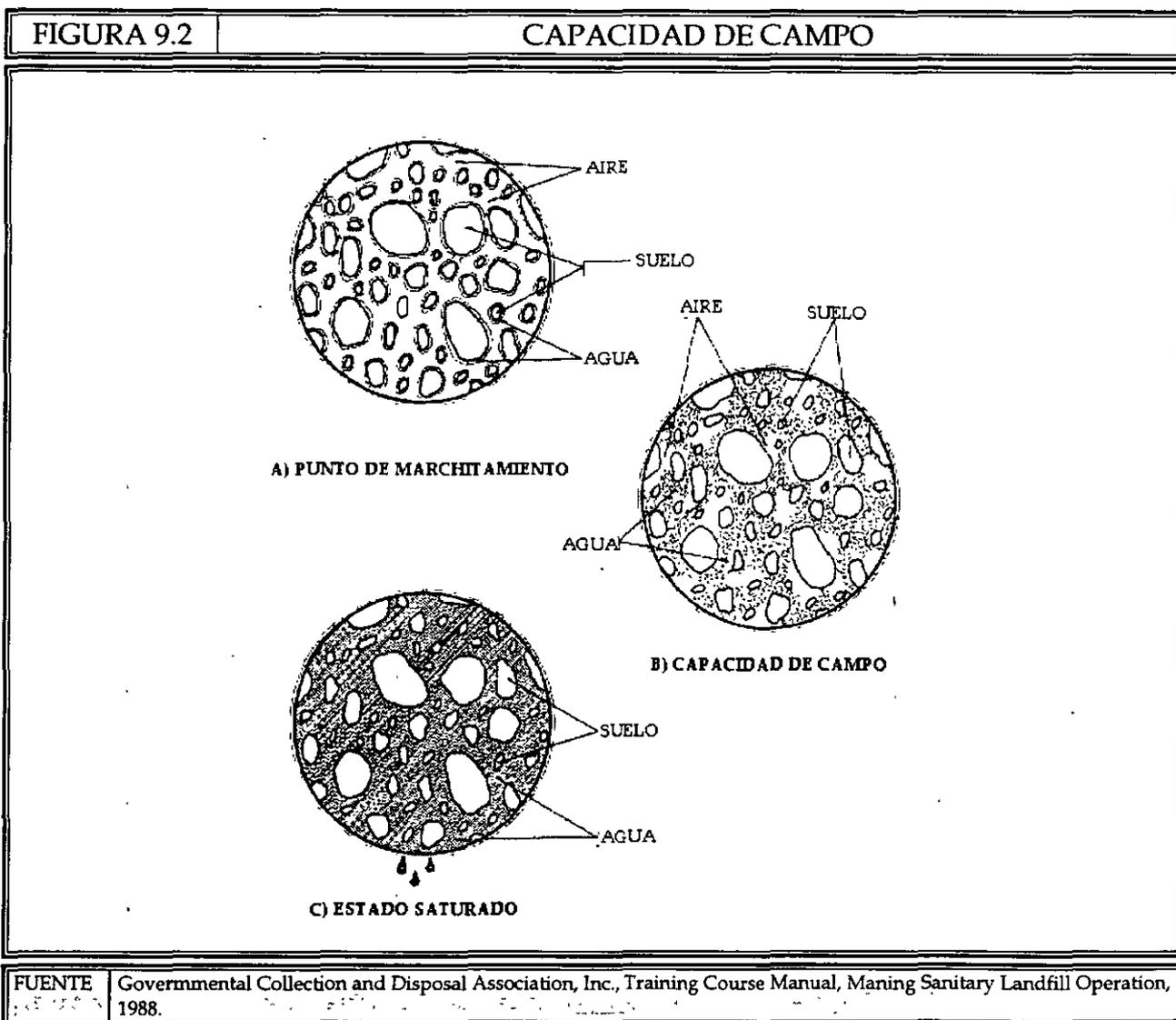
La migración de lixiviados ocurre cuando se satura una condición conocida como Capacidad de Campo. Dicha condición se refiere a la capacidad de un material para retener humedad libre en contra de la fuerza de gravedad. Una vez que se alcanza la capacidad de campo, la migración de lixiviados puede iniciar. Capacidad de campo no es lo mismo que saturación. Saturación significa que

todos los espacios libres (de otra forma ocupados por aire) están llenos con agua. En la Figura 9.2, se ilustra el fenómeno de la capacidad de campo.

Procesos de Migración que pueden ocurrir:

La migración se puede dar cuando cualquier porción del relleno alcanza su capacidad de campo o desde los vacíos entre los residuos.

El lixiviado también puede migrar a la superficie del suelo (base del relleno) o hasta el agua subterránea (normalmente a lo largo de pendientes o escurrimientos). A lo largo de la vía de menor resistencia dentro del relleno y en el suelo circundante.



FUENTE

Governmental Collection and Disposal Association, Inc., Training Course Manual, Managing Sanitary Landfill Operation, 1988.

Descarga Superficial del Lixiviado

La descarga superficial normalmente ocurre a lo largo de la base de taludes, en el punto más débil en un sistema de cubierta o donde el suelo tiene la mayor permeabilidad. El uso de suelos impermeables como cubiertas diarias o intermedias puede originar escurrimientos a los lados del relleno. dichos escurrimientos superficiales pueden producir:

- ◆ Olores y condiciones desagradables
- ◆ Contaminación potencial del agua superficial
- ◆ Infiltración del lixiviado al agua subterránea
- ◆ Impacto a la flora del sitio

Si se presenta un escurrimiento, generalmente aparecerá como una descarga oscura, de color café rojizo y olor fétido. Frecuentemente aparecen burbujas en el escurrimiento. Una vez que la descarga se detiene, el suelo presenta una mancha de color café rojizo.

El control de las descargas superficiales se realiza mediante:

- Control de la generación de lixiviados.
- Excavando zanjas alrededor del escurrimiento y rellenándola con suelo de textura fina y bien compactado para interrumpir el flujo.

Descarga de Lixiviado al Agua Subterránea

La contaminación del agua subterránea se presenta si el lixiviado llega a alguno de estos cuerpos. Un método utilizado, para detectar la migración, es el monitoreo de la humedad del suelo bajo el relleno con lisímetros. Dicho monitoreo se efectúa principalmente para evaluar la calidad del agua, con respecto a la presencia del lixiviado.

Es importante diseñar el programa de monitoreo al mismo tiempo que se diseña el relleno, tomando en cuenta las etapas de construcción.

Control de la Migración de Lixiviados

La ubicación adecuada del sitio, el diseño y la construcción pueden dar seguridad en el control de la migración de lixiviados. La infraestructura necesaria incluye sistemas de impermeabilización empleando materiales de baja permeabilidad

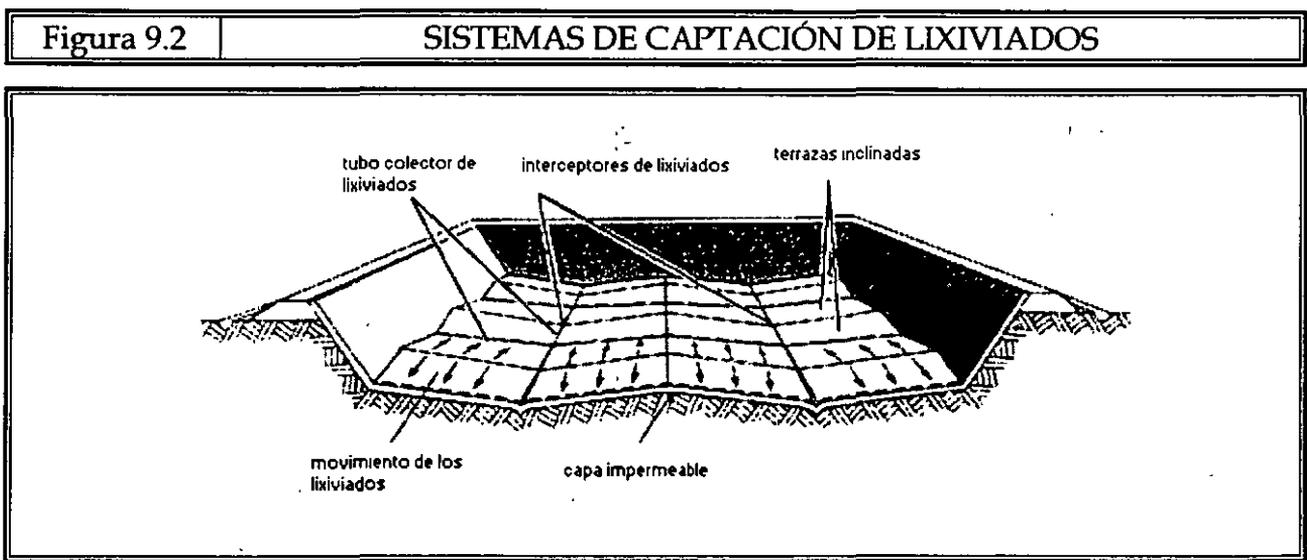
(naturales y/o sintéticos), colocados con cierta pendiente para conducir por gravedad el lixiviado a los tubos colectores. Estos tubos colectan el lixiviado para su posterior extracción y tratamiento. La operación adecuada de dichas instalaciones, la colocación de cobertura final de acuerdo a las especificaciones del proyecto, y el mantenimiento de la cubierta vegetal reducirán migración de lixiviado.

Selección de Sitio

En México, generalmente se han utilizado para la disposición de residuos sólidos, sitios inadecuados como: minas de materiales permeables, cauces de ríos, hondonadas y barrancas, principalmente; los cuales por el tipo de suelo, ubicación, etc., se han convertido en focos de contaminación de alto riesgo para los seres vivos.

Es por ello que las legislaciones actuales no permiten que los rellenos sanitarios se ubiquen en suelos que faciliten la infiltración de los lixiviados al manto freático; por lo que en la mayoría de los casos tanto los sistemas naturales de impermeabilización hechos con suelos arcillosos, los sistemas artificiales o combinaciones de ambos son necesarios para controlar dicha migración de lixiviados. Aún en ausencia de requisitos legales que exijan sistemas de impermeabilización, las prácticas adecuadas dictarán casi siempre el uso de sistemas de impermeabilización.

En la Figura 9.2 se ilustran los conceptos de un sistema de colección de lixiviados típico.



Impermeabilización con Materiales Naturales.

El uso de materiales naturales requiere de consideraciones especiales para asegurar que:

La permeabilidad del suelo iguale o exceda los estándares legislados.

La densidad del suelo en el sitio sea comparable a la utilizada en la prueba para determinar el coeficiente de permeabilidad.

El espesor del suelo sea el adecuado para proporcionar al sitio la seguridad establecida por el diseñador.

Impermeabilización con Materiales Geosintéticos (sistemas de membrana flexible).

El tipo geosintéticos utilizados pueden ser: georedes, geotextiles, geomallas y geomembranas. Dichos geosintéticos deben ser compatibles con las condiciones físicas de la obra, además de cumplir con un alto control de calidad tanto del mismo material, como de su instalación, algunas fallas que se pueden presentar en dichos materiales, son:

- pinchadura.
- abrasión.
- raspones.
- organismos biológicos.
- asentamientos.
- pérdida de plasticidad.
- choque térmico (Stress).
- luz ultravioleta/luz infrarroja.

Los geosintéticos más frecuentemente utilizados pueden ser fabricados de:

- polietileno clorado.
- polietileno clorosulfonado.
- polietileno de alta densidad.
- cloruro de polivinilo.

Impermeabilización

No existen los sistemas totalmente impermeables. La migración normal del lixiviado a través de las capas impermeables se llama "permeación" para distinguirla de las fugas.

La mayoría de los sistemas convencionales de impermeabilización están diseñados con sistemas de colección y remoción de lixiviados que disminuirán el tirante de los líquidos sobre la superficie impermeable hasta una altura de aproximadamente de 15 cm. Bajo estas condiciones, un sistema de impermeabilización cuidadosamente construido que contenga una capa de 30 cm de arcilla colocada y compactada, con una permeabilidad en el sitio de 1×10^{-7} cm./seg., mantendrá una permeación de aproximadamente 150 m³/ha-año, de lixiviado. Sin embargo, el agrietamiento en las arcillas debido a una mala compactación o al resecamiento y el fisuramiento pueden favorecer una mayor fuga de dichos lixiviados.

En contraste una capa de geomembrana sintética de 40 mil (0.0035 ft) deberá permitir no más de 1 m³/ha-año de permeación cuando el tirante máximo de lixiviado sobre la superficie impermeable sea de 15 cm.

No obstante que los geosintéticos tengan propiedades de alta resistencia; no dejan de ser susceptibles a sufrir daños durante su traslado e instalación en el sitio; se considera que si la geomembrana llega a tener 20 orificios de aproximadamente 2 cm. de diámetro por ha., reduce su eficiencia de impermeabilización a un valor similar al de una capa de arcilla de 30 cm. Por otra parte 16 agujeros del tamaño de una cabeza de alfiler pueden ser suficientes para dañar una geomembrana. La instalación de estos sistemas sintéticos de impermeabilización sin que se presenten esas imperfecciones es casi imposible. Algunos daños durante la construcción se deben prevenir.

Diseño de Capas impermeables.

Los sistemas convencionales de impermeabilización para rellenos se conforman por capas de arcilla o membranas sintéticas para impedir la migración del lixiviado. Los sistemas compuestos incluyen una capa de arcilla sobre una membrana sintética.

Los sistemas más importantes de impermeabilización son:

- capa natural de arcilla.
- capa de arcilla compactada.
- geomembrana sintética sencilla.
- sistema doble de geomembrana sintética/arcilla.
- sistema compuesto.
- doble sistema compuesto.

Los diferentes sistemas varían enormemente en su capacidad para contener el lixiviado y en su costo de inversión. En la selección de un sistema de impermeabilización, el diseñador de rellenos debe evaluar las necesidades y condiciones específicas y el grado de contención requerido para prevenir la contaminación del suelo o el agua subterránea. También debe preocuparse de las tendencias nacionales y regionales en la legislación de los rellenos que puede influir en gran medida las obligaciones asociadas con el proyecto.

Minimización de fugas.

Las fugas son el resultado de imperfecciones en los sistemas de impermeabilización. Las fugas se pueden presentar tanto en los sistemas construidos con arcillas como en los que utilizan materiales sintéticos. La tasa de flujo en las fugas es directamente proporcional a:

- La altura del lixiviado sobre la superficie impermeable.
- El tamaño de la imperfección.
- La permeabilidad de las capas subyacentes al sistema de impermeabilización.

La primera acción para evitar las fugas de lixiviados, consiste en efectuar una instalación bajo una estricta supervisión. Las pruebas constructivas y destructivas de los sistemas de impermeabilización, conjuntamente con especificaciones de construcción a detalle, son esenciales para eliminar los problemas asociados con materiales de mala calidad, mano de obra deficiente y daños accidentales.

Un método alternativo para reducir las fugas es la construcción de una doble capa impermeable. La doble capa incorpora dos capas de idéntico diseño, una inmediatamente encima de la otra. Comúnmente se encuentra doble geomembrana sintética o doble capa de arcilla en los diseños actuales de rellenos sanitarios. La capa superior se identifica como capa primaria. La capa inferior como capa secundaria. Las fugas a través de la capa impermeable superior o primaria serán una pequeña fracción del total del lixiviado-generado. La altura

del nivel de lixiviado sobre la capa impermeable inferior o secundaria siempre será mucho menor que aquella que se dé en la capa impermeable primaria. La efectividad de las dobles capas es reforzada por la probabilidad de que una falla en la capa impermeable secundaria no caerá directamente bajo una falla en la capa primaria. En la práctica, se mejora en alrededor de 10 veces la eficiencia de impermeabilización con las dobles capas si se les compara con los sistemas de capa sencilla.

Tratamiento de Lixiviados.

Un sistema de colección de lixiviados se construye con el fin de utilizarse para desplazar el lixiviado del relleno. El proceso consiste en coleccionar, bombear y conducirlo hacia una planta municipal de tratamiento de aguas residuales o para su manejo en el mismo sitio.

Sistemas de Tratamiento de Lixiviados.

Hay varias opciones de tratamiento de lixiviados. La selección del proceso de tratamiento depende de la caracterización final del lixiviado. Las opciones de disposición caen en cualquiera de las cuatro categorías siguientes:

- ◆ Descarga directa a un cuerpo receptor de aguas.
- ◆ Descarga a una planta de tratamiento pública.
- ◆ Recirculación al relleno.
- ◆ Aplicación o tratamiento sobre el suelo.

La recirculación normalmente no utiliza ningún tipo de tratamiento. Por otra parte, el tratamiento extensivo es normalmente necesario para impedir la descarga del lixiviado a las aguas superficiales. Si el lixiviado se descarga una planta de tratamiento pública, el grado de tratamiento preliminar depende de la capacidad de la planta y de lo que acepte el operador de la misma.

Recirculación del Lixiviado.

El tratamiento de lixiviados puede ser complementado por la recirculación de ese lixiviado de regreso al interior de las celdas del relleno. Esta técnica también tiene el beneficio de acelerar la estabilización de los materiales orgánicos presentes. El

uso de la recirculación no elimina la necesidad final de tratamiento. Eventualmente, el lixiviado en exceso tendrá que ser removido y tratado.

Se pueden utilizar tres diferentes tipos de sistemas de recirculación de lixiviados: irrigación por aspersión, flujo superficial e irrigación por inyección.

Irrigación por Aspersión:

Se realiza mediante el bombeo periódico del lixiviado a través de las boquillas de aspersión situadas a intervalos de 15 a 30 m. de separación a lo largo y ancho del relleno. La ventaja de la irrigación por aspersión es que el lixiviado puede quedar sujeto a tratamiento por aereación durante el proceso de aspersión y vía adsorción por el material de cobertura durante su infiltración.

Flujo Superficial:

Es una técnica en la que se utilizan trincheras, tubos sobre la superficie del relleno o campos de infiltración para distribuir el lixiviado recirculado. El lixiviado es periódicamente bombeado a los sistemas de distribución y se permite su infiltración al interior del relleno. El tratamiento se da en la superficie mediante medios biológicos, adsorción y absorción.

Irrigación por Inyección:

Los lixiviados se distribuyen al interior del relleno mediante pequeños tubos o medios de infiltración (porosos), enterrados bajo la cubierta final. Ya que el sistema se instala bajo la superficie, la irrigación no es afectada por las condiciones climatológicas y tiene la ventaja de minimizar los problemas potenciales de olores.

A pesar de las ventajas potenciales de la recirculación de lixiviados, no se utiliza ampliamente. Las desventajas de la recirculación de lixiviados incluyen altos costos de inversión, concentraciones crecientes de metales en el lixiviado, saturación de la capacidad de campo, lo que puede finalmente detener la actividad biológica y la desaprobación legal en muchos casos de este procedimiento. La actitud legislativa, en los países desarrollados, puede ser el resultado de las tendencias recientes para prohibir el manejo de líquidos en los rellenos sanitarios.

Tecnologías de Tratamiento de Lixiviados.

Las tecnologías para el tratamiento de lixiviados pueden clasificarse de manera general en dos categorías: biológica y fisicoquímica. Hoy existe la tecnología adecuada para tratar en forma efectiva los lixiviados provenientes de los rellenos para residuos sólidos municipales. Los factores que requieren atención especial tanto en el diseño como en la operación son: la dificultad potencial para obtener una caracterización representativa de los lixiviados, la variación de la calidad de los lixiviados con respecto al tiempo y la falta de datos basados en casos de tratamiento de lixiviados anteriormente implementados.

9.4 Manejo del Biogás.

El biogás se produce de la degradación de los materiales orgánicos. El proceso se llama descomposición anaerobia. Los dos principales gases formados son metano (CH_4) y bióxido de carbono (CO_2). El metano es del grupo de los alcanos, una mezcla del 5 al 15 % de metano en aire puede causar una explosión si existe una fuente de ignición.

El biogás se puede desplazar por el subsuelo e inclusive fuera del relleno. Si el gas se acumula dentro o bajo estructuras tales como edificios, drenajes u otros sistemas de conducción, puede ocasionar explosiones; es por ello que se construyen pozos de monitoreo en perímetro del sitio, con el fin de evaluar la cantidad de biogás que puede acumularse en dichas zonas no controladas.

Existe una creciente preocupación acerca de la liberación sin control del gas proveniente de los rellenos sanitarios a la atmósfera, por ser una amenaza para la salud humana y el ambiente, por ello existe una creciente presión para que el biogás sea extraído y por lo menos venteadado.

Muchos rellenos en el mundo ya cuentan con sistemas para control del biogás. Esto asegura a que se minimice su emigración de manera incontrolada. El gas colectado puede ser incinerado en un quemador o utilizado como fuente de energía alterna en diversos usos, por ejemplo: para la calefacción de espacios cerrados o para el funcionamiento de equipos, como combustible doméstico o industrial, etc.

9.4.1 Biogás.

La cantidad y composición del biogás depende entre otros factores, del tipo de materia orgánica contenida en los residuos sólidos, del grado de descomposición de ésta, etc. Se considera que los residuos con una gran fracción de material orgánico de fácil degradación producirán mayor cantidad de biogás. La tasa de producción de biogás es gobernada por la velocidad a la que los residuos se descomponen, así como a factores ambientales. Cuando la descomposición cesa, la producción de gas también se termina. La producción de gas comienza casi inmediatamente después de que los residuos sólidos son confinados en el relleno. Además del metano y el bióxido de carbono, en el biogás se pueden encontrar otros componentes, de los cuales se deriva su olor característico, así como orgánicos no metánogenicos que pueden impactar la calidad del aire cuando son desalojadas hacia la atmósfera.

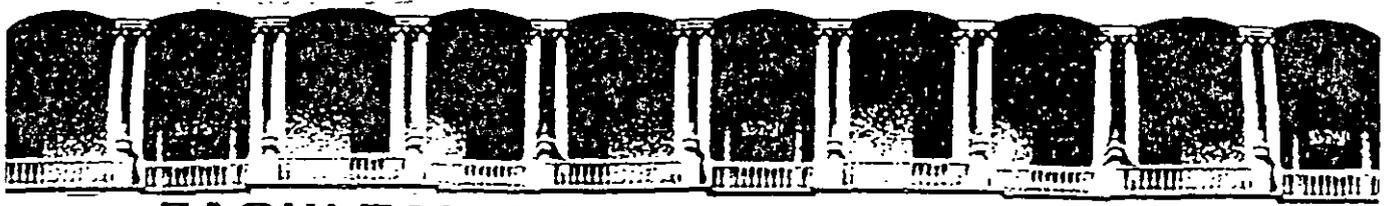
En la Cuadro 9.2, se presentan las características típicas de los componentes del biogás.

CUADRO 9.2 COMPONENTES DEL BIOGAS	
COMPONENTE	% DEL COMPONENTE (VOLUMEN, BASE SECA)
METANO	47.5
BIÓXIDO DE CARBONO	47.5
NITRÓGENO	3.7
OXÍGENO	0.8
HIDROCARBUROS PARAFINICOS	0.1
HIDROCARBUROS AROMÁTICOS Y CÍCLICOS	0.2
HIDROGENO	0.1
ÁCIDO SULFHÍDRICO	0.01
MONÓXIDO DE CARBONO	0.1
COMPUESTOS TRAZAS	0.5
CAPACIDAD CALORÍFICA	300-550
GRAVEDAD ESPECIFICA	1.04
CONTENIDO DE HUMEDAD	SATURADO
TEMPERATURA (EN LA FUENTE)	41 °C

10. BIBLIOGRAFIA

1. British Columbia Ministry of Environment. Landfill Criteria for Municipal Solid Waste. Ministerio de Ambiente Suelos y Parques. División de Protección Ambiental, Rama de Reducción de Residuos Municipales, E.U.A. junio, 1993.
2. British Columbia Ministry of Environment. The Environmental Protection Compendium Guidelines for Environmental Monitoring at Municipal Solid Waste Landfill. Ministry of Environment, Lands and Parks. E.U.A. Enero 1996.
3. Browning-Ferris Industries. Mobius curriculum: Understanding the Waste Cycle. Recycled. Segunda Edición Houston, Texas, E.U.A. 1991.
4. Carroll County Landfills. Information for County Residents. Md, E.U.A. 1996
5. Caterpillar. Manual de Rendimiento. Edición 23. Peoria, Illinois, E.U.A. Octubre, 1992
6. Curso Internacional sobre Diseño y Disposición Final de Residuos Sólidos (Rellenos Sanitarios). Marzo 1994.
7. Environment Canada. Quality Assurance in Water Quality Monitoring. Ministerio de Suministro y Servicios. Canada. 1993.
8. Environmental Protection Agency (EPA). Decision-Makers Guide to Solid Waste Management. Noviembre, 1989 pp. 154.
9. Environmental Protection Agency. Design and Construction of Covers for Solid Waste Landfills. Cincinnati, Ohio, E.U.A. Agosto, 1979.
10. Environmental Protection Agency Seminars-design, Operation and Closure of Municipal Solid Waste Landfills. Washington, E.U.A. Abril, 1992.
11. Gartner Lee Limited. Leachate Assessment Field Manual. Preparado por el Ministerio de Ambientes, Suelos y Parques. Región Skeena. Febrero 1993.
12. I.S.W.A. Manual for the Design of Sanitary Landfills in Developed Countries. Preparado por CalRecovery. Cd. de México, Marzo 1994.

13. Jaramillo Perez, Jorge A. Relleno Sanitario Manual, Guía para el Diseño, Construcción y Operación. Medellín, Colombia, Abril 1988. Pp. 153.
14. Kreith, Frank. Handbook of Solid Waste Management. E.U.A. 1994.
15. Robinson, William D., P. E. The Solid Waste Handbook. Ed. John Wiley and Sons. Trumbull, Connecticut, E.U.A. 1986.
16. Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología. Manual de Rellenos Sanitarios. Pags. 335.
17. Solid Waste Association of North America. Manager of Landfill Operations Training Course. Manual de Curso. Publicación. No. Msw-D 2360 Gmisc 0005. Silver Spring, Maryland, E.U.A. Junio 1991.
18. Solid Waste Association of North America (SWANA). Training Sanitary Landfill Operating Personnel. Instructor Manual. Silver Spring, Maryland, E.U.A. 1993.
19. Tchobanoglous, George; Theisen, Hillary. Vigil, Samuel A. Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues. 1993.
20. USEPA. Sanitary Landfill Design and Operation. 1972.
21. Wilson, David C. Waste management Planning, Evaluation, Technologies. Oxford University Press New York, E.U.A. 1981.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

TEMA :

ANEXO

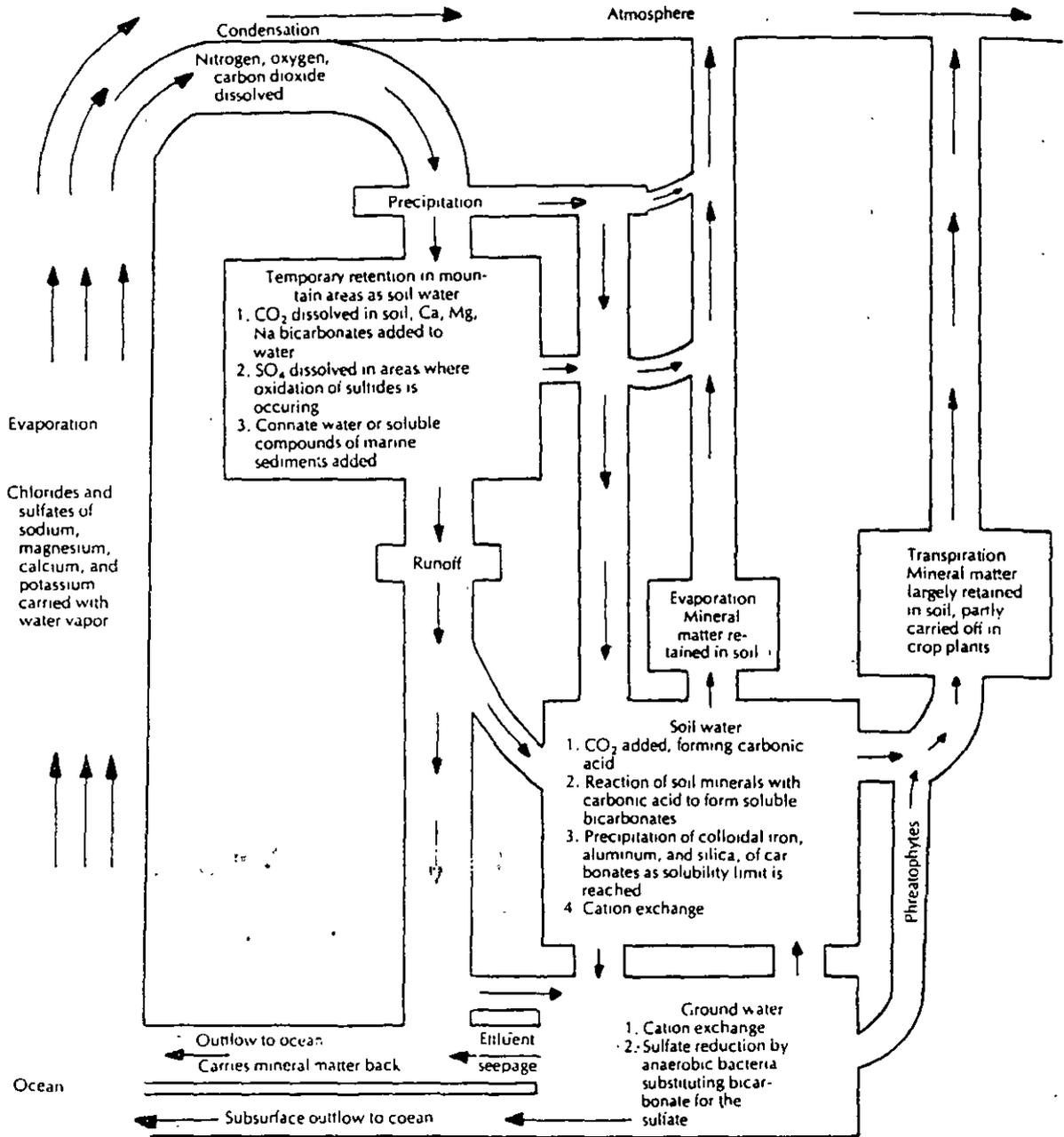
**DRA. MA. AURORA ARMIENTA HERNÁNDEZ
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE - OCTUBRE 1999**

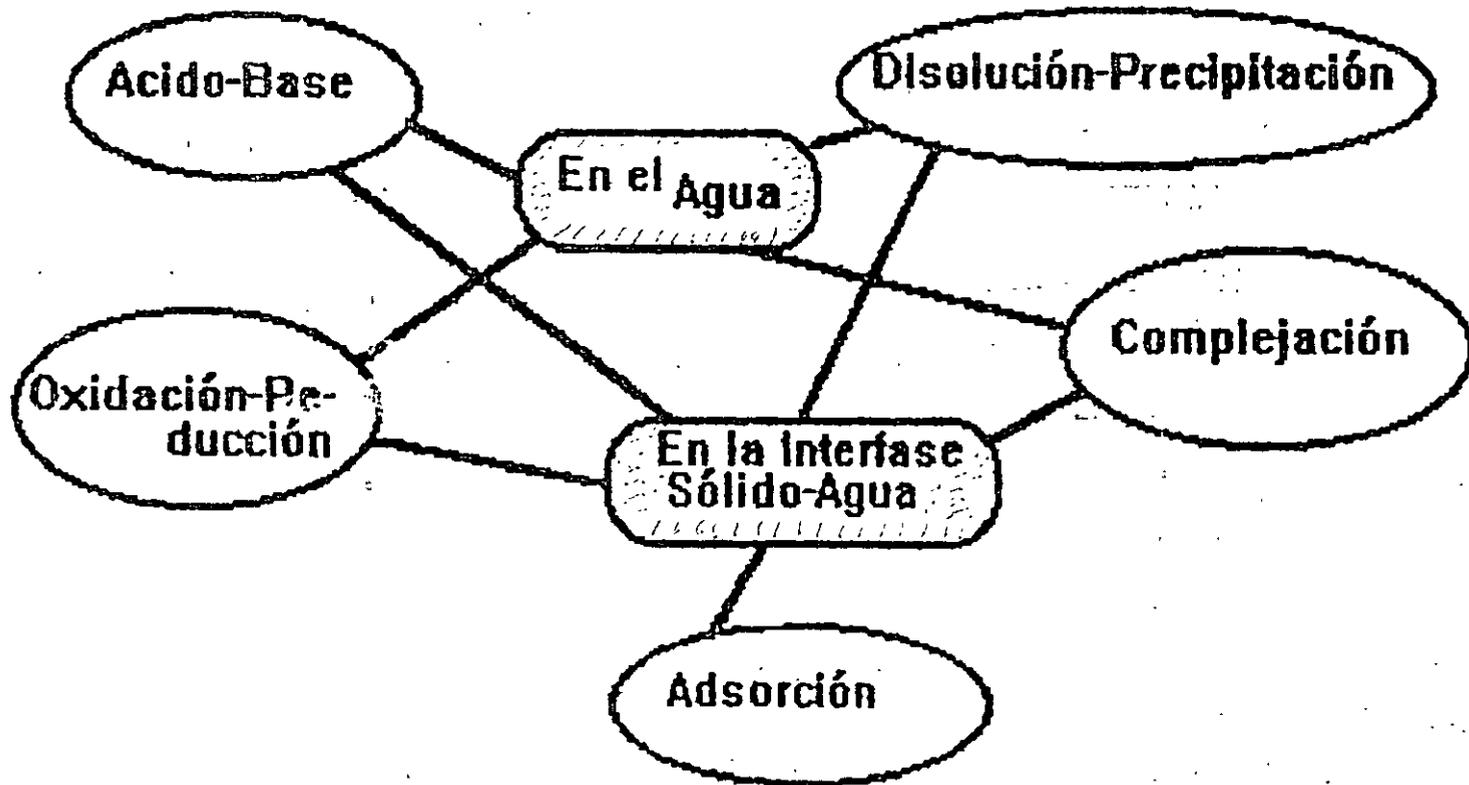
**XI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACION DE
ACUIFEROS**

**QUIMICA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS
(ACETATOS)**

Dra. Ma. Aurora Armienta H.
Septiembre 1999

FIGURE 6-3. GEOCHEMICAL CYCLE OF SURFACE AND GROUND WATER





Unidades para expresar la concentración
de una disolución

Nombre	Definición	Unidades más frecuentes
Por ciento en Peso (%) P / p)	Unidades en peso de soluto contenidas en 100 unidades en peso de disolución	$\frac{\text{gramos de soluto}}{100 \text{ g de disolución}}$
Concentración en Peso	Peso de soluto contenido en una unidad de volumen de disolución	$\frac{\text{gramos de soluto}}{\text{litro de disolución}}$
Partes por millón ppm	Unidades en Peso de soluto contenidos en 10^6 unidades en peso de disolución	$\frac{\text{miligramos de soluto}}{\text{kg de disolución}}$
% peso en volumen (% p/v)	Unidades en peso de soluto contenidas en 100 unidades en volumen de disolución	$\frac{\text{gramos de soluto}}{100 \text{ ml de disolución}}$
Molaridad (M)	Número de moles de soluto contenidas en 1 litro de disolución	$\frac{\text{moles de soluto}}{\text{litro de disolución}}$
Normalidad (N)	Número de equivalentes de soluto contenidos en 1 litro de disolución	$\frac{\text{equivalentes de soluto}}{\text{litros de disolución}}$
Formalidad (F)	Número de pesos fórmula gramo de soluto por litro de disolución	$\frac{\text{pesos fórmula g de soluto}}{\text{litro de disolución}}$
Molalidad (m)	Número de moles de soluto por kg de disolvente	$\frac{\text{moles de soluto}}{\text{kg de disolvente}}$
Fracción molar de sustancia A (X)	Número de moles de A contenidos en el número total de moles	Adimensional

TABLA 9.2: SOLUBILIDAD DEL OXIGENO EN AGUA A 25°C.

<i>P</i> , Torr	Solubilidad, moles O ₂ por litro de H ₂ O = <i>M</i>	$\frac{M}{P} \times 10^6 \approx \text{const}$
175	0,000307	1,75
300	0,000500	1,67
414	0,000688	1,66
610	0,00100	1,64
760	0,00128	1,68

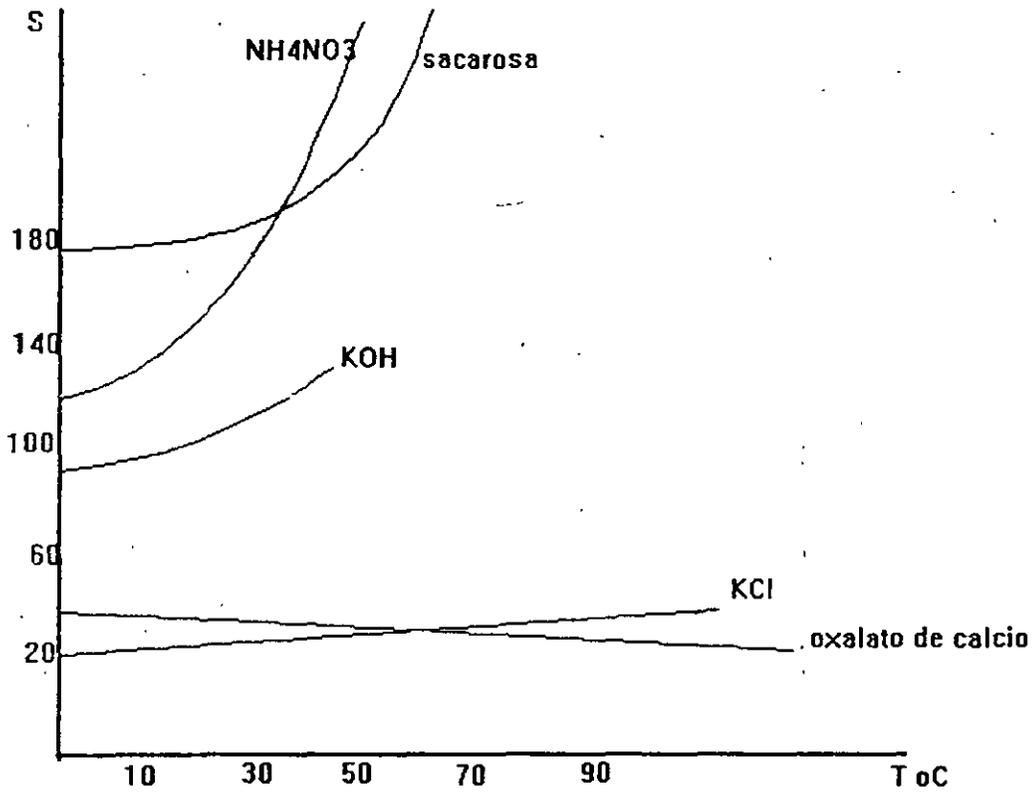
9.6 PROPIEDADES COLIGATIVAS 171

TABLA 9.3: EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA SOLUBILIDAD* DE LOS GASES EN AGUA**

<i>Gas</i>	<i>Temperatura</i> , °C				
	0	10	25	50	100
H ₂	0,000960	0,000873	0,000783	0,000717	0,000715
N ₂	0,00105	0,000830	0,000647	0,000485	0,000423
O ₂	0,00212	0,00170	0,00128	0,000933	0,000758
CO ₂	0,0765	0,0533	0,0343	0,0194	

* La solubilidad se expresa en moles de gas disueltas por litro de agua

** La presión del gas encima de la solución es 1 atm.

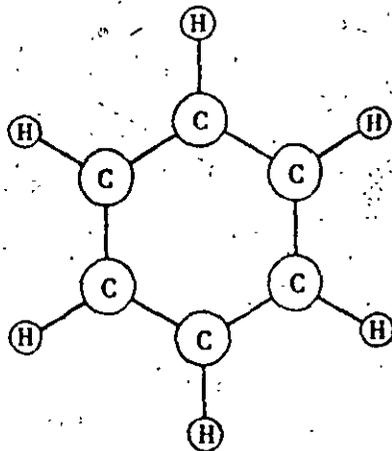


Solubilidad en Agua

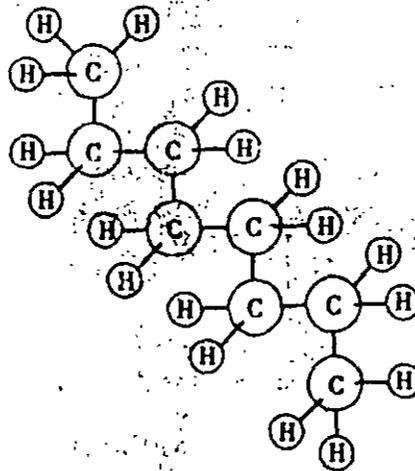
9.5 FACTORES QUE AFECTAN LA SOLUBILIDAD

FIGURA 9.4

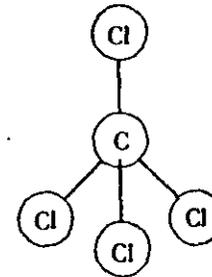
Algunas moléculas no polares



Benceno, C_6H_6
(Hexágono plano)



Octano, C_8H_{18}
(Cadena escalonada de 8 átomos de carbono)

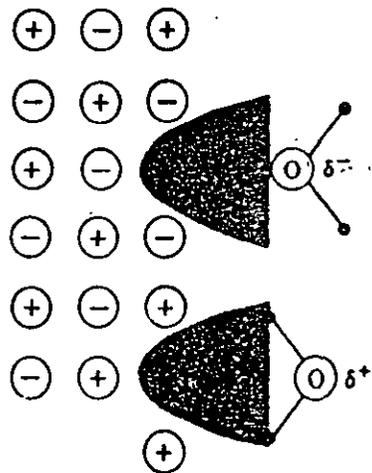


Tetracloruro de carbono, CCl_4
(Tetraedro regular de átomos de cloro)

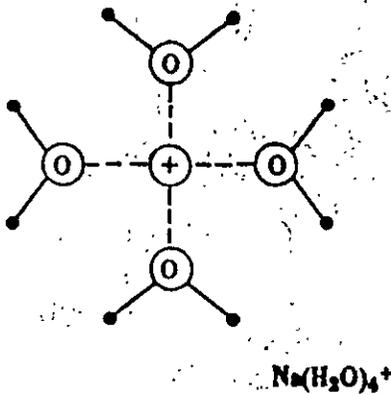
EL ESTADO DE DISOLUCION

FIGURA 9.5

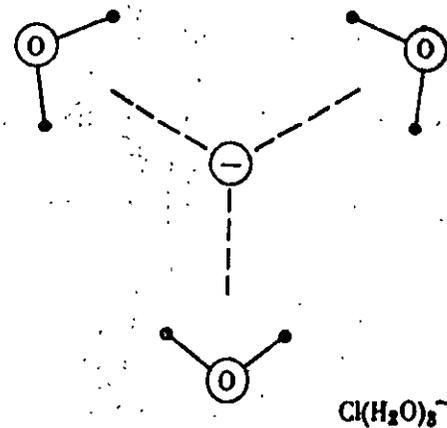
Mecanismo de disolución de un cristal iónico por un disolvente polar.



(a) Las moléculas de H_2O neutralizan la carga iónica y "liberan" los iones de la superficie.



(b) Las moléculas H_2O hidratan los iones en solución y neutralizan parcialmente su carga. Así se reduce la tendencia del Na^+ y el Cl^- a unirse nuevamente.



Debye-Hückel

$$I = 1/2 \sum m_i z_i^2$$

$$\log \gamma_i = -A z_i^2 \sqrt{I} \quad I < 10^{-2.3}$$

$$\log \gamma_i = -A z_i^2 \sqrt{I} / (1 + B a_0 \sqrt{I}) \quad I < 10^{-1}$$

$$\log \gamma_i = -A z_i^2 \sqrt{I} / (1 + B a_0 \sqrt{I}) + cI$$

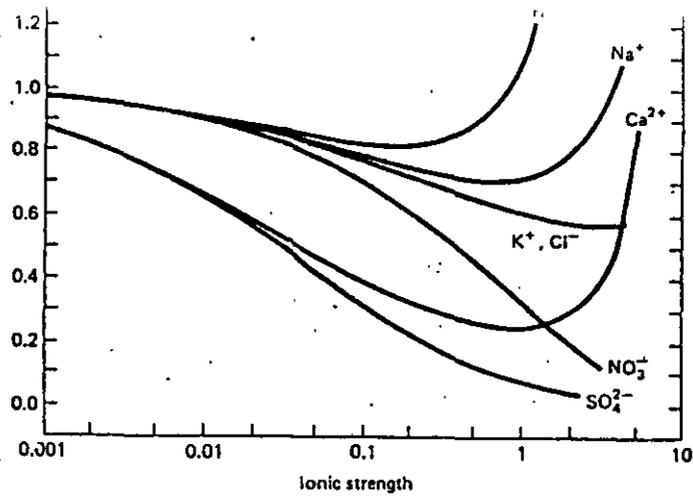


Figure 2-2 Approximate variation of activity coefficients with ionic strength (after Garrels and Christ 1965).

At higher ionic strengths the simple model fails because it requires an impossibly high concentration of anions around each cation, and vice versa. The equation can be modified to take account of the finite size of the ions, giving the equation

$$\log \gamma_i = \frac{-Az_i^2 \sqrt{I}}{1 + Ba_0 \sqrt{I}} \quad (2-6)$$

B is a constant depending only on P and T , and a_0 is, in theory, the hydrated radius of the particular ion. In practice, the value of a_0 is chosen to give the best fit to experimental data. Some values for the parameters in the Debye-Hückel equation are given in Table 2-1. Equation (2-6) is reasonably accurate up to ionic strengths of about 10^{-1} .

Table 2-1 Parameters for the Debye-Hückel equation at 1 atmosphere pressure (adapted from Manov et al. 1943; Klotz 1950).

$T(^{\circ}\text{C})$	A	$B(\times 10^{-9})$	$a_0(\times 10^8)$	Ion
0	0.4883	0.3241	2.5	NH_4^+
5	0.4921	0.3249	3.0	$\text{K}^+, \text{Cl}^-, \text{NO}_3^-$
10	0.4960	0.3258	3.5	$\text{OH}^-, \text{HS}^-, \text{F}^-$
15	0.5000	0.3262	4.0	$\text{SO}_4^{2-}, \text{PO}_4^{3-}, \text{HPO}_4^{2-}$
20	0.5042	0.3273	4.0-4.5	$\text{Na}^+, \text{HCO}_3^-, \text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7^-$
25	0.5085	0.3281	4.5	CO_3^{2-}
30	0.5130	0.3290	5	$\text{Sr}^{2+}, \text{Ba}^{2+}, \text{S}^{2-}$
40	0.5221	0.3305	6	$\text{Ca}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$
50	0.5319	0.3321	8	Mg^{2+}
60	0.5425	0.3338	9	$\text{H}^+, \text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+}$

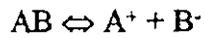
For higher ionic strengths, Eq. (2-6) can be modified by adding a further term,

$$\log \gamma_i = \frac{-Az_i^2 \sqrt{I}}{1 + Ba_0 \sqrt{I}} + CI \quad (2-7)$$

where C is another constant (Davies 1962). The additional term can be justified on theoretical grounds, or it can be justified as an empirical fit to experimental data. An important consequence of the additional term is that it predicts that activity coefficients should increase with increasing ionic strength at high ionic strengths, in accord with experimental observations (Fig. 2-2). Wood (1975) was able to use an expression similar to Eq. (2-7) to predict the solubilities of evaporite minerals in highly saline brines. He considered the mean activity coefficients of salts rather than single-ion activity coefficients, and used experimental data from simple systems to calculate an expression corresponding to the constant C .

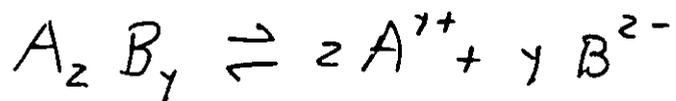
Other methods for calculating activity coefficients in concentrated solutions, such as the mean salt theory and Harned's rule, are given in the readings at the end of the chapter.

DISOLUCION-PRECIPITACION



Constante del Producto de Solubilidad

$$K_{ps} = [A^+] [B^-]$$



$$K_{ps} = [A^{y+}]^z [B^{z-}]^y$$

TABLA 6-1 Constantes del producto de solubilidad a 25°C°

Sólido	pK_{so}	Sólido	pK_{so}
Fe(OH) ₃ (amorfo)	38	BaSO ₄	10
FePO ₄	17.9	Cu(OH) ₂	19.3
Fe ₃ (PO ₄) ₂	33	PbCl ₂	4.8
Fe(OH) ₂	14.5	Pb(OH) ₂	14.3
FeS	17.3	PbSO ₄	7.8
Fe ₂ S ₃	88	PbS	27.0
Al(OH) ₃ (amorfo)	33	MgNH ₄ PO ₄	12.6
AlPO ₄	21.0	MgCO ₃	5.0
CaCO ₃ (calcita)	8.34	Mg(OH) ₂	10.7
CaCO ₃ (aragonita)	8.22	Mn(OH) ₂	12.8
CaMg(CO ₃) ₂ (dolomita)	16.7	AgCl	10.0
CaF ₂	10.3	Ag ₂ CrO ₄	11.6
Ca(OH) ₂	5.3	Ag ₂ SO ₄	4.8
Ca ₃ (PO ₄) ₂	26.0	Zn(OH) ₂	17.2
CaSO ₄	4.59	ZnS	21.5
SiO ₂ (amorfo)	2.7		

* Constantes de equilibrio para la reacción $A_xB_{y(z)} \rightleftharpoons zA^{x+} + yB^{z-}$.

Table 12.1 Solubility Product Constants for Different Salts at 25 °C

		pK ^{a,b}
<i>Carbonates</i>		
Ag ₂ CO ₃		11.09 (L)
BaCO ₃	witherite	8.3 (K) ^a
CaCO ₃	calcite	8.35 (K)
CaCO ₃	aragonite	8.22 (K)
CaCO ₃ · 6H ₂ O	ikate	6.38 (L)
CdCO ₃	octavite	13.7 (K), 12.0 (L)
CoCO ₃	sphaerocobaltite	10.0 (K)
CuCO ₃		9.63 (L)
Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃	malachite	33.8 (K), 33.2 (L)
Cu ₃ (OH) ₂ (CO ₃) ₂	azurite	66.5 (L)
FeCO ₃	siderite	10.7 (K), 10.2 (L)
HgCO ₃		22.6 (L)
Hg ₂ CO ₃	[Hg ₂ ²⁺][CO ₃ ²⁻]	14.0 (L)
MgCO ₃	magnesite	7.5 (K), 7.46 (L)
MgCO ₃ · 3H ₂ O	nesquehonite	5.6 (K), 4.67 (L)
MgCO ₃ · 5H ₂ O	lansfordite	4.54 (L)
MgCa(CO ₃) ₂	dolomite	17.9 (L)
MnCO ₃	rhodochrosite	9.3 (K), 10.1 (L)
NiCO ₃		6.9 (K)
PbCO ₃	cerussite	13.1 (K), 13.5 (L)
Pb ₂ CO ₃ Cl ₂	phosgenite	20.0 (L)
Pb ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂		46.8 (L)
SrCO ₃	strontianite	9.0 (K) ^a
UO ₂ CO ₃	[UO ₂ ²⁺][CO ₃ ²⁻]	10.6 (K)
ZnCO ₃	smithsonite	10.0 (20 °C, K), 10.2 (L)
<i>Sulfates</i>		
Ag ₂ SO ₄		4.81 (K, L)
KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	alunite	80.95 (L)
BaSO ₄	barite	10.0 (K)
CaSO ₄	anhydrite	4.5 (K), 4.41 (L)
CaSO ₄ · 2H ₂ O	gypsum	4.6 (K), 4.63 (L)
CdSO ₄		0.04 (L)
CdSO ₄ · 2H ₂ O		1.59 (L)
CuSO ₄		-3.72 (L)
CuSO ₄ · 5H ₂ O		2.61 (L)
Cu ₂ (OH) ₂ SO ₄	brochantite	68.6 (L)
FeSO ₄		-2.65 (L)
FeSO ₄ · 7H ₂ O		2.46 (L)
Fe ₂ (SO ₄) ₃		-2.89 (L)
KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	jarosite	96.5 (L)
HgSO ₄		3.34 (L)
Hg ₂ SO ₄		6.20 (L)
MgSO ₄		-8.18 (L)

Table 12.1 (continued)

		pK ^{a,b}
MnSO ₄		-3.43 (L)
MnSO ₄ · H ₂ O		-0.47 (L)
Mn ₂ (SO ₄) ₃		11.6 (L)
PbSO ₄	anglesite	7.8 (K), 7.79 (L)
SrSO ₄	celestite	6.5 (K)
ZnSO ₄	zinkosite	-3.41 (L)
<i>Sulfides</i>		
α-Ag ₂ S		49.01 (L)
β-Ag ₂ S		48.97 (L)
Ag ₂ S		50.1 (K)
Bi ₂ S ₃	bismuthinite	100.0 (K)
CuS	oldhamite	0.78 (L)
CdS	greenockite	27.0 (K, L)
CoS(α)		21.3 (K)
CoS(β)		25.6 (K)
Cu ₂ S	chalcocite	48.5 (K, L)
CuS	covellite	36.1 (K)
α-Fe _{0.95} S	pyrrhotite	17.4 (L)
α-FeS	troilite	16.2 (L)
FeS	troilite	18.1 (K)
FeS ₂	pyrite	42.5 (L)
FeS ₂	marcasite	41.8 (L)
Fe ₂ S ₃		88.0 (L)
α-HgS	cinnabar (red)	53.0 (K), 52.0 (L)
β-HgS	metacinnabar (black)	52.7 (K), 51.7 (L)
Hg ₂ S	[Hg ₂ ²⁺][S ²⁻]	54.8 (L)
MgS		-5.59 (L)
MnS	(green)	13.5 (K), 11.7 (L)
MnS	(pink) alabandite	10.5 (K), 12.8 (L)
MnS ₂	hauerite	81.4 (L)
MoS ₂	molybdenite	?
α-NiS		19.4 (K)
γ-NiS		26.6 (K)
PbS	galena	17.5 (K, L)
Sb ₂ S ₃	stibnite	90.8 (K)
SnS		25.9 (K) ^a
α-ZnS	sphalerite	24.7 (K, L)
β-ZnS	wurtzite	22.5 (K, L)
<i>Phosphates</i>		
Ag ₃ PO ₄		16.0 (L)
AlPO ₄	berlinite	19.0 (L)
AlPO ₄ · 2H ₂ O	variscite	22.1 (K, L)

Table 12.1 (continued)

		pK ^{a,b}
H ₂ K ₂ Al ₂ (PO ₄) ₆ · 18H ₂ O	K-taranakite	178.7 (L)
CaHPO ₄ · 2H ₂ O	brushite	6.57 (K, L)
CaHPO ₄	monetite	6.89 (L)
α-Ca ₃ (PO ₄) ₂		25.5 (L)
β-Ca ₃ (PO ₄) ₂	whitlockite	28.7 (K), 28.9 (L)
Ca ₉ H ₂ (PO ₄) ₆ · 5H ₂ O	octacalcium phosphate	80.6 (L)
Ca ₁₀ F ₂ (PO ₄) ₆	fluorapatite	119.2 (L)
Ca ₁₀ (OH) ₂ (PO ₄) ₆	hydroxyapatite	116.4 (L)
Cd ₃ (PO ₄) ₂		38.1 (L)
Cu ₃ (PO ₄) ₂		36.9 (K, L)
Cu(PO ₄) ₂ · 2H ₂ O		38.8 (L)
FePO ₄ (amorph)		21.6 (K)
FePO ₄ · 2H ₂ O	strengite	26.4 (K, L)
Fe ₃ (PO ₄) ₂ · 8H ₂ O	vivianite	36.0 (L)
Hg ₂ HPO ₄		12.4 (L)
KH ₂ PO ₄		0.21 (L)
K ₂ HPO ₄		-3.60 (L)
MgHPO ₄ · 3H ₂ O	newberyite	5.82 (L)
MgKPO ₄ · 6H ₂ O		10.6 (L)
MgNH ₄ PO ₄ · 6H ₂ O	struvite	13.2 (L)
Mg ₃ (PO ₄) ₂		25.2 (K), 14.6 (L)
Mg ₃ (PO ₄) ₂ · 8H ₂ O	bobierite	25.0 (L)
Mg ₃ (PO ₄) ₂ · 22H ₂ O		23.1 (L)
MnHPO ₄		12.9 (L)
Mn ₂ (PO ₄) ₂		27.4 (L)
PbHPO ₄		11.4 (K), 11.5 (L)
Pb(H ₂ PO ₄) ₂		114.7 (L)
Pb ₃ (PO ₄) ₂		43.5 at 38°C (K), 44.4 (L)
Pb ₃ (PO ₄) ₂ Br	bromopyromorphite	78.2 (L)
Pb ₃ (PO ₄) ₂ Cl	chloropyromorphite	83.7 (L)
Pb ₃ (PO ₄) ₂ F	fluoropyromorphite	71.6 (L)
Pb ₃ (PO ₄) ₂ OH	hydroxypyromorphite	76.8 (L)
(UO ₂) ₃ (PO ₄) ₂	{UO ₂ ²⁺ }[PO ₄ ³⁻] ²	49.7 (K)
UO ₂ HPO ₄	{UO ₂ ²⁺ }[HPO ₄ ²⁻]	12.2 (K)
Zn ₃ (PO ₄) ₂ · 4H ₂ O	hopeite	35.3 (L)
Zn ₃ (PO ₄) ₂		35.3 (K)
<i>Molybdates</i>		
Ag ₂ MoO ₄		11.55 (L)
CaMoO ₄	powellite	7.94 (L)
CuMoO ₄		6.48 (L)
FeMoO ₄		7.70 (L)
MgMoO ₄		0.62 (L)
MnMoO ₄		4.13 (L)

Table 12.1 (continued)

		pK ^{a,b}
PbMoO ₄	wulfenite	16.0 (L)
ZnMoO ₄		4.49 (L)
<i>Chlorides</i>		
AgCl	cerargyrite	9.75 (K, L)
CuCl		6.7 (K)
PbCl ₂	cotunnite	4.8 (K)
Hg ₂ Cl ₂	{Hg ₂ ²⁺ }[Cl ⁻] ²	17.9 (K)
<i>Fluorides</i>		
AgF		100.0 (L)
BaF ₂		5.8 (K)
CuF ₂	fluorite	10.4 (K)
MgF ₂	sellaite	8.2 (K) ^c
PbF ₂		7.5 (K)
SrF ₂		8.5 (K)

^a Expressed as $-\log K_{sp}$.

^b K = Krauskopf (1979), pp. 552-553; L = Lindsay (1979), calculated from standard free energies

^c Uncertain by more than 0.8 (Krauskopf, 1979)

Substituting into equation 12.8 yields

$$(5.00 \times 10^{-2} - x)(7.00 \times 10^{-3} - x) = 10^{-4.6} \quad (12.11)$$

which reduces to a quadratic equation

$$x^2 - (5.7 \times 10^{-2})x + 3.25 \times 10^{-4} = 0 \quad (12.12)$$

We solve this equation by means of the quadratic formula (equation 11.18) and obtain two roots: $x_1 = 5.05 \times 10^{-2}$ and $x_2 = 6.45 \times 10^{-3}$. We choose x_2 because x_1 reduces $[\text{SO}_4^{2-}]$ in equation 12.10 to a negative value. Therefore, the amount of gypsum that will precipitate per liter of solution is $6.45 \times 10^{-3} \times 172.17 = 1.11$ g. When equilibrium has been established after gypsum has precipitated, the IAP $(5.00 - 0.645) \times 10^{-2} \times (7.00 - 6.45) \times 10^{-3} = 10^{-4.6}$, as required for equilibrium. Note that the $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{SO}_4^{2-}]$ ratio has increased by

more than a factor of 10 from its initial value, of $(5.00 \times 10^{-2})/(7.00 \times 10^{-3}) = 7.1$ to $(4.35 \times 10^{-2})/(0.055 \times 10^{-2}) = 79.2$. Evidently, the precipitation of a salt from a supersaturated solution not only reduces the concentrations of the ions but actually *changes the chemical composition* of the remaining solution.

If gypsum continues to precipitate from this solution, the activity of SO_4^{2-} approaches zero and the $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{SO}_4^{2-}]$ ratio rises toward infinity. This phenomenon, which is illustrated in Figure 12.1, occurs during the evolution of brines by evaporative concentration and constitutes a *geochemical divide*. The solution we have been discussing is depleted in sulfate and is enriched in Ca^{2+} by the progressive precipitation of gypsum because its initial molar $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ ratio was greater than one. If $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-} < 1.0$, precipitation of gypsum causes depletion in Ca^{2+} and enrichment in sulfate. Therefore, the value of the molar

TABLE 1-5.

**COMMON REACTIVE MINERALS
IN SOIL AND AQUIFER ENVIRONMENTS**

Carbonates

- Calcite $[\text{CaCO}_3]$
- Dolomite $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$
- Siderite $[\text{FeCO}_3]$
- Rhodoxrosite $[\text{MnCO}_3]$
- Magnesian Calcite $[(\text{Ca,Mg})\text{CO}_3]$

Sulfates

- Gypsum $[\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$
- Alunite $[\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$
- Jarosite $[\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$
- Jurbanite $[\text{AlSO}_4(\text{OH})_6]$

Silica

- Chalcedony
- Amorphous silica

Oxides/hydroxides

- Ferrihydrite $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$
- Goethite $[\text{FeOOH}]$
- Gibbsite $[\text{Al}(\text{OH})_3]$
- Nsutite $[\text{MnO}_2]$

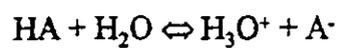
Sulfides

- Pyrite $[\text{FeS}_2]$
- Mackinawite $[\text{FeS}]$
- Orpiment $[\text{As}_2\text{S}_3]$

Silicates

- Clays
- Zeolites

REACCIONES ACIDO-BASE



$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{A}^-]}{[\text{HA}]}$$

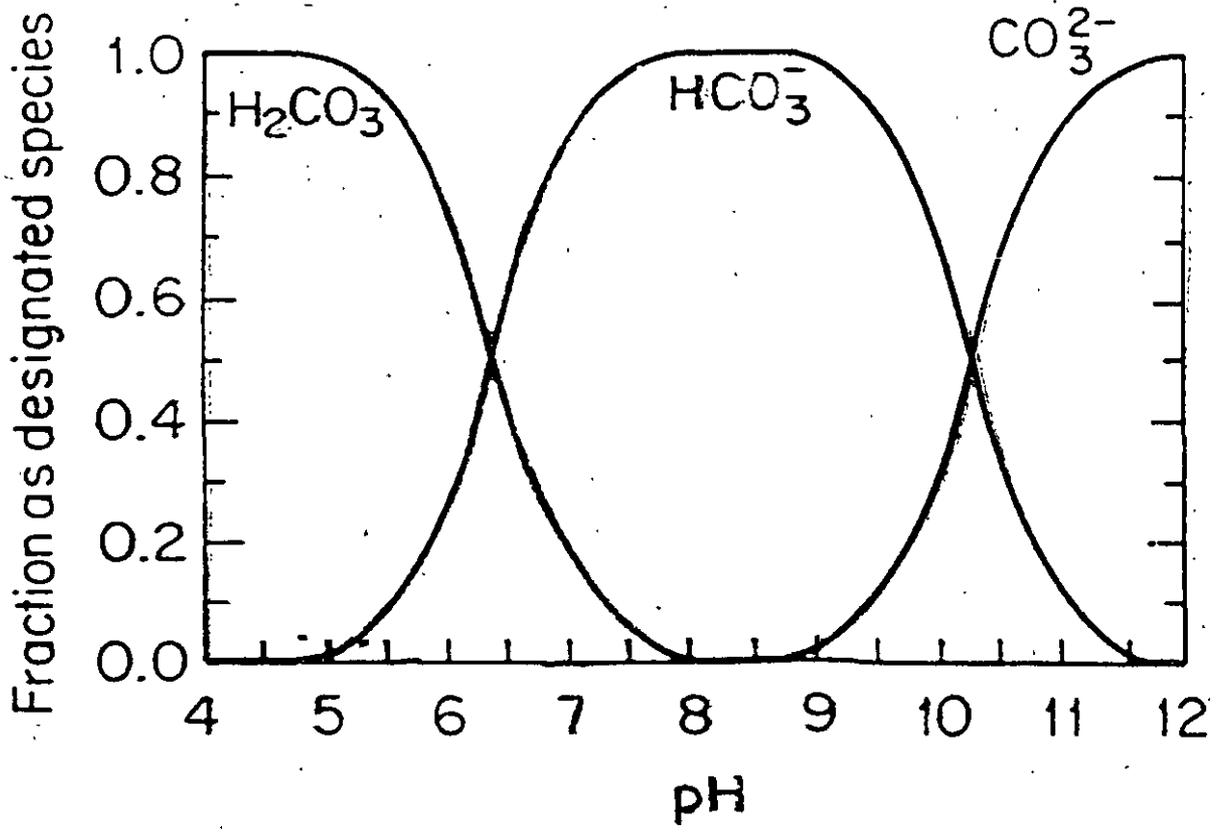
$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$$

$$\text{pK}_a = -\log K_a$$

Cuando $\text{pH} = \text{pK}_a$

$$[\text{HA}] = [\text{A}^-]$$

Predominio de Especies



Constantes de los pares ácido-base usuales en el agua

NOMBRE DEL ÁCIDO	FÓRMULA DEL ÁCIDO	FÓRMULA DE LA BASE	pK _A
Ácido acético	CH ₃ CO ₂ H	CH ₃ CO ₂ ⁻	4,75
Ion aluminio	Al ³⁺ , H ₂ O	AlOH ²⁺	5,0
Ion amonio	NH ₄ ⁺	NH ₃	9,25
Ion anilinio	C ₆ H ₅ NH ₃ ⁺	C ₆ H ₅ NH ₂	4,6
Ácido arsenioso	H ₃ AsO ₃	H ₂ AsO ₃ ⁻	9,2
Ácido arsénico	H ₃ AsO ₄	H ₂ AsO ₄ ⁻	2,2
	H ₂ AsO ₄ ⁻	HAsO ₄ ²⁻	7,0
	HAsO ₄ ²⁻	AsO ₄ ³⁻	~11,5
Ácido benzoico	C ₆ H ₅ CO ₂ H	C ₆ H ₅ CO ₂ ⁻	4,2
Ácido bórico	HBO ₃	BO ₂ ⁻	9,2
Ácido carbónico	CO ₂ , aq	HCO ₃ ⁻	6,4
	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	10,3
Ácido crómico	H ₂ CrO ₄	HCrO ₄ ⁻	0,8
	HCrO ₄ ⁻	CrO ₄ ²⁻	6,5
Ácido cítrico	H ₃ A	H ₂ A ⁻	3,1
	H ₂ A ⁻	H ₂ A ²⁻	4,8
	H ₂ A ²⁻	HA ³⁻	6,4
	HA ³⁻	A ⁴⁻	16,0
Cupferrón	H Cup	Cup ⁻	4,2
Ácido cianhídrico	HCN	CN ⁻	9,3
Ácido dicloroacético	Cl ₂ CHCO ₂ H	Cl ₂ CHCO ₂ ⁻	1,3
2,2'-dipiridilo	HA ⁺	A	4,4
Ácido etilendiaminotetracético	H ₄ A	H ₃ A ⁻	2,0
	H ₃ A ⁻	H ₂ A ²⁻	2,7
	H ₂ A ²⁻	HA ³⁻	6,2
	HA ³⁻	A ⁴⁻	10,3
Ácido fluorhídrico	HF	F ⁻	3,2
Ácido fórmico	HCO ₂ H	HCO ₂ ⁻	3,8
Ion hexametilentetraminio	HA ⁺	A	5,1
Ion hidroxilamonio	NH ₂ OH ⁺	NH ₂ OH	6,1
Ácido hipocloroso	HClO	ClO ⁻	7,5
Ácido hipofosforoso	H ₂ PO ₃	H ₂ PO ₃ ⁻	1,0
Ácido monocloroacético	ClCH ₂ CO ₂ H	ClCH ₂ CO ₂ ⁻	2,9
Ácido nitroso	HNO ₂	NO ₂ ⁻	3,3
Ácido ortofosfórico	H ₃ PO ₄	H ₂ PO ₄ ⁻	2,2
	H ₂ PO ₄ ⁻	HPO ₄ ²⁻	7,2
	HPO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	12,3
Ácido oxálico	H ₂ C ₂ O ₄	HC ₂ O ₄ ⁻	1,25
	HC ₂ O ₄ ⁻	C ₂ O ₄ ²⁻	4,3
Ion oxinio	H ₂ Ox ⁺	HOx	5,0
Oxina	HOx	Ox ⁻	9,9
Ion fenantrolinio	HA ⁺	A	5,0
Fenol	C ₆ H ₅ OH	C ₆ H ₅ O ⁻	9,5
Ion piridinio	HC ₅ H ₄ N ⁺	C ₅ H ₄ N	5,2
Ácido pirofosfórico	H ₄ P ₂ O ₇	H ₃ P ₂ O ₇ ⁻	1,0
	H ₃ P ₂ O ₇ ⁻	M ₂ P ₂ O ₇ ²⁻	2,5
	H ₂ P ₂ O ₇ ²⁻	HP ₂ O ₇ ³⁻	6,1
	HP ₂ O ₇ ³⁻	P ₂ O ₇ ⁴⁻	8,5
Ion sulfato ácido	HSO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	-1,9
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	HS ⁻	7,0
	HS ⁻	S ²⁻	12,9
Ácido sulfuroso	H ₂ SO ₃	HSO ₃ ⁻	1,9
	HSO ₃ ⁻	SO ₃ ²⁻	7,2
Ácido tartárico	H ₂ A	HA ⁻	3,0
	HA ⁻	A ²⁻	4,4

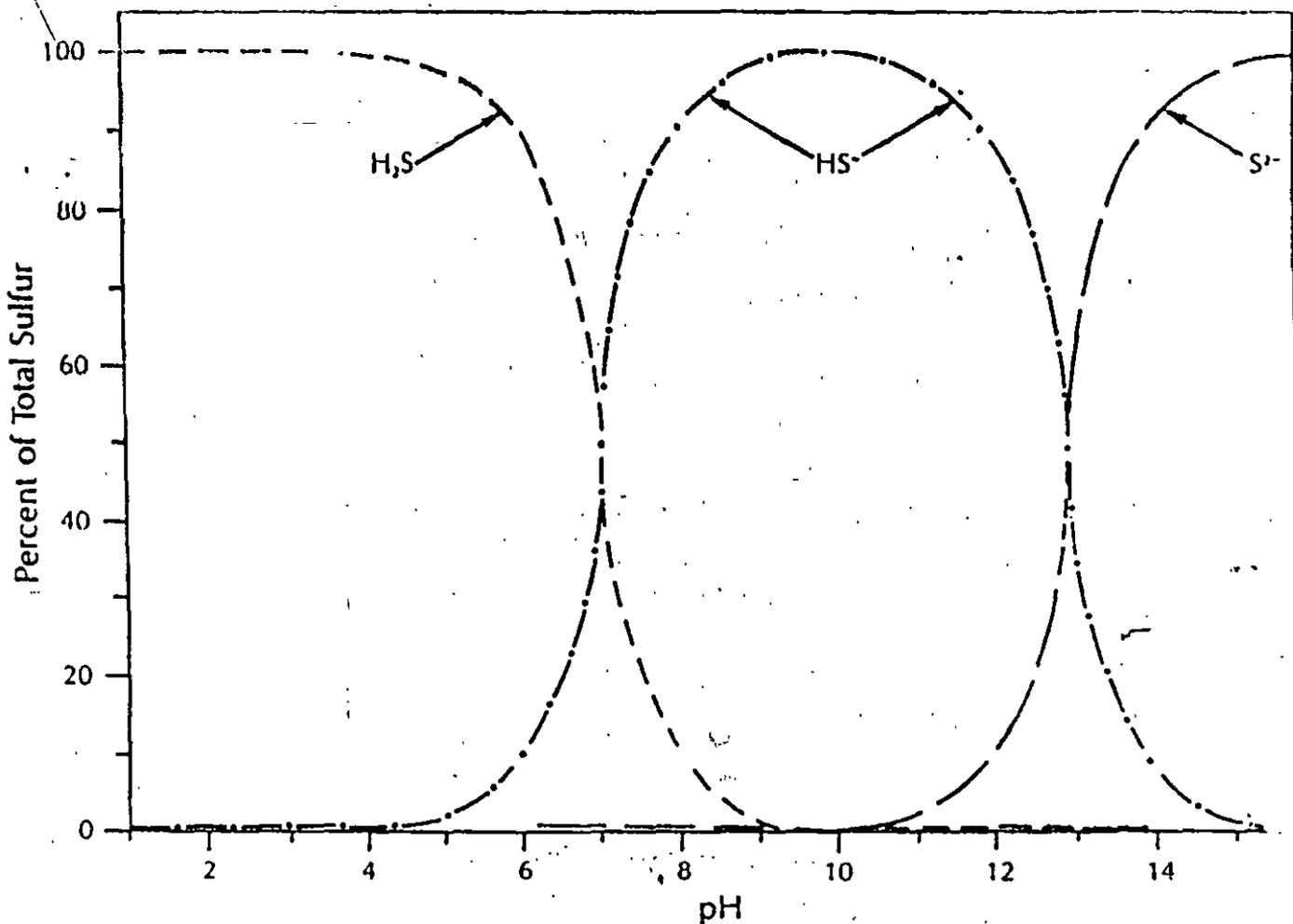


Figure 11.3 The pH dependence of the abundances of S-bearing ions and molecules in a solution of $H_2S_{(aq)}$ containing a fixed amount of S in solution (equation 11.79). Note that H_2S is dominant at $pH < 7.0$, HS^- dominates between $pH = 7.0$ and 12.9 , and that S^{2-} is dominant only at $pH > 12.9$. However, all of the ions are present at all values of the pH even though their abundances may be small compared to that of the dominant ion.

OXIDACION-REDUCCION

Intercambio de electrones

Oxidante + ne \Leftrightarrow Reductor

Ley de Nernst

$$E = E_o + \frac{RT}{nF} \log \frac{I_{OxI}}{I_{RedI}}$$

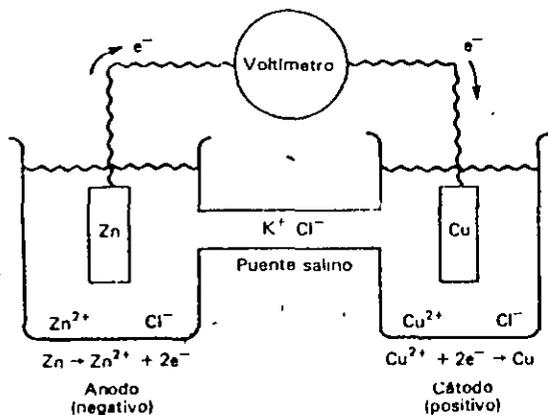
A 20 °C:

$$E = E_o + \frac{0.058}{n} \log \frac{I_{OxI}}{I_{RedI}}$$

La aplicación de la ecuación de Nernst a las reacciones que se llevan a cabo en una celda electroquímica y en solución se ilustran en los ejemplos 7-6 y 7-7, respectivamente.

Ejemplo 7-6

Una celda de Daniell consta de un electrodo de zinc en una solución de cloruro de zinc conectado a un electrodo de cobre en una solución de cloruro cúprico,



¿Cuál es la constante de equilibrio de la reacción de la celda a 25°C? De la tabla, 7-1,

$E_{Zn^{2+}, Zn(s)}^{\circ} = -0.76 \text{ volt}$ y $E_{Cu^{2+}, Cu(s)}^{\circ} = +0.34 \text{ volt}$.

Solución

Suponiendo que en la celda se oxida el Zn y se reduce el Cu^{2+} , la reacción de la celda será

	$-nFE^{\circ}$
$Zn_{(s)} \rightleftharpoons Zn^{2+} + 2e^{-}$	$-2F(+0.76)$
$2e^{-} + Cu^{2+} \rightleftharpoons Cu_{(s)}$	$-2F(+0.34)$
$Zn_{(s)} + Cu^{2+} \rightleftharpoons Zn^{2+} + Cu_{(s)}$	$-2F(+1.10)$

Así pues $E_{celda}^{\circ} = 1.10 \text{ volt}$. (Nótese que si se hubiese supuesto que se oxidaba el Cu^{2+} y se reducía el Zn^{2+} , E_{celda}° tendría la misma magnitud absoluta pero su signo sería el contrario. En el equilibrio, cuando no fluye corriente por el circuito, $E = 0$ y de la ecuación 7-8 se tiene

$$E^{\circ} = +1.1 = \left(\frac{0.059}{2}\right) \log K$$

Ejemplo 7-7

La determinación de Winkler para oxígeno disuelto implica la formación de $MnO_{2(s)}$ por oxidación de Mn^{2+} con oxígeno. El $MnO_{2(s)}$ reacciona después con I^{-} para formar $I_{2(ac)}$. Determinar el valor de E en una solución que contiene 8 mg de OD/litro en un punto en que la mitad del $MnO_{2(s)}$ formado por reacción con el OD se ha reducido a Mn^{2+} por acción del I^{-} (que a su vez se ha oxidado a $I_{2(ac)}$). La concentración de H^{+} es aproximadamente 1 M. En la determinación se utilizan las siguientes concentraciones y cantidades de reactivos:

1. $MnSO_4 \cdot 2H_2O$: 2 ml de una solución con 400 g/litro por 300 ml de volumen de muestra.
2. KI : 2 ml de una solución con 150 g/litro por 300 ml de volumen de muestra.

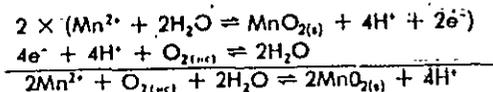
Solución

Despreciar los cambios en volumen causados por la adición de soluciones de $MnSO_4$ y KI .

$C_{T,Mn}$ 400 g/litro $MnSO_4 \cdot 2H_2O = 2.14 \text{ mol/litro}$
 (2 ml/300 ml muestra)(2.14 mol/litro) = $143 \times 10^{-2} M$

$C_{T,I}$ 150 g/litro $KI = 0.90 \text{ mol/litro}$
 (2 ml/300 ml muestra)(0.90 mol/litro) = $6 \times 10^{-3} M$

El ion manganeso reacciona con el OD para formar óxido de mangánésio,

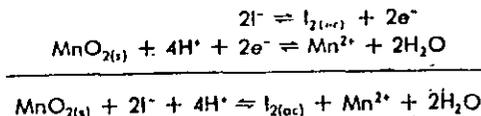


Así pues, 8 mg/litro de OD [= (8 mg/litro)(32,000 mg/mol)] = $2.5 \times 10^{-4} \text{ mol/litro}$ producirán $2 \times 2.5 \times 10^{-4} = 5.0 \times 10^{-4} \text{ mol } MnO_{2(s)}/\text{litro}$.

Después de la reducción de la mitad del $MnO_{2(s)}$ a Mn^{2+} con I^{-} ,

$$\begin{aligned} [Mn^{2+}] &= C_{T,Mn} - \text{número de moles de } MnO_{2(s)}/\text{litro} \\ &= 1.43 \times 10^{-2} M - 0.5(5.0 \times 10^{-4} M) \\ &= 1.40 \times 10^{-2} M \end{aligned}$$

La reacción de $MnO_{2(s)}$ con I^{-} produce



Entonces

$$E_{celda}^{\circ} = E_{I_2/I^{-}}^{\circ} + E_{MnO_2/Mn^{2+}}^{\circ} = -0.62 + 1.23 = +0.61$$

electrode negative, denoted by $E_H = -0.763 \text{ V}$ (E_H signifies a measurement relative to the standard hydrogen electrode).

The hydrogen and zinc electrodes together form an electrochemical cell. Electrons produced at the zinc electrode travel through the external circuit, in which they do electrical work, to the hydrogen electrode, where they combine with hydrogen ions to produce hydrogen, the overall reaction being

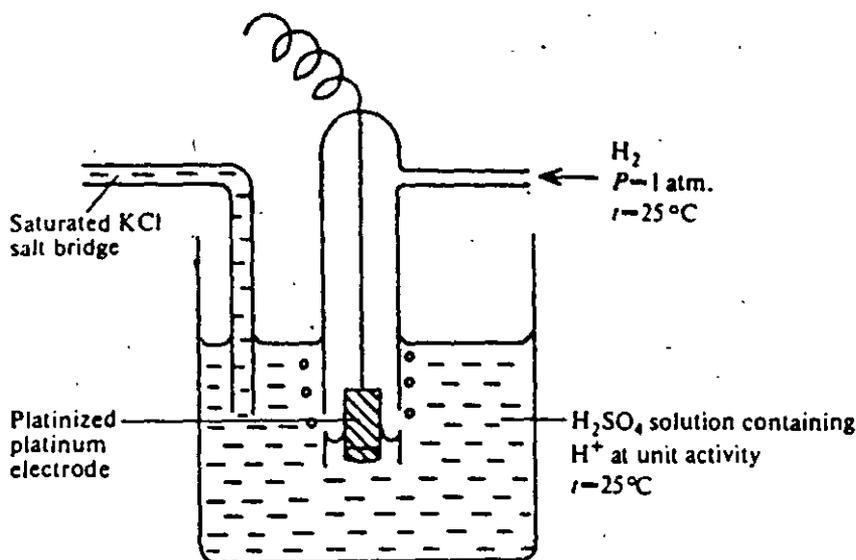
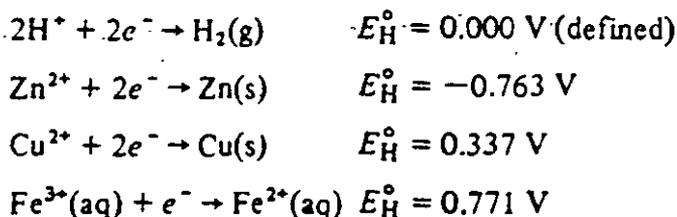


Fig. 3.7. Standard hydrogen electrode.

A standard electrode potential can be defined for any redox half-reaction—it is the E_H of an electrode when all reactants are present in their standard states at 25°C and 1 atm pressure (for dissolved species, the standard state is unit activity). By the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) 1953 convention, standard electrode potentials are quoted for reactions written as reductions and the sign of the potential is the sign of the electrode when connected to a standard hydrogen electrode. (Certain lists of standard electrode potentials use another convention, in which the signs are reversed.) Examples of standard electrode potentials are



An extensive list of electrode potentials is given in Appendix II.

Standard electrode potentials enable the assessment of relative reducing and

Algunos potenciales normales de sistemas sencillos en disolución acuosa:

$\text{Co}(\text{CN})_6^{3-} + e \rightleftharpoons \text{Co}(\text{CN})_6^{4-}$	-0V,8
$\text{Cr}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{Cr}^{2+}$	-0V,41
$\text{V}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{V}^{2+}$	-0V,26
$2\text{H}^+ + e \rightleftharpoons \text{H}_2 \uparrow$	0V,00 para presión de $\text{H}_2 = 1$ atmósfera
$\text{Cu}^{2+} + e \rightleftharpoons \text{Cu}^+$	+0V,15
$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	0V,36
$\text{MnO}_4^- + e \rightleftharpoons \text{MnO}_4^{2-}$	0V,6
$\text{I}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{I}^-$	0V,62
$\text{Fe}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$	0V,77
$2\text{Hg}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Hg}_2^{2+}$	0V,91
$\text{Br}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Br}^-$	1V,09
$\text{Ti}^{3+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ti}^+$	1V,28
$\text{Cl}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	1V,41
$\text{Ce}^{4+} + e \rightleftharpoons \text{Ce}^{3+}$	1V,7
$\text{Pb}^{4+} + 2e \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+}$	1V,8
$\text{Co}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{Co}^{2+}$	1V,8
$\text{Ag}^{2+} + e \rightleftharpoons \text{Ag}^+$	2V,0
$\text{F}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{F}^-$	2V,87

NOTAS. — 1.º Los oxidantes se clasifican por orden de fuerza creciente y los reductores, por orden de fuerza decreciente.

Un oxidante puede reaccionar con todo reductor que se encuentre por encima de él en la tabla, a la izquierda sobre la figura.

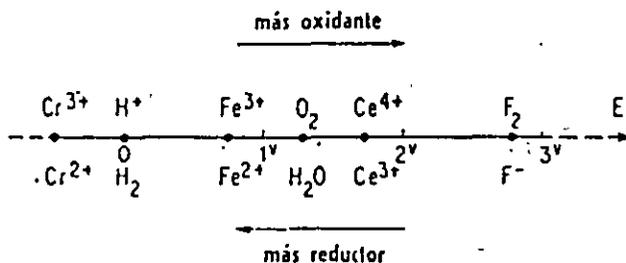


FIG. 3

Obsérvese que en el sistema $\text{F}_2/2\text{F}^-$, F^- juega el papel de reductor. Ahora bien, F^- no puede reducir más que a los sistemas de potencial más elevado que el suyo, prácticamente a ninguno. Del mismo modo, Ce^{3+} no puede desempeñar el papel de reductor en medio ácido más que frente a oxidantes más energéticos que Ce^{4+} , o sea, en un número limitado de casos; es poco reductor. En el otro extremo de la escala

Table 16.3 Electromotive Series Presented as Electrode Half-reactions in Order of Decreasing Strengths as Reducing Agents*

Reducing agent	Oxidizing agent	Standard electrode potential, V
Cs	→ Cs ⁺ + e ⁻	-3.03
Li	→ Li ⁺ + e ⁻	-3.04
K	→ K ⁺ + e ⁻	-2.94
Ba	→ Ba ²⁺ + 2 e ⁻	-2.91
Sr	→ Sr ²⁺ + 2 e ⁻	-2.90
Ca	→ Ca ²⁺ + 2 e ⁻	-2.87
Na	→ Na ⁺ + e ⁻	-2.71
Rb	→ Rb ⁺ + e ⁻	-2.60
Y	→ Y ³⁺ + 3 e ⁻	-2.40
Mg	→ Mg ²⁺ + 2 e ⁻	-2.36
La	→ La ³⁺ + 3 e ⁻	-2.36
Ce	→ Ce ³⁺ + 3 e ⁻	-2.32
Sc	→ Sc ³⁺ + 3 e ⁻	-2.03
Be	→ Be ²⁺ + 2 e ⁻	-1.97
Th	→ Th ⁴⁺ + 4 e ⁻	-1.83
Al	→ Al ³⁺ + 3 e ⁻	-1.70
U	→ U ⁴⁺ + 4 e ⁻	-1.38
Mn	→ Mn ²⁺ + 2 e ⁻	-1.18
Nb	→ Nb ³⁺ + 3 e ⁻	-1.10
V	→ V ³⁺ + 3 e ⁻	-0.87
Zn	→ Zn ²⁺ + 2 e ⁻	-0.76
Cr	→ Cr ³⁺ + 3 e ⁻	-0.74
S ²⁻	→ S + 2 e ⁻	-0.44
Fe	→ Fe ²⁺ + 2 e ⁻	-0.41
Cd	→ Cd ²⁺ + 2 e ⁻	-0.40
Co	→ Co ²⁺ + 2 e ⁻	-0.28
Ni	→ Ni ²⁺ + 2 e ⁻	-0.24
Mo	→ Mo ³⁺ + 3 e ⁻	-0.20
Sn	→ Sn ²⁺ + 2 e ⁻	-0.14
Pb	→ Pb ²⁺ + 2 e ⁻	-0.13
<hr/>		
H ₂	→ 2 H ⁺ + 2 e ⁻	0.00
<hr/>		
Bi	→ Bi ³⁺ + 3 e ⁻	+0.29
Cu	→ Cu ²⁺ + 2 e ⁻	+0.34
Cu	→ Cu ⁺ + e ⁻	+0.52
2 I ⁻	→ I ₂ + 2 e ⁻	+0.53
Se ²⁻	→ Se + 2 e ⁻	+0.67
Ag	→ Ag ⁺ + e ⁻	+0.80
Hg	→ Hg ²⁺ + 2 e ⁻	+0.85
Pd	→ Pd ²⁺ + 2 e ⁻	+0.92
2 Br ⁻	→ Br ₂ + 2 e ⁻	+1.08
Pt	→ Pt ²⁺ + 2 e ⁻	+1.19
2 Cl ⁻	→ Cl ₂ + 2 e ⁻	+1.36
Au	→ Au ⁺ + e ⁻	+1.69
Pt	→ Pt ⁺ + e ⁻	+2.64
2 F ⁻	→ F ₂ + 2 e ⁻	+2.88

* Based on G_f values in the Appendix.

Evidently, the *standard electrode potentials* reflect the same property of the elements as *electronegativities* (Section 6.2) and both arise from the tendencies of atoms to have completely filled orbitals either by giving up or accepting electrons.

16.3 The Emf of Electrochemical Cells

The relationship between the free energy change of a chemical reaction and the activities of the reactants and products is given by an equation derived in Section 13.8 (equation 13.73),

$$\Delta G_R - \Delta G_R^\circ = RT \ln Q \quad (16.44)$$

where ΔG_R is the free energy change of the reaction in any state, ΔG_R° is the free energy change in the standard state, R is the gas constant, T is the standard temperature in kelvins, and Q is the reaction quotient. We now convert ΔG values to emf by substituting equation 16.23 into equation 16.44. After rearranging terms and converting to logarithms to the base 10, we have

$$E = E^\circ + \frac{2.303RT}{n\mathcal{F}} \log Q \quad (16.45)$$

Since $R = 1.987 \times 10^{-3}$ kcal/deg·mol, $T = 298.15$ K, $\mathcal{F} = 23.06$ kcal/V·number of electrons transferred,

$$E = E^\circ + \frac{2.303 \times (1.987 \times 10^{-3}) \times 298.15}{n \times 23.06} \log Q \quad (16.46)$$

$$E = E^\circ + \frac{0.05916}{n} \log Q \quad (16.47)$$

Equation 16.47 provides a relationship between the activities of the reactants and products of an oxidation-reduction reaction, expressed by Q , and the emf that could be generated by the reac-

tion if it were split into two half-reactions in an electrochemical cell. When the reaction achieves equilibrium, $\Delta G_R = 0$, $E = 0$, and $Q = K$ where K is the equilibrium constant. Therefore, at equilibrium

$$E^\circ = -\frac{0.05916}{n} \log K \quad (16.48)$$

Equation 16.48 relates the emf of an oxidation-reduction reaction in the standard state to the equilibrium constant of that reaction.

We can apply these relationships to the Zn-Cu electrochemical cell represented by equation 16.41. When this reaction is neither in the standard state nor at equilibrium, the emf it generates is given by

$$E = E^\circ + \frac{0.05916}{2} \log \frac{[\text{Zn}^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}]} \quad (16.49)$$

where E° is the emf generated by the Zn-Cu cell in the standard state, which has a value of -1.10 V as calculated in equation 16.24. Therefore, when the reaction is proceeding toward equilibrium, the emf is

$$E = -1.10 + 0.02958 \log \frac{[\text{Zn}^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}]} \quad (16.50)$$

In the standard state, $[\text{Zn}^{2+}] = [\text{Cu}^{2+}] = 1.0$ and therefore $\log [\text{Zn}^{2+}]/[\text{Cu}^{2+}] = 0$. Consequently, in the standard state the emf is

$$E = E^\circ = -1.10 \text{ V} \quad (16.51)$$

At equilibrium, $[\text{Zn}^{2+}]/[\text{Cu}^{2+}] = 10^{37.24}$ (equation 16.22). Therefore, at equilibrium

$$E = -1.10 + 0.02958 \times 37.24 = 0.00 \text{ V} \quad (16.52)$$

The progress of the reaction in the Zn-Cu cell is illustrated by plotting equation 16.50 in Figure 16.2 in coordinates of E and $\log [\text{Zn}^{2+}]/[\text{Cu}^{2+}]$. The straight line indicates how E changes from

Table 3.9 Redox Half-Reactions for Many Constituents That Occur in the Groundwater Environment

(1) $\frac{1}{4}\text{O}_2 + \text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	(18) $\frac{1}{8}\text{SO}_4^{2-} + \frac{2}{8}\text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{HS}^- + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$
(2) $\text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{H}_2(\text{g})$	(19) $\frac{1}{2}\text{S}(\text{s}) + \text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{H}_2\text{S}(\text{g})$
(3) $\text{H}_2\text{O} + e = \frac{1}{2}\text{H}_2(\text{g}) + \text{OH}^-$	(20) $\text{Fe}^{3+} + e = \text{Fe}^{2+}$
(4) $\frac{1}{3}\text{NO}_3^- + \frac{6}{3}\text{H}^+ + e = \frac{1}{10}\text{N}_2(\text{g}) + \frac{3}{3}\text{H}_2\text{O}$	(21) $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + \text{HCO}_3^- + 2\text{H}^+ + e = \text{Fe}(\text{CO}_3)(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O}$
(5) $\frac{1}{2}\text{NO}_3^- + \text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{NO}_2^- + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	(22) $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + 3\text{H}^+ + e = \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$
(6) $\frac{1}{8}\text{NO}_3^- + \frac{3}{4}\text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{NH}_4^+ + \frac{3}{8}\text{H}_2\text{O}$	(23) $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + \text{H}^+ + e = \text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}$
(7) $\frac{1}{8}\text{NO}_2^- + \frac{4}{8}\text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{NH}_4^+ + \frac{1}{3}\text{H}_2\text{O}$	(24) $\frac{1}{2}\text{FeS}_2(\text{s}) + 2\text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{S}(\text{g})$
(8) $\frac{1}{4}\text{NO}_3^- + \frac{3}{4}\text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{N}_2\text{O}(\text{g}) + \frac{3}{8}\text{H}_2\text{O}$	(25) $\frac{1}{2}\text{Fe}^{2+} + \text{S}(\text{s}) + e = \frac{1}{2}\text{FeS}_2(\text{s})$
(9) $\frac{1}{2}\text{NO}_2^- + \frac{3}{2}\text{H}^+ + e = \frac{1}{4}\text{N}_2\text{O}(\text{g}) + \frac{3}{4}\text{H}_2\text{O}$	(26) $\frac{1}{16}\text{Fe}^{2+} + \frac{1}{8}\text{SO}_4^{2-} + e = \frac{1}{16}\text{FeS}_2(\text{s}) + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$
(10) $\frac{1}{8}\text{N}_2(\text{g}) + \frac{4}{8}\text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{NH}_4^+$	(27) $\frac{1}{14}\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s}) + \frac{1}{4}\text{SO}_4^{2-} + \frac{2}{4}\text{H}^+ + e = \frac{1}{14}\text{FeS}_2(\text{s}) + \frac{3}{4}\text{H}_2\text{O}$
(11) $\frac{1}{4}\text{CH}_2\text{O} + \text{H}^+ + e = \frac{1}{4}\text{CH}_4(\text{g}) + \frac{1}{4}\text{H}_2\text{O}$	(28) $\frac{1}{14}\text{Fe}(\text{CO}_3)(\text{s}) + \frac{1}{4}\text{SO}_4^{2-} + \frac{1}{4}\text{H}^+ + e = \frac{1}{14}\text{FeS}_2(\text{s}) + \frac{4}{7}\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{14}\text{HCO}_3^-$
(12) $\frac{1}{4}\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}^+ + e = \frac{1}{4}\text{CH}_2\text{O} + \frac{1}{4}\text{H}_2\text{O}$	(29) $\frac{1}{2}\text{MnO}_2(\text{s}) + \frac{1}{2}\text{HCO}_3^- + \frac{3}{2}\text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{MnCO}_3(\text{s}) + \frac{3}{2}\text{H}_2\text{O}$
(13) $\frac{1}{2}\text{CH}_2\text{O} + \text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{CH}_3\text{OH}$	(30) $\text{Mn}^{2+} + 2e = \text{Mn}(\text{s})$
(14) $\frac{1}{8}\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{CH}_4(\text{g}) + \frac{1}{4}\text{H}_2\text{O}$	(31) $\frac{1}{2}\text{MnCO}_3 + \frac{1}{2}\text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{Mn}(\text{s}) + \frac{1}{2}\text{HCO}_3^-$
(15) $\frac{1}{2}\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{CH}_4(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	(32) $\text{MnOOH}(\text{s}) + \text{HCO}_3^- + 2\text{H}^+ + e = \text{MnCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$
(16) $\frac{1}{8}\text{SO}_4^{2-} + \frac{4}{8}\text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{S}(\text{s}) + \frac{3}{8}\text{H}_2\text{O}$	(33) $\text{MnO}_2 + \text{H}^+ + e = \text{MnOOH}$
(17) $\frac{1}{8}\text{SO}_4^{2-} + \frac{3}{4}\text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{H}_2\text{S}(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	

The Double Layer

The structure of the double layer has been the subject of a great deal of study, and several mathematical models are available to describe the distribution of ions within it (Westall and Hohl 1980). In general terms, the double layer consists of ions more or less attached to the solid surface (the *fixed* or *Stern* layer), and outside that a diffuse (or *Gouy*) layer in which the ions are free to move (Fig. 4-11). In the Gouy layer, the concentration of cations not balanced by anions decreases exponentially away from the boundary with the fixed layer. The ions in the fixed layer may be held by purely electrostatic forces, or by formation of complexes with groups on the surface of the solid (see Chapter 13).

The stability of a colloidal suspension depends on the thickness of the Gouy layer, which depends on the potential at the outside of the fixed layer and, approxi-

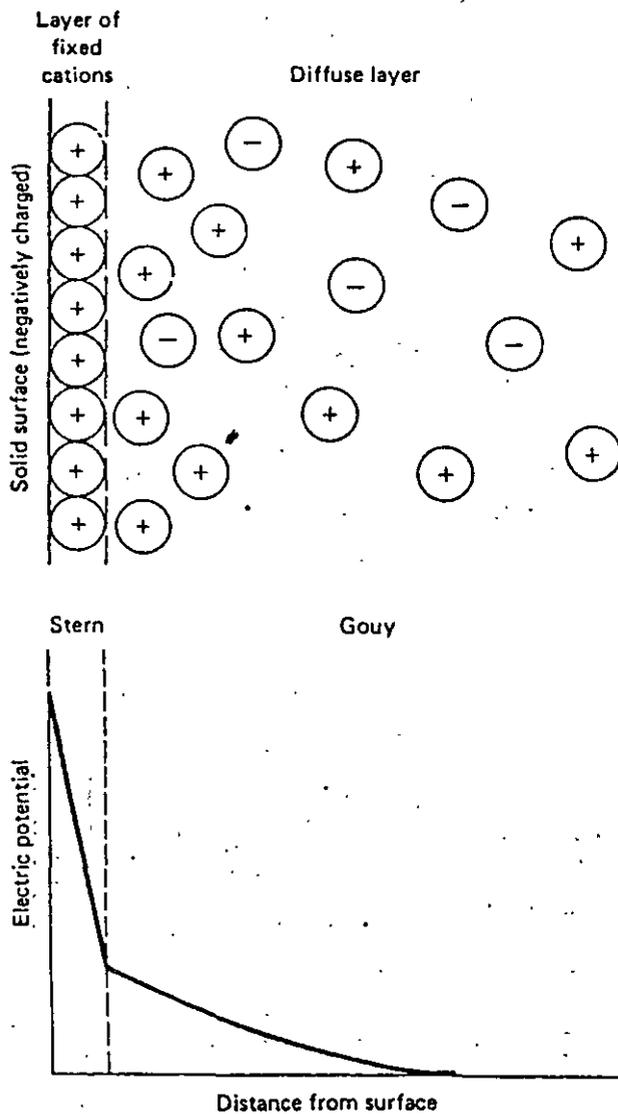


Figure 4-11 Schematic picture of the fixed (Stern) and diffuse (Gouy) layers.

In strongly alkaline solutions they will lose a proton and become



The net charge on a surface containing such hydroxyl groups will therefore vary with pH. In acid solutions, the surface will be positively charged; its cation-exchange capacity will be small (zero unless there is a specific chemical interaction between the cation and the surface), and it will have a finite anion-exchange capacity. In alkaline solutions, the surface will be negatively charged; anion-exchange capacity will be small or zero, and cation-exchange capacity will be significant. The pH at which the net charge on the surface is zero is called the *isoelectric point* (Table 4-1). Many transition metals, and some anions such as phosphate, are strongly adsorbed

Table 4-1 Isoelectric points (pH) of some naturally occurring substances (from Parks 1965; Leckie and James 1974; James and MacNaughton 1977).

SiO ₂ (quartz)	2.0	
SiO ₂ (gel)	1.0-2.5	
Al ₂ O ₃ (corundum)	9.1	
Al(OH) ₃ (gibbsite)	~9	
TiO ₂ (anatase)	7.2	
Fe ₃ O ₄ (magnetite)	6.5	
Fe ₂ O ₃ (hematite)	5-9	(commonly 6-7)
FeO(OH) (goethite)	6-7	
Fe ₂ O ₃ · nH ₂ O	6-9	
MnO ₂ (various forms)	2	
Kaolinite	~3.5	
Montmorillonite	<2.5	

at oxide surfaces (see Chapter 13). When such species are adsorbed, the balance of electric charge at the surface is altered, and the *zero point of charge* (ZPC)—the pH at which the surface charge is zero—will differ from the isoelectric point, which is the ZPC when the only reactions affecting surface charge are adsorption and desorption of protons.

Parks (1967) showed that the isoelectric points of aluminosilicates could be predicted quite well on the basis of the number of SiOH and AlOH groups making up the surface. When the Al is octahedrally coordinated, AlOH groups have an isoelectric point of 9.2; when the Al is tetrahedrally coordinated, the isoelectric point is 6.8. SiOH groups have an isoelectric point of 1.8. An aluminosilicate surface with mostly SiOH groups will thus have a low isoelectric point, and a surface with mostly AlOH groups will have a relatively high isoelectric point. The isoelectric point is important because it determines the pH range in which the surface shows cation or anion exchange properties, and also the pH range in which stable colloidal suspensions can form.

The points of zero charge of salt-type minerals depends, sometimes in a complicated way, upon pH and on the concentration (activities) of all potential-determining ions. Thus, in the case of calcite, possible potential-determining species, in addition to H^+ and OH^- , are HCO_3^- , CO_2 , and Ca^{2+} ; various mechanisms of charge development are possible. When referring to a point of zero charge of such non-oxides the solution composition should be specified. In the absence of complications such as those caused by structural or adsorbed impurities, the point of zero charge of the solid should correspond to the pH of charge balance (electroneutrality) of potential-determining ions.

Table 2.2 Point of Zero Charge caused by Binding or Dissociation of Protons ^{a)}

Material	pH _{pznpc}	Material	pH _{pznpc}
α - Al_2O_3	9.1	δ - MnO_2	2.8
α - $Al(OH)_3$	5.0	β - MnO_2	7.2
γ - $AlOOH$	8.2	SiO_2	2.0
CuO	9.5	$ZrSiO_4$	5
Fe_3O_4	6.5	Feldspars	2 - 2.4
α - $FeOOH$	7.8	Kaolinite	4.6
α - Fe_2O_3	8.5	Montmorillonite	2.5
" $Fe(OH)_3$ " (amorph)	8.5	Albite	2.0
MgO	12.4	Chrysotile	>10

^{a)} The values are from different investigators who have used different methods and are not necessarily comparable. They are given here for illustration.

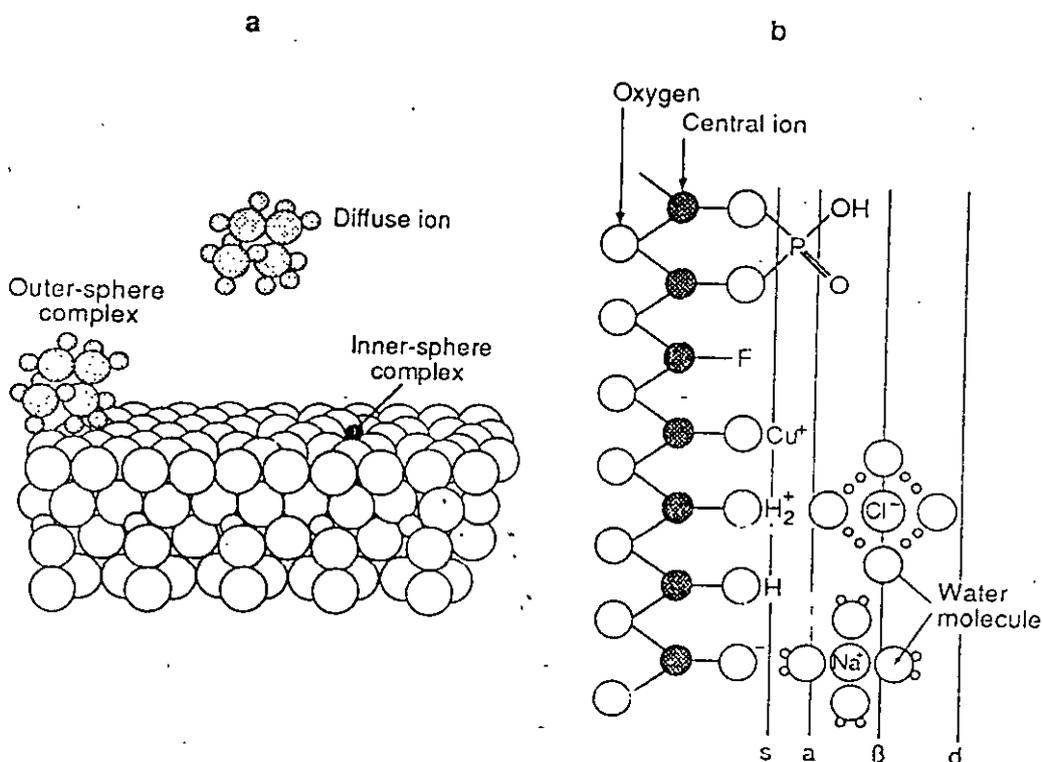


Figure 2.4

Surface complex formation of an ion (e.g., cation) on the hydrous oxide surface. The ion may form an inner-sphere complex ("chemical bond"), an outer-sphere complex (ion pair) or be in the diffuse swarm of the electric double layer. (From Sposito, 1989)

Fig. b shows a schematic portrayal of the hydrous oxide surface, showing planes associated with surface hydroxyl groups ("s"), inner-sphere complexes ("a"), outer-sphere complexes ("beta") and the diffuse ion swarm ("d"). (Modified from Sposito, 1984)

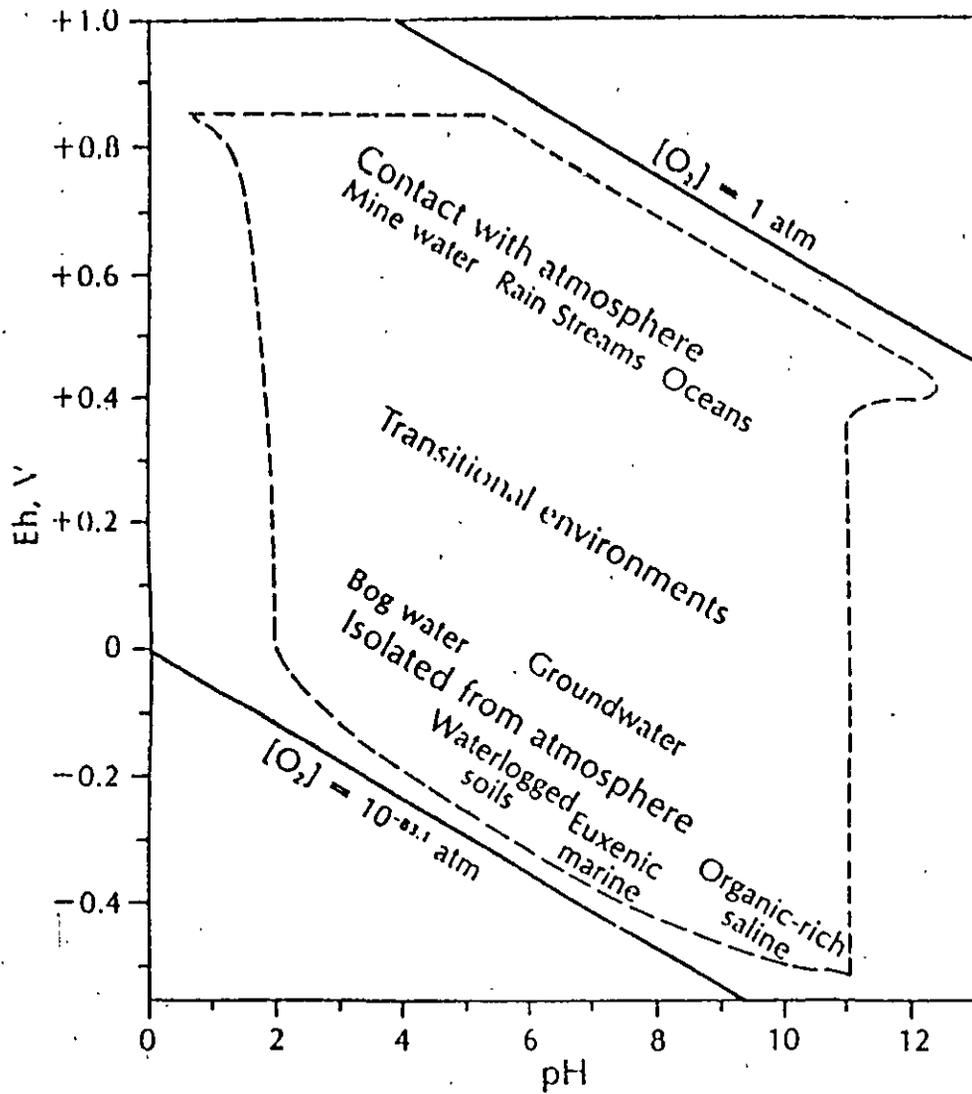


Figure 16.4 Range of Eh and pH conditions in natural environments based on data by Baas-Becking et al. (1960) and modified after Garrels and Christ (1965).

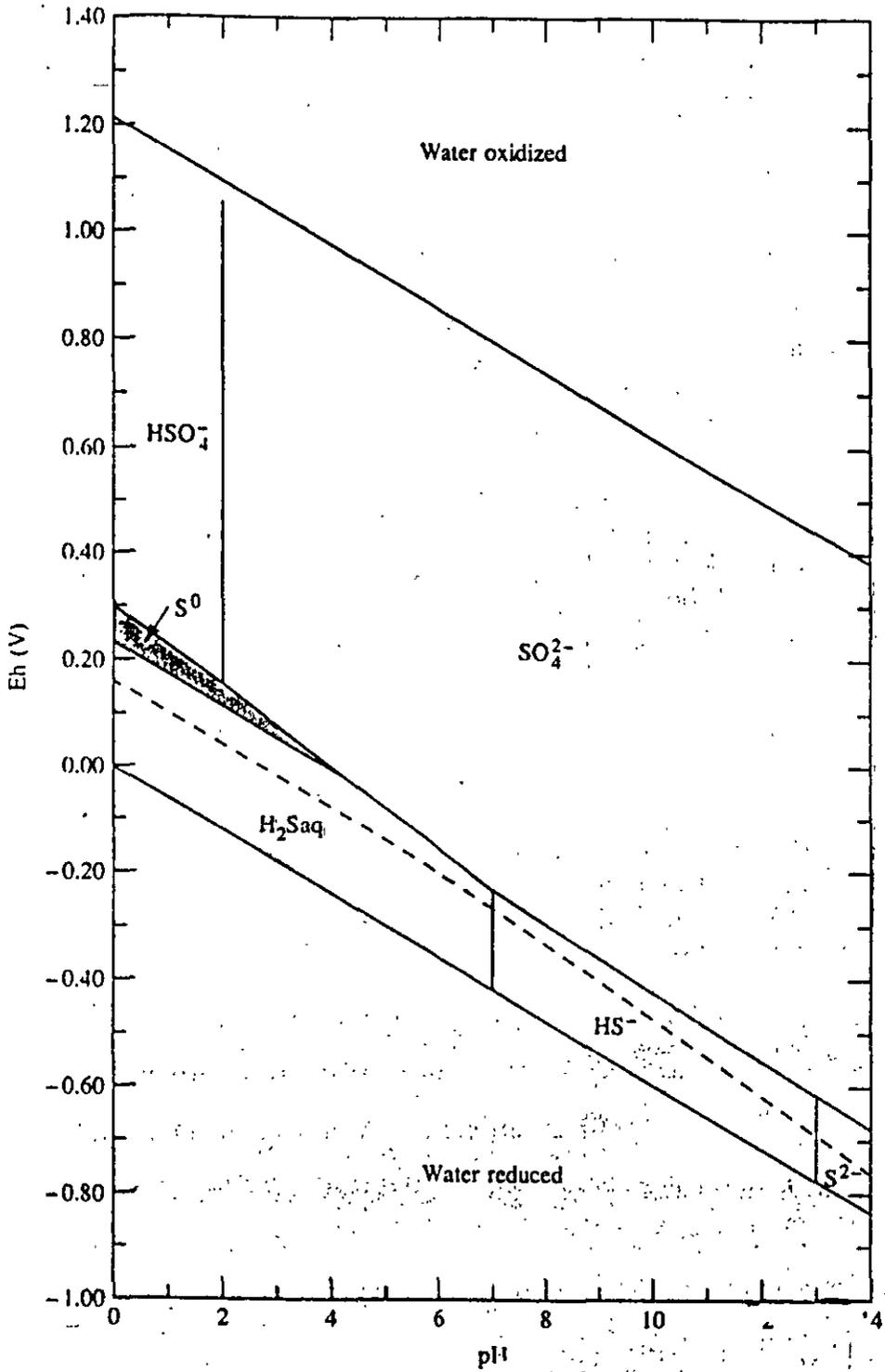


FIGURE 6.8 Eh-pH diagram for sulfur species at standard conditions with total dissolved sulfur activity of 96 mg/L. Source: J. D. Hem, *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural waters*, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2254, 1985

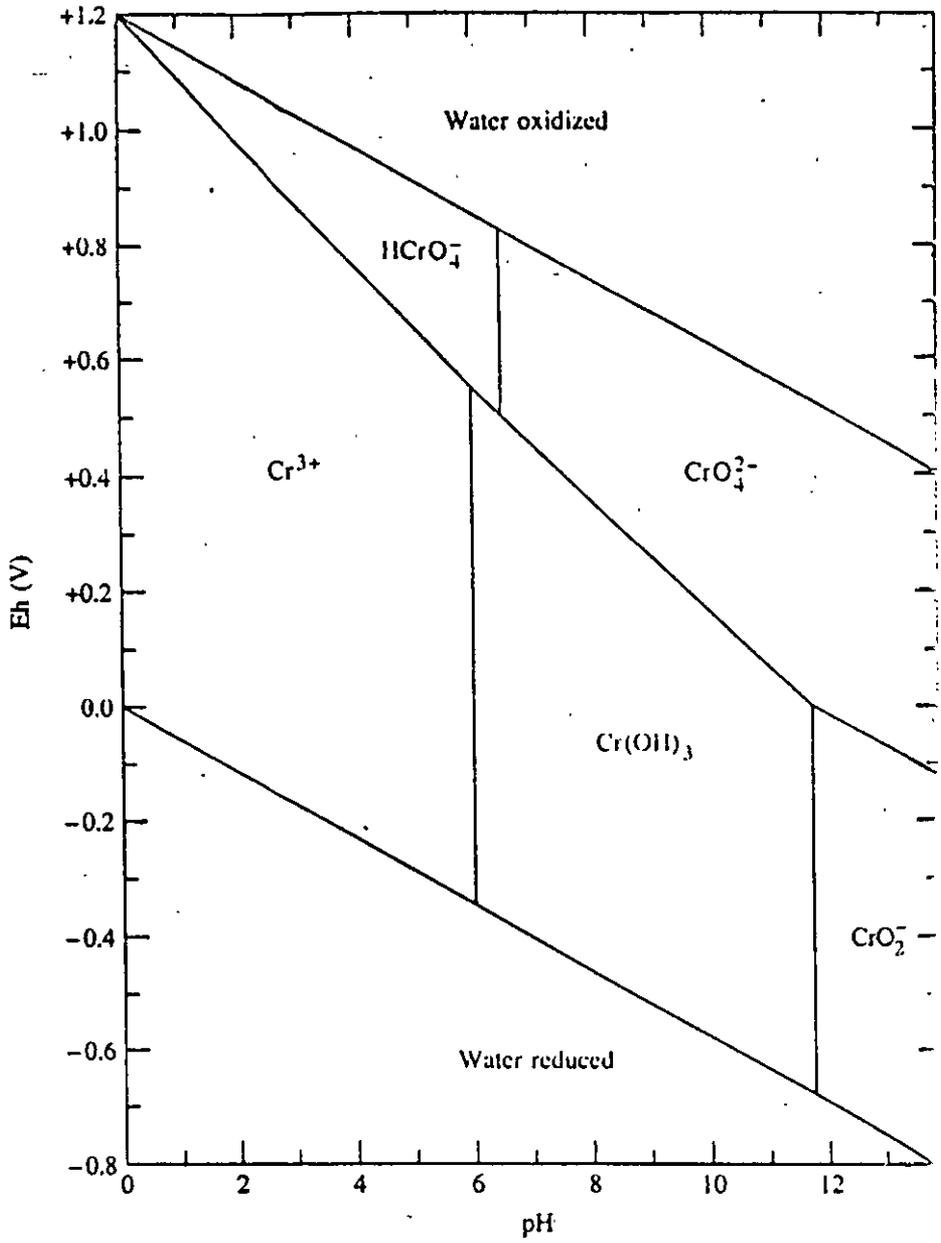


FIGURE 6.10: Eh-pH diagram for chromium under standard conditions. Source: Modified from Roberts, *Ground Water* 13, no. 6:516-27. Used with permission. Copyright © 1975 by Journal Publishing Co.

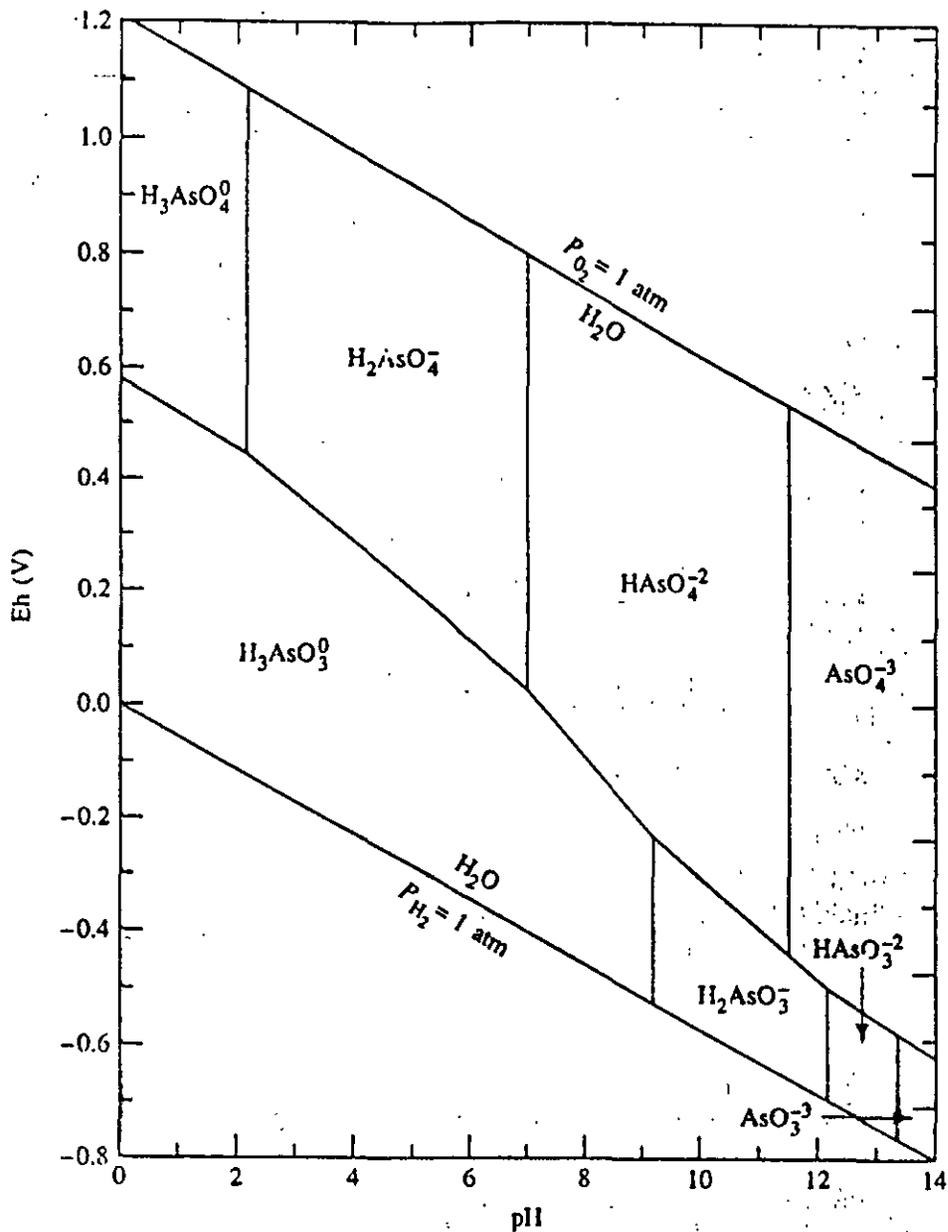
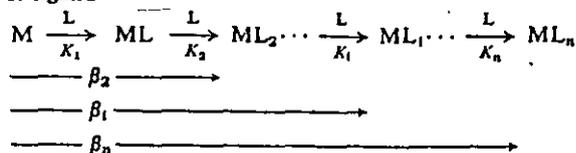


FIGURE 6.9 Eh-pH diagram for arsenic species under standard conditions. Source: A. H. Welch, M. S. Lico, and J. L. Hughes, *Ground Water* 26, no.3 (1988):333-47. Used with permission. Copyright © 1988 by Water Well Journal Publishing Co.

Table 6-2 Formulation of Stability Constants†

I. Mononuclear Complexes

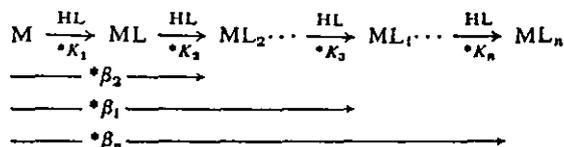
(a) Addition of ligand



$$K_i = \frac{[ML_i]}{[ML_{i-1}][L]} \quad (1)$$

$$\beta_i = \frac{[ML_i]}{[M][L]^i} \quad (2)$$

(b) Addition of protonated ligands



$$*K_i = \frac{[ML_i][H^+]}{[ML_{i-1}][HL]} \quad (3)$$

$$* \beta_i = \frac{[ML_i][H^+]^i}{[M][HL]^i} \quad (4)$$

II. Polynuclear Complexes

In β_{nm} and $*\beta_{nm}$ the subscripts n and m denote the composition of the complex M_mL_n formed. [If $m = 1$, the second subscript (= 1) is omitted.]

$$\beta_{nm} = \frac{[M_mL_n]}{[M]^m[L]^n} \quad (5)$$

$$* \beta_{nm} = \frac{[M_mL_n][H^+]^n}{[M]^m[HL]^n} \quad (6)$$

† The same notation as that used in L. G. Sillén and A. E. Martell, *Stability Constants of Metal-Ion Complexes*, Special Publ., No. 17, The Chemical Society, London, 1964, is used.

At great dilution ($\text{pH} \rightarrow 7$), most of the Cu(II) of a pure Cu-salt solution [e.g., $\text{Cu}(\text{ClO}_4)_2$] will occur as a hydroxo complex

$$\alpha_{\text{CuOH}^+} = \frac{[\text{CuOH}^+]}{[\text{Cu}]} = \left(1 + \frac{[\text{H}^+]}{*K_1}\right)^{-1} = 0.91 \quad (3)$$

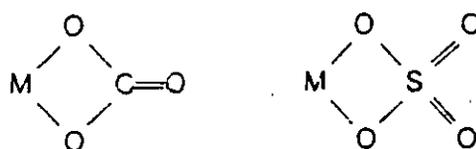
On the other hand, because of the small acidity of Mg^{2+} , even at infinite dilution the fraction of hydrolyzed Mg^{2+} ions of a solution of an Mg^{2+} -salt

Complejo: Atomo central rodeado por iones o moléculas. Neutros, Cationicos, Anionicos
 Ligando + ion metálico central \rightleftharpoons complejo

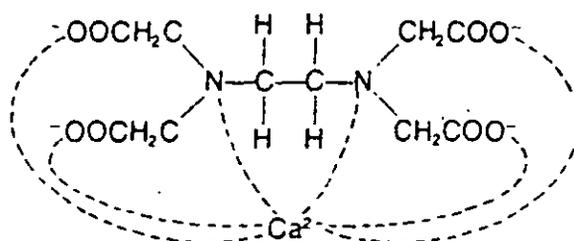
Nomenclatura y definición de términos

con carbonilo (CO), $\text{Ni}(\text{CO})_4^{2+}$; con la 1, 10-fenantrolina en el complejo $\text{Ni}(\text{fenantrolina})_3^{2+}$ el número de coordinación es 6. El hierro (III) tiene los números de coordinación 6 para el agua, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ y el cianuro, $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$, pero 4 para el cloruro, FeCl_4^- .

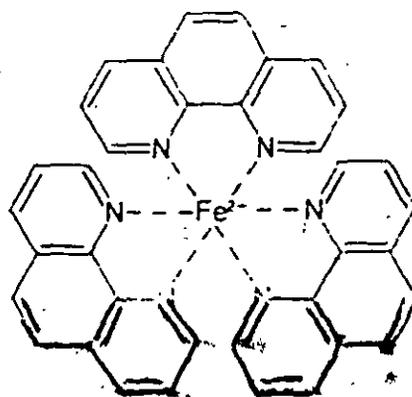
Los ligandos que se enlazan a un ion metálico central en un solo punto, como son H_2O , OH^- , Cl^- y CN^- , se llaman ligandos *monodentados*. Los ligandos que se fijan en dos o más sitios son ligandos *multidentados* o *agentes quelatantes*. El complejo formado por un agente quelante y un ion metálico central se conoce como *quelato*. Por ejemplo, el cloruro forma un complejo monodentado con el ion mercúrico, mientras que el carbonato y el sulfato ocasionalmente pueden ser bidentados, fijándose al ion metálico central en dos sitios:



El agente quelatante EDTA^{4-} se puede fijar en seis sitios, ya que cada uno de los grupos acetato y los dos átomos de nitrógeno tienen pares de electrones libres necesarios para la formación de enlaces coordinados. Por ejemplo, el complejo del EDTA que se produce con el Ca^{2+} durante la determinación volumétrica de la dureza del agua es



Cada molécula del agente quelatante 1,10-fenantrolina, que se utiliza como indicador para el hierro en la terminación volumétrica de la prueba DQO, puede satisfacer dos sitios de coordinación con los pares de electrones en los dos átomos de nitrógeno en cada molécula. Con el Fe^{2+} se forma un complejo de color rojo con tres moléculas de 1,10-fenantrolina, satisfaciendo el número de coordinación de 6 para el ion Fe^{2+} .



6-3 The Stability of Hydrolysis Species

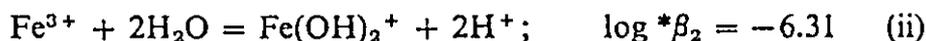
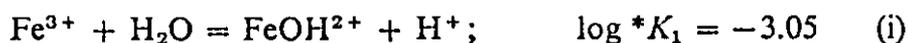
Quantitative application of known hydrolysis equilibria is illustrated in the next two examples.

Example 6-1 The Hydrolysis of Iron(III). The addition of $\text{Fe}(\text{ClO}_4)_3$ to H_2O may lead to the following soluble species: Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^{1+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_3^-$ and $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$.

Compute the equilibrium composition of:

1. A homogeneous solution to which $10^{-4} M$ ($10^{-2} M$) of iron(III) has been added and the pH adjusted within the range 1–4.5 with acid or base;
2. An iron(III) solution in equilibrium with amorphous ferric hydroxide.

The following equilibrium constants are available $I = 3(\text{NaClO}_4)$ (25°C).



1. In the *homogeneous system*, the concentration condition [(vi) or (vii)] must be fulfilled.

$$\text{Fe}_T = [\text{Fe}^{3+}] + [\text{FeOH}^{2+}] + [\text{Fe}(\text{OH})_2^+] + 2[\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}] \quad (\text{vi})$$

$$\text{Fe}_T = [\text{Fe}^{3+}] \left(1 + \frac{*K_1}{[\text{H}^+]} + \frac{*K_1^2}{[\text{H}^+]^2} + \frac{2[\text{Fe}^{3+}]*\beta_{22}}{[\text{H}^+]^2} \right) \quad (\text{vii})$$

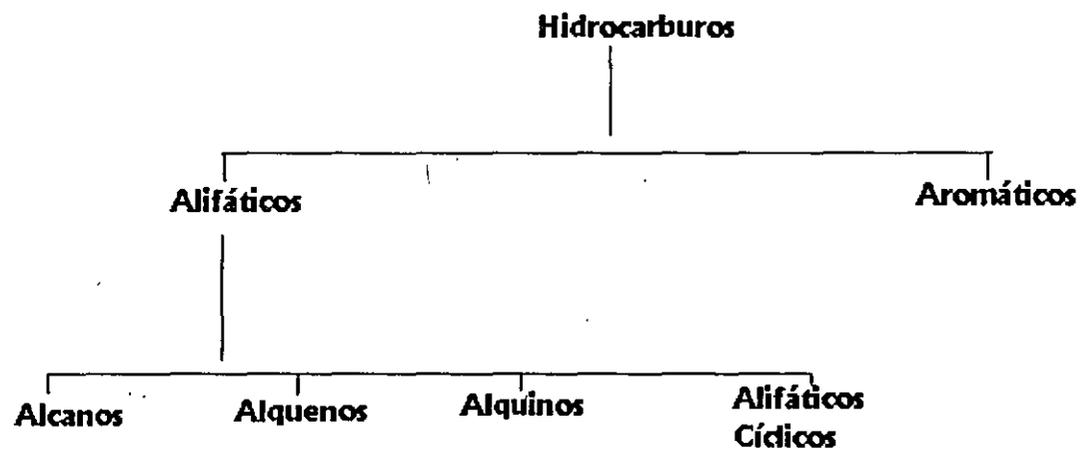
As with other polyprotic acids we may define successive distribution coefficients: $\alpha_0 = [\text{Fe}^{3+}]/\text{Fe}_T$, $\alpha_1 = [\text{FeOH}^{2+}]/\text{Fe}_T$, $\alpha_2 = [\text{Fe}(\text{OH})_2^+]/\text{Fe}_T$ and $\alpha_{22} = 2[\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}]/\text{Fe}_T$. [α_{22} gives the fraction of iron(III) present in the form of the dimer.]

Inspecting (vii) we note that the last term, proportional to the polymer concentration, is an implicit function of the concentration of iron(III). α_0 may be defined with the help of (i)–(iii) and (vii):

$$\alpha_0 = \left(1 + \frac{*K_1}{[\text{H}^+]} + \frac{*K_1^2}{[\text{H}^+]^2} + \frac{2\text{Fe}_T\alpha_0*\beta_{22}}{[\text{H}^+]^2} \right)^{-1} \quad (\text{viii})$$

or

$$\frac{\alpha_0^2 2\text{Fe}_T * \beta_{22}}{[\text{H}^+]^2} + \alpha_0 \left(1 + \frac{*K_1}{[\text{H}^+]} + \frac{*K_1^2}{[\text{H}^+]^2} \right) - 1 = 0 \quad (\text{ix})$$



CONSTITUYENTES DEL PETROLEO

Fracción	T de destilación oC	Número de Carbonos
Gas	Debajo de 20°	C1-C4
Eter de petroleo	20-60°	C5-C6
Nafta ligero	60-100°	C6-C7
Gasolina natural	40-205°	C5-C10
Queroseno	175-325°	C12-C18 y aromáticos
Aceites	Arriba de 275°	C12 y mayores
Asfalto	Sólidos no volátiles	Estructuras policíclicas

TABLA 15.1:

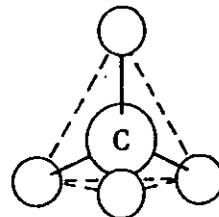
ESTRUCTURA DE LOS ALCANOS

Compuesto

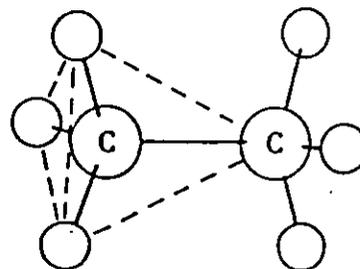
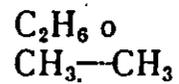
Fórmula

Estructura

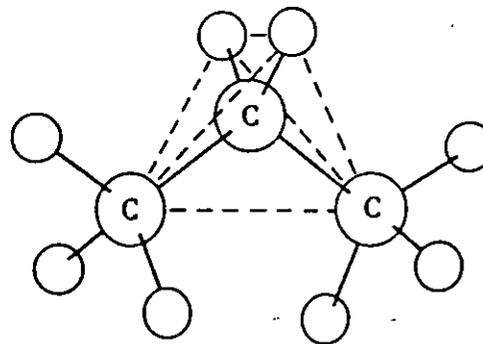
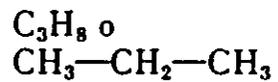
Metano



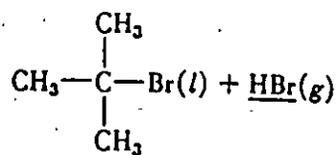
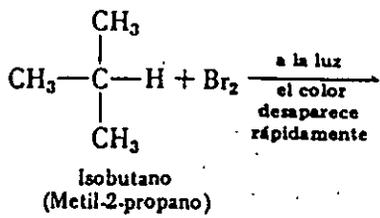
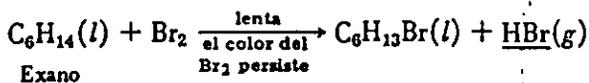
Etano



Propano



En estas reacciones de adición sólo hay un producto, un aceite incoloro. Cuando se trata la misma solución de bromo con un alcano, ocurre una reacción por sustitución muy lenta, de manera que el color rojo del bromo persiste. En luz brillante ciertos alcanos, como el isobutano, pueden reaccionar rápidamente con el Br₂. La evolución concomitante del HBr gaseoso que es poco soluble en tetracloruro de carbono, prueba que el bromo reacciona con el alcano. Por ejemplo,



Bromo-2-metil-2-propano

FIGURA 15.17

Conformaciones del *n*-butano y el *n*-pentano.

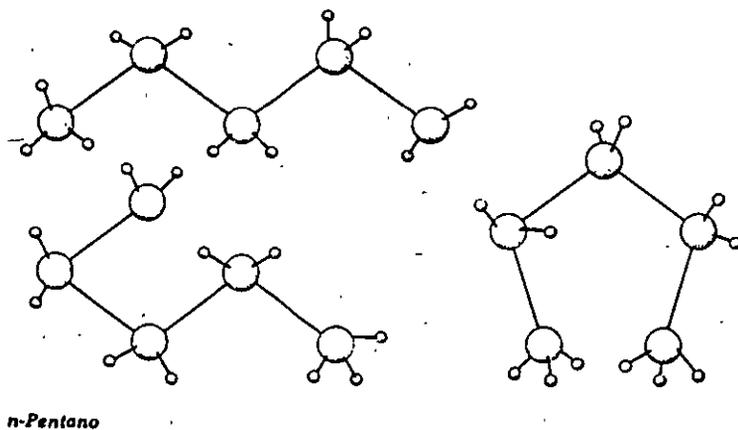
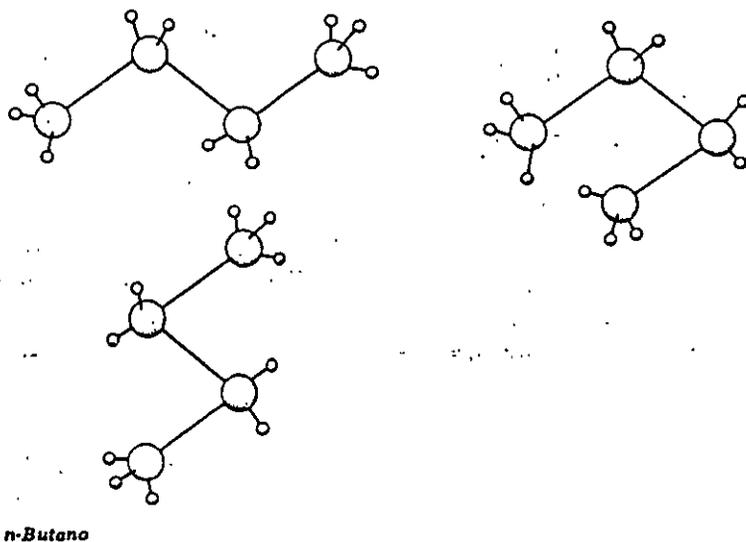


Tabla 3.1 Principales alcanos

Principales alcanos			
Compuesto	Punto de fusión °C	Punto de ebullición °C	Densidad relativa a 20°C
Metano	-183	-162	-
Etano	-172	-88.5	-
Propano	-187	-42	-
n-Butano	-138	0	-
n-Pentano	-130	36	0.626
n-Hexano	-95	69	0.659
n-Heptano	-90.5	98	0.684
n-Octano	-57	126	0.703
n-Nonano	-54	151	0.718
n-Decano	-30	174	0.730

Tabla 4.1 Principales alquenos

Principales alquenos			
Compuesto	Punto de fusión °C	Punto de ebullición °C	Densidad relativa a 20°C
Etileno	-169	-102	-
Propileno	-185	-48	-
Buteno	-	-6.5	-
Penteno	-	30	0.643
Hexeno	-138	63.5	0.675
Hepteno	-119	93	0.698
Octeno	-104	122.5	0.716
Noneno	-	146	0.731
Deceno	-87	171	0.743

Tabla 5.1 Principales alquinos

Principales alquinos			
Compuesto	Punto de fusión °C	Punto de ebullición °C	Densidad relativa a 20°C
Acetileno	-82	-75	-
Propino	-101.5	-23	-
Butino	-122	9	-

TABLA 15.7: GRUPOS FUNCIONALES

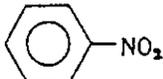
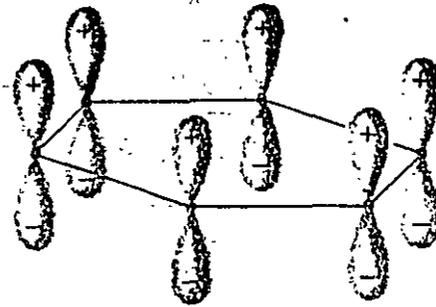
Grupo funcional	Nombre	Ejemplo	Nombre
$R-OH$	Hidróxi	$CH_3-CH(OH)-CH_3$	Propanol-2
$R-NH_2$	Amino	$CH_3CH_2-NH_2$	Etilamina
$R-COOH$	Acido Carboxílico	CH_3CH_2-COOH	Acido propanoico
$R-\overset{O}{\parallel}C-H$	Aldehído	$CH_3-\overset{O}{\parallel}C-H$	Acetaldehído
$R-\overset{O}{\parallel}C-R'$	Cetona	$CH_3-\overset{O}{\parallel}C-CH_3$	Acetona
$R-SH$	Tiol	CH_3-SH	Tiometano (metilmercaptano)
$R-NO_2$	Nitro		Nitrobenzeno

TABLA 15.8: GRUPOS FUNCIONALES DERIVADOS

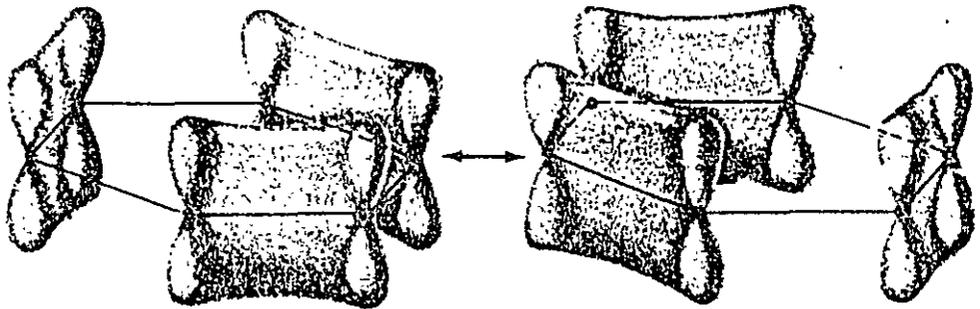
Grupo funcional derivado	Nombre	Ejemplo	Nombre
$R-O-\overset{O}{\parallel}C-R'$	Ester	$CH_3-O-\overset{O}{\parallel}C-$ 	Benzoato de metilo
$R-\overset{H}{\underset{ }{N}}-\overset{O}{\parallel}C-R'$	Amida	$\begin{array}{c} CH_3 \quad H \quad O \\ \quad \quad \\ CH-N-C-C_2H_5 \\ \\ CH_3 \end{array}$	N-Isopropilpropanamida
$R-O-R'$	Eter	$C_2H_5-O-C_2H_5$	Eter dietílico

FIGURA 15.35

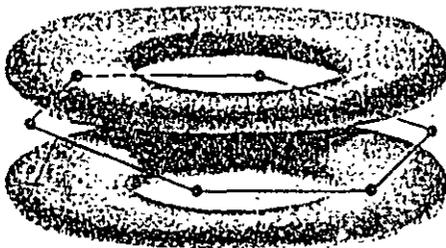
Enlaces π del benceno.



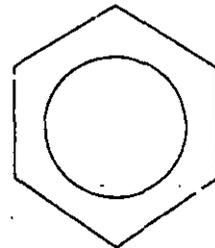
(a) Los seis orbitales atómicos $2p_z$



(b) Estructuras del benceno según la teoría de enlace de valencia. En cada representación hay tres enlaces π .

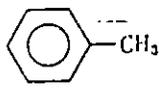


(c) El orbital molecular π de menor energía que enlaza a todos los átomos de carbono.

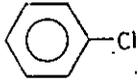


(d) Símbolo del benceno que presenta deslocalización de los electrones de valencia.

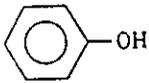
TABLA 15.4: ALGUNOS DERIVADOS DEL BENCENO



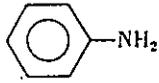
Tolueno
(metilbenceno)



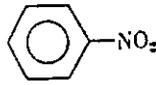
Clorobenceno



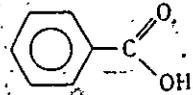
Fenol
(hidroxibenceno o
ácido carbólico)



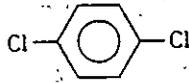
Anilina
(aminobenceno)



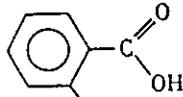
Nitrobenceno



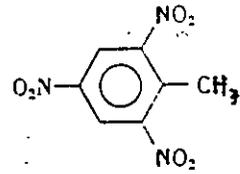
Acido benzóico



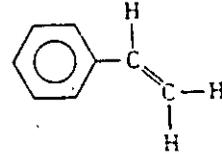
Paradiclorobenceno
(dicloro1,4-benceno)
(naftalina)



Acido acetilsalicílico
(aspirina)



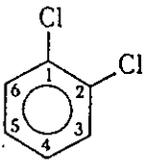
Trinitro 2,4,6 tolueno (TNT)
(trinitro-2,4,6-metilbenceno)



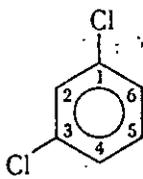
Estireno
(vinilbenceno o fenileno)

FIGURA 15.36

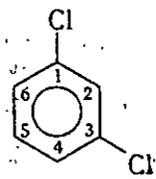
Los diclorobencenos.



(a) Ortodiclorobenceno.
Dicloro 1,2-benceno



(b) Metadiclorobenceno.
Dicloro 1,3-benceno



(c) Paradiclorobenceno.
Dicloro 1,4-benceno