



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN EN CIENCIAS DE LA TIERRA

***“USO DE MÉTODOS DIRECTO E INDIRECTO EN LA
CARACTERIZACIÓN DE UN SITIO CONTAMINADO POR
HIDROCARBUROS”***

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A :

DIANA ACEVEDO BERRUECOS

TUTOR:

M. EN I. ANA ALEJANDRINA CASTRO RODRÍGUEZ



2012

DEDICATORIA

A MIS PADRES MANUELA Y ARTURO

A MIS HERMANOS ERIKA Y MARCO

A MI CIELO ENRIQUE

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por traerme a este mundo, por sus consejos su entrega incondicional, por entregarse en cuerpo y alma a su familia. Gracias mamá por tu amor, por no dejarme nunca caer y tu motivación para que siempre siga adelante. Gracias por creer en mí y tenerme paciencia. Te amo mami.

Gracias a mi padre por apoyarme siempre que lo necesito, por sus consejos y paciencia. Gracias por los lindos momentos y la unión que enseñaste en su momento. Gracias papi te amo.

A mis hermanos les agradezco su apoyo y comprensión a lo largo de mi vida. Gracias por compartir una linda niñez a mi lado. Gracias porque siempre salimos adelante y por sus risas compartidas. Lo amo mi Pery y mi Mar.

Gracias a la vida que me dio la dicha y la fortuna de conocer al amor de mi vida, Enrique. Gracias por tu apoyo, por creer en mí y tenerme paciencia. Gracias por tus enseñanzas y por todos los lindos momentos compartidos. Gracias por ser mi inspiración y mi motivación cada día. Te amo mi Quique.

A mi querida amiga, confidente y tutora Alejandrina. Gracias por todo tu apoyo para lograr terminar este trabajo. Gracias por tus consejos y tus palabras alentadoras de seguir para no dejar este pequeño, pero importante trabajo para concluir un ciclo más de mi vida. Gracias Dios te bendiga a ti y a tu linda familia. Te quiero mucho Ale.

A la Dra. Iturbe por haberme permitido participar en este proyecto y su apoyo para lograr que saliera mejor. Gracias Dra. Rosario por la oportunidad y la paciencia.

Al Ing. Javier Urbieto, gracias por ayudarme a encontrar una salida y conclusión de este trabajo. Gracias por toda su dedicación, paciencia y amistad. Mil gracias por su apoyo.

A la Dra. Claudia Arango, Ing. Guillermina Pérez por su apoyo y asesoría en este trabajo.

Al Dr. Omar Delgado que incondicionalmente me dedicó un rato de su valioso tiempo, conocimiento y dedicación en la realización de este trabajo. Gracias Dr. Omar por su disposición y ayuda.

Al Ing. José Santos, por sus observaciones para la mejora de esta tesis y por su apreciable amistad. Gracias José por seguir aquí apoyando a los alumnos que te necesitamos.

Al Ing. Sergio Benigno, por sus opiniones dadas muy valiosa, que tiene tanta experiencia y conocimiento. Gracias por su amistad y la oportunidad que me dio de trabajar con usted. Gracias por su apoyo y sus palabras de aliento cuando lo necesité.

Gracias a mi querido y mejor amigo que conocí en la Universidad, mi gran amigo Manuel Becerril. Gracias por tu amistad, tu apoyo a este trabajo pero sobre todo en la carrera. Gracias por que cuando más te necesitaba siempre estuviste ahí. Sin importar la distancia y lo poco que nos vemos siempre serás mi mejor amigo, mi gran hermano.

A mis amigos que sin querer estuvimos juntos en este mismo tren de la vida, gracias porque también formaron parte importante en este camino de mi carrera: mi gran amiga Diana Ayala, a Leonardo Minchaca, José Luis, Antonio Reina por su ayuda en la exploración de este trabajo, Adriana que me ayudó mucho en el análisis del suelo. Gracias en verdad a todos aquellos que estuvieron compartiendo sus experiencias. Los aprecio mucho.

A mi querida y gran amiga la maestra Ángeles Pérez, quien ha sido un ejemplo y una motivación en mi vida. Gracias por sus consejos y su incondicional y apreciable amistad. Es una gran mujer y excelente ser humano. Gracias por encontrarla en mi camino. La quiero mucho.

Gracias a mis familiares que me han dado su apoyo incondicional, no terminaría de nombrarlos porque son muchos pero a todos los que siempre estuvieron cerca y me vieron llegar hasta aquí. Gracias por su confianza, apoyo y por creer en mí.

ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
Objetivo general.....	4
Objetivos particulares.....	4
Hipótesis.....	4
2. ANTECEDENTES	5
2.1 Situación de la contaminación por hidrocarburos en México.....	5
2.2 Caracterización con métodos directos en México.....	8
2.3 Geofísica y su relación con la contaminación del suelo.....	8
2.3.1 Método de corriente continua aplicado a contaminación de suelos por hidrocarburos.....	9
2.3.2 Antecedentes de prospección geofísica empleada para la caracterización de suelo contaminado por hidrocarburos.....	10
2.4 Caracterización con métodos indirectos en México.....	11
3. MARCO TEORICO	12
3.1 Características toxicológicas de los hidrocarburos.....	12
3.2 Contaminación del subsuelo, distribución y migración del hidrocarburo.....	13
3.3 Disposiciones legales NOM 138-SEMARNAT//SS-2003.....	14
3.4 Caracterización de un sitio contaminado.....	17
3.5 La geofísica ambiental.....	19
3.6 Fundamentos teóricos del método de corriente continua.....	19
3.6.1 Corrientes eléctricas en medios homogéneos y de capas horizontales en corriente continua.....	20
3.6.2 Medición del potencial eléctrico.....	22
3.6.2.1 Definición de arreglos geoelectrónicos.....	22
3.6.2.2 Resistividad aparente.....	23
3.6.3 Relación geológica y resistividad eléctrica.....	24
3.6.4 Métodos geoelectrónicos de corriente continua.....	25
3.6.4.1 Sondeo eléctrico vertical (sev).....	25
3.6.4.2 Calicata eléctrica.....	26
3.6.4.3 Tomografía eléctrica.....	27
3.6.5 Ventajas y desventajas de los diferentes arreglos.....	28
3.6.6 Configuraciones / dispositivos.....	29
3.6.6.1 Wenner.....	29
3.6.6.2 Wenner-Schlumberger.....	30
3.6.6.3 Polo-Polo.....	30
3.6.6.4 Polo-Dipolo.....	31
3.6.6.5 Dipolo-Dipolo.....	32
3.6.7 Definición del problema inverso.....	32
3.6.7.1 Teoría de inversión.....	33

3.6.7.2 Modelo de inversión 2D.....	35
4. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA.....	37
4.1 Ubicación de la zona.....	37
4.2 Geología regional.....	38
4.3 Geología local.....	38
4.4 Climatología y meteorología.....	39
4.4.1 Temperatura media.....	39
4.4.2 Precipitación pluvial.....	39
4.4.3 Otros fenómenos meteorológicos.....	40
4.5 Hidrología.....	40
4.6 Geohidrología.....	42
4.7 Geomorfología.....	43
4.8 Edafología.....	45
4.8.1 Uso del suelo.....	45
5. METODOLOGÍA.....	47
5.1 Muestreo del suelo contaminado.....	47
5.1.1 Ubicación de los puntos de muestreo.....	47
5.1.2 Descripción de los trabajos de perforación y muestreo de suelo.....	50
5.1.3 Descripción de los análisis químicos realizados.....	51
5.2 Perfiles de tomografía eléctrica en el sitio.....	52
5.2.1 Instrumentación y procedimiento de medición.....	52
5.2.2 Inversión de los datos.....	56
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
6.1 Resultados de la caracterización del suelo contaminado por el método directo.....	58
6.1.1 Hidrocarburos Fracción Media (HFM).....	58
6.1.2 Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares (HAP).....	60
6.1.3 Resultados de caracterización del suelo del sitio.....	64
6.1.4 Aplicación del modelo surfer. Áreas y volúmenes de suelo contaminado.....	65
6.2 Resultados de la caracterización del suelo contaminado por el método indirecto.....	70
6.2.1 Inversión de los perfiles de resistividad.....	70
6.3 Correlación del método directo (muestreo) y el método indirecto (Tomografía de resistividad eléctrica) en tres zonas diferentes.....	83
6.4 Discusión de los resultados.....	90
7. ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN DEL SUELO.....	91
7.1 Propuestas de remediación.....	92
7.1.1 Aplicación de posibles técnicas.....	92
7.2 Criterios para la selección de la tecnología.....	97
7.3 Recomendaciones de la técnica de remediación más adecuada.....	97

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	98
BIBLIOGRAFÍA.....	101
ANEXO Análisis granulométrico del suelo.....	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	2.1	Estas sustancias están involucradas en 72 % de los eventos ocurridos durante el año 2002.....	6
Figura	3.1	Modelo conceptual de un derrame, procesos de migración y dispersión en el suelo y la atmósfera.....	13
Figura	3.2	Representación de un dispositivo de resistividad.....	19
Figura	3.3	Vectores de densidad de corriente en semiespacio homogéneo, con electrodo puntual en la superficie límite.....	21
Figura	3.4	Esquema de la medición del potencial eléctrico.....	22
Figura	3.5	Diferentes dispositivos usados en sondeos eléctricos de resistividad 1D, 2D y 3D con sus correspondientes factores geométricos.....	23
Figura	3.6	Dispositivo electrónico convencional simétrico.....	26
Figura	3.7	Modelo de interpretación en 1D.....	26
Figura	3.8	Dispositivo Wenner.....	29
Figura	3.9	Dispositivo Wenner-Schlumberger.....	30
Figura	3.10	Dispositivo Polo-polo.....	30
Figura	3.11	Dispositivo Polo-Dipolo.....	31
Figura	3.12	Dispositivo Dipolo-dipolo.....	32
Figura	3.13	Arreglo de bloque rectangulares utilizados en el modelo 2D.....	36
Figura	4.1	Ubicación del estado de Puebla y la zona de estudio.....	37
Figura	4.2	Regiones hidrológicas del Estado de Puebla.....	41
Figura	4.3	Acuíferos del estado de Puebla.....	42
Figura	4.4	Geomorfología del estado de Puebla.....	44
Figura	5.1	Ubicación de los puntos de muestreo.....	47
Figura	5.2	Toma de muestra con el equipo Long Year.....	50
Figura	5.3	Fotografía del equipo SYSCAL Pro.....	53
Figura	5.4	Disposición de los perfiles y geometría empleada.....	53
Figura	5.5	Perfil 5 en la zona de estudio.....	54
Figura	5.6	Disposición del Perfil PUE1, se logra apreciar el diesel.....	55
Figura	5.7	Perfil ubicado en el punto de muestreo PUE1A.....	55
Figura	5.8	Perfil PUE18A y su arreglo geométrico.....	56
Figura	5.9	Perfil PUE18A y su arreglo geométrico.....	56
Figura	5.10	Muestreo ubicado en el perfil PUE1.....	56
Figura	6.1	Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares entre 0 y 3 m de profundidad.....	62
Figura	6.2	Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares entre 3 y 5 m de profundidad.....	63
Figura	6.3	Hidrocarburos Fracción Media entre 0 y 3 m de profundidad.....	67
Figura	6.4	Hidrocarburos Fracción Media entre 3 y 5 m de profundidad.....	68
Figura	6.5	Hidrocarburos Fracción Media entre 5 y 6 m de profundidad.....	69
Figura	6.6	Ubicación de las zonas más contaminadas y disposición de los tendidos de tomografía de resistividad eléctrica.....	71
Figura	6.7	Perfil 1. Inversión obtenida con el software RES2DINV.....	72
Figura	6.8	Perfil 2. Inversión obtenida con el software RES2DINV.....	73

Figura	6.9	Perfil 3. Inversión obtenida con el software RES2DINV.....	.73
Figura	6.10	Perfil 4. Inversión obtenida con el software RES2DINV.....	.74
Figura	6.11	Perfil 5. Inversión obtenida con el software RES2DINV.....	.75
Figura	6.12	Perfil 6. Inversión obtenida con el software RES2DINV.....	.75
Figura	6.13	Perfil 7. Inversión obtenida con el software RES2DINV.....	.76
Figura	6.14	Perfil 8. Inversión obtenida con el software RES2DINV.....	.77
Figura	A	Puntos de los datos de resistividad en ohm.m, de los 6 perfiles.....	.78
Figura	B	Cubo de resistividades en plano X-Y-Z de los 6 perfiles.....	.79
Figura	C	Delineación de la contaminación en un plano X-Y a 0.5 m de profundidad (zonas rojas).....	.80
Figura	D	Delineación de la contaminación en un plano X-Y a 1.0 m de profundidad (zonas rojas).....	.81
Figura	E	Delineación de la contaminación en un plano X-Y a 1.5 m de profundidad (zonas rojas).....	.82
Figura	6.15	Zona 1. Configuración del punto contaminado PUE1 y la ubicación del perfil 7.....	.84
Figura	6.16	Zona 3. Configuración de los puntos contaminados entre la superficie y 1m de profundidad, ubicación de los perfiles de tomografía.....	.85
Figura	6.17	Zona 3. Configuración de los puntos contaminados entre la 1 y 2.0 m de profundidad, ubicación de los perfiles de tomografía.....	.86
Figura	6.18	Zona 3. Configuración de los puntos contaminados entre la superficie y 1.5 m de profundidad, ubicación de los perfiles de tomografía.....	.88
Figura	6.19	Zona 4. Configuración de los puntos contaminados de 1.5 m de profundidad en adelante. Ubicación del perfil 8.....	.89
Figura	7.1	Representación esquemática de biolabranza.....	.93
Figura	7.2	Representación esquemática de un sistema de biopilas alargadas...	.94
Figura	7.3	Representación esquemática de un sistema de biopilas estáticas....	.95
Figura	1	Suelo PI-30 sin tamizar.....	.108
Figura	2	Suelo PI-80 sin tamizar.....	.108
Figura	3	Suelo PI-120 sin tamizar.....	.109
Figura	4	Suelo PII-30 sin tamizar.....	.109
Figura	5	Suelo PII-50 sin tamizar.....	.109
Figura	6	Disgregación del suelo para un mejor análisis.....	.109
Figura	7	Mezclas del análisis hidrométrico.....	.110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Hidrocarburos para analizarse en función del producto contaminante.....	14
Tabla 3.2	Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo.....	14
Tabla 3.3	Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos.....	15
Tabla 3.4	Puntos de muestreo de acuerdo al área contaminada.....	17
Tabla 3.5	Resistividad de algunas rocas, materiales y químicos.....	25
Tabla 4.1	Tipos de suelo en el estado de Puebla.....	45
Tabla 4.2	Uso potencial de la tierra en el estado de Puebla.....	46
Tabla 5.1	Puntos muestreados, profundidad y análisis.....	48
Tabla 5.2	Método de análisis para los parámetros de caracterización.....	52
Tabla 6.1	Concentraciones de hidrocarburos fracción media para las muestras de suelo.....	58
Tabla 6.2	Distribución de hidrocarburos por longitud de cadena.....	60
Tabla 6.3	Concentraciones de HAP para las muestras de suelo (mg/kg).....	64
Tabla 6.4	Límites máximos permisibles para HAP para suelos de uso industrial.....	65
Tabla 6.5	Parámetros físicos, químicos y biológicos.....	65
Tabla 6.6	Áreas y volúmenes contaminados con hidrocarburos fracción media entre la superficie y 3.0 m de profundidad.....	66
Tabla 6.7	Áreas y volúmenes contaminados con hidrocarburos fracción media entre 3.0 y 5.0 m de profundidad.....	66
Tabla 6.8	Áreas y volúmenes contaminados con hidrocarburos fracción media a más de 5.0 m de profundidad.....	70
Tabla 1	Análisis de resultados de la granulometría del suelo.....	115

RESUMEN

El siguiente trabajo se realizó en conjunto con el Instituto de Ingeniería y de Geofísica de la UNAM. La idea fue conjuntar dos metodologías para caracterizar un sitio contaminado con hidrocarburos: método directo (muestreo) y método indirecto (tomografía eléctrica 2D y 3D).

Con el método directo (muestreo), se obtuvieron 42 muestras en un área total de aproximadamente 23 055 m². Se analizaron HFM (Hidrocarburos Fracción Media) e HAP (Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares). Los análisis fueron realizados por el Laboratorio ABC. Química, Investigación y Análisis S.A. de C.V., con la aprobación de la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA). Se comparó este método con el indirecto (geofísica por el método de tomografía de resistividad eléctrica 2D y 3D); donde se realizaron seis perfiles paralelos utilizando una configuración dipolo-dipolo, y dos perfiles más cercanos al punto PUE1 y PUE18, donde se utilizó una configuración wenner-schlumberger.

Los resultados con el método directo son: nueve muestras rebasaron el LMP (Límite Máximo Permisible) para hidrocarburos fracción media, establecidos por la norma NOM-138-SEMARNAT//SS-2003, que es de 5,000 mg/kg, ocho reportaron un valor inferior y 25 reportaron ND (no detectado). Se calculó un volumen total de suelo afectado de 1 300 m³.

El método indirecto delineó la pluma contaminante y se obtuvo un volumen de 289 m³ a una profundidad de 3 m, en la zona 3 (donde se realizaron los seis perfiles). La contaminación presenta valores de entre 600 y 1 000 ohm-m. Las zonas limpias y/o el material del terreno se identifican con valores entre 25 y 40 ohm-m. En el caso de las resistividades entre 16 y 40 ohm-m corresponden a un material de relleno. Se concluye que la contaminación es puntual en algunas áreas. No se aprecia una migración del contaminante a mayores profundidades de 3 m, a excepción del punto PUE18 que se detectó la contaminación hasta 6 metros. Se muestra que la técnica del método indirecto es de gran utilidad para proponer puntos de muestreo directo que identifiquen la presencia del contaminante y la profundidad. La inversión de los datos bidimensionales logró definir la presencia del contaminante; sin embargo, con ayuda del software voxler, tridimensionalmente se tiene una mejor visualización del comportamiento del contaminante.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso vulnerable debido a que prácticamente casi todas las actividades se desarrollan en él, por lo que deliberada o inadvertidamente el hombre le ha provocado gran daño; por ejemplo, durante décadas no se consideró que la industrialización propiciaba el bienestar de la población a la vez que alteraba los sistemas naturales. En particular los hidrocarburos son parte elemental de los procesos industriales modernos, provocando que aumenten las posibilidades de contaminación por su derrame en el suelo.

La presencia de tales contaminantes en el suelo tiene repercusiones directas sobre la salud humana por efectos del contacto directo, inhalación o ingestión de los mismos. Por otra parte, su transporte a través del suelo puede originar la contaminación de los acuíferos, deteriorando la calidad del agua ahí presente, la cual en la mayoría de los casos es fuente de abastecimiento para las poblaciones aledañas, además de su uso agrícola.

En México existen diferentes fuentes generadoras de contaminación por hidrocarburos. Si tomamos en cuenta el volumen total de hidrocarburos que se manejan en sus diferentes actividades, en México se tienen tres principales generadores: Petróleos Mexicanos (PEMEX), Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Ferrocarriles Nacionales de México (FNM). El desarrollo de los siguientes capítulos es la contaminación de suelos por hidrocarburos en un ex taller de ferrocarriles localizado en el estado de Puebla, en la ciudad con el mismo nombre que fue una de las rutas ferroviarias comerciales más importantes entre México y Veracruz. Actualmente el uso del suelo en este sitio es industrial. Debido a su extensión del terreno que ocupan los talleres, hacer un muestreo detallado como se indica en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 puede resultar muy costoso el delimitar con mayor precisión la extensión de la contaminación ocasionada. Por esta razón, un método indirecto de bajo costo podría ser utilizado en conjunto con el método directo, para definir dicha extensión.

Es necesario identificar las principales características del sitio a estudiar debido a su influencia en el comportamiento de la contaminación en el suelo; entre ellas se encuentran geología regional y local, tipo de suelo, estratigrafía, la hidrología, topografía, profundidad del nivel freático, conductividad hidráulica, climatología y meteorología, población y servicios, entre otras.

Una vez que se conocen las características mencionadas de manera preliminar, se acude al sitio para corroborar y realizar un primer dictamen de la magnitud de la pluma contaminante y llevar a cabo un muestreo adecuado según lo indica la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación.

La técnica que la Norma estipula en la delimitación de áreas contaminadas por hidrocarburos es el muestreo directo, que consiste en la recolección de muestras de suelo las cuales se analizan en el laboratorio para identificar la concentración de contaminantes en él. La idea base del presente trabajo es proponer además, una técnica geofísica como alternativa complementaria al muestreo directo, que sea de gran ayuda para delimitar la extensión de la contaminación optimizando los puntos de muestreo. La técnica de tomografía de resistividad, está basada en la obtención de la resistividad del suelo impregnado del contaminante mediante la inyección de una corriente eléctrica.

Esta tesis se divide en ocho capítulos, el capítulo uno que es la introducción, el capítulo dos se desarrollan los antecedentes tanto de la situación de la contaminación por hidrocarburos en México como de las técnicas empleadas para su caracterización.

El capítulo tres aborda los fundamentos teóricos con la definición de los conceptos que se emplearán a lo largo del texto mientras que el capítulo cuatro detalla cada una de las características del lugar en los aspectos general y particular. En el capítulo quinto, se describe el método de trabajo para ambas técnicas, cuyos resultados se presentan en el capítulo seis. Con base en los resultados se proponen alternativas de remediación del suelo en el capítulo siete y en el ocho se desarrollan las conclusiones y recomendaciones finales. Por último se ofrece la bibliografía consultada y el anexo que contiene los análisis de la granulometría del suelo, además de gráficos ilustrativos.

Objetivo General

- ❖ Caracterizar la contaminación del suelo y subsuelo por hidrocarburos en el ex taller de ferrocarriles, estado de Puebla, por medio de dos métodos: el muestreo directo y el indirecto (geofísica por el método de tomografía de resistividad eléctrica 2D y 3D); con la finalidad de complementar los resultados obtenidos por ambos métodos para delimitar la zona afectada.

Objetivos Particulares

- ❖ Describir el muestreo de suelos con base en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.
- ❖ Analizar los datos de muestreo directo.
- ❖ Realizar la toma de datos de la tomografía de resistividad eléctrica con un arreglo Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger.
- ❖ Analizar datos de la tomografía ρ eléctrica y su relación con resultados del método directo.
- ❖ Proponer una técnica de remediación para el sitio contaminado.

Hipótesis

- ❖ Demostrar que con ayuda de herramientas como la geofísica, es posible caracterizar mejor la pluma contaminante en la zona.

2. ANTECEDENTES

2.1 SITUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS EN MÉXICO

El desarrollo económico en México durante la década de 1930 favoreció la concentración territorial de la industria; sin embargo, esto ocasionó una alta generación y acumulación de residuos potencialmente tóxicos (líquidos, sólidos y gaseosos), lo que provocó grandes afectaciones al medio ambiente. No fue sino hasta 1970 cuando se comenzó la aplicación de ciertos criterios ambientales para el control de estas afectaciones (Ortínez et al., 2003).

La industria petrolera es una de las más antiguas en México y la que maneja los mayores recursos dentro del marco industrial mexicano, por ende es de gran importancia dentro del modelo de desarrollo (Madrigal, 1998). Sin embargo, debido a la amplia gama de productos derivados del petróleo esta industria ha provocado impactos negativos en materia ambiental que no ha sido posible evaluar cuantitativamente (Saval, 1995). Estos efectos se remontan al comienzo de la década de 1970 en la que existió una política de bajos precios del petróleo que propició su uso intensivo y el crecimiento de la demanda de este combustible. En la segunda parte de esta década, la reestructuración productiva de la industria se modificó debido al crecimiento petrolero y con ello la petroquímica básica se convirtió en la actividad con mayor contribución a la contaminación debido a la producción de fibras sintéticas, resinas, fertilizantes, plásticos, pinturas y pigmentos y gases industriales. Los procesos para obtener estos productos se convirtieron en las actividades más relevantes por su impacto potencialmente al ambiente (Quadri, 1994).

Durante mucho tiempo las afectaciones al medio ambiente por la generación de residuos del petróleo no eran de interés por parte del gobierno o las instituciones, dando por hecho que la naturaleza limpiaba el ambiente, pero con el tiempo el aumento y la complejidad de estos residuos, modificaron la capacidad degradativa y amortiguadora de la naturaleza, provocando una alteración significativa en esta (Madrigal, 1998).

La infraestructura petrolera está integrada por pozos, baterías de separación, complejos procesadores de gas, centrales de almacenamiento y bombeo, red densa de ductos y presas para el confinamiento de desechos sólidos y líquidos procedentes de la perforación y mantenimiento de pozos (Madrigal, 1998). Estas instalaciones presentan riesgos inherentes de fugas de petróleo, diesel y gasolina por roturas de los ductos, así como filtración y derrames de aguas aceitosas de las presas durante el periodo de lluvias.

Como ejemplos se tienen los accidentes ocurridos en Petróleos Mexicanos (PEMEX) en los años 1995 y 1996, lo que llevó a crear la Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental, cuyo propósito fue implantar los sistemas de administración que permitieran tener operaciones más seguras y más respetuosas del medio ambiente. Este programa comenzó por definir, en mayo de 1998, la política de seguridad y protección ambiental a partir de la cual se construyó un sistema de administración: Sistema Integral de Administración de la Seguridad Industrial y la Protección Ambiental (SIASPA) (PEMEX, 2009).

Actualmente, los residuos generados por las actividades de esta industria, como catalizadores gastados y lodos aceitosos, son depositados en tambores, patios y fosas rústicas previas a su tratamiento y disposición final en sitios autorizados, con el objetivo de que sus afectaciones al medio ambiente sean mínimas. Aun así existen zonas contaminadas por hidrocarburos en gran parte del país, en las cuales tienen especial interés para su estudio y rehabilitación instituciones educativas, gubernamentales y privadas. De acuerdo con la información proporcionada por PEMEX, dos de los lugares más contaminados por hidrocarburos a nivel nacional son la refinería “Lázaro Cárdenas” y el Pantano de Santa Alejandrina, ubicados en el sureste de México (Veracruz y Tabasco) (González *et al.*, 1995).

Reportes sobre emergencias asociadas con materiales peligrosos por parte de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) en el año 2002 indican que las de mayor ocurrencia son las debidas al petróleo crudo, con 50%, seguidos de la gasolina con 14% de los casos, como se muestra en la figura siguiente.

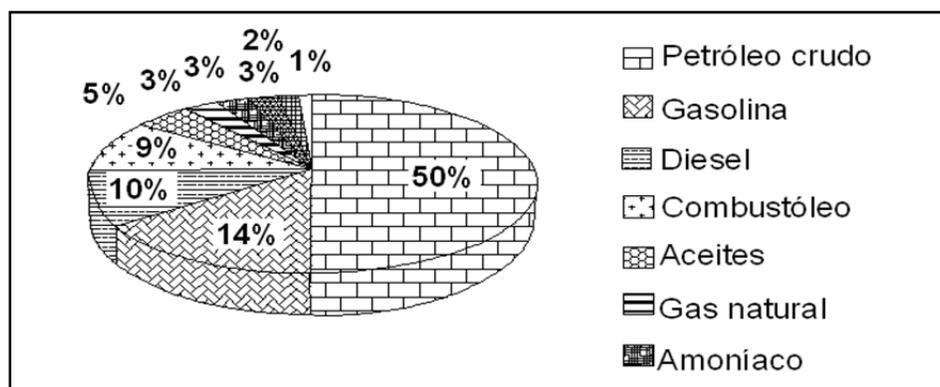


Figura 2.1. Estas sustancias están involucradas en 72 % de los eventos ocurridos durante el año 2002 (PROFEPA, 2002)

En México, los accidentes ligados a contaminación por hidrocarburos ocurren principalmente en la infraestructura de PEMEX debido a su gran cobertura. Aproximadamente 70% de los eventos de PEMEX afectan al suelo, 30% al agua y 10 % al aire (la suma no corresponde al 100% debido a que hay eventos que afectan a los tres recursos de forma simultánea). En promedio 40% de los eventos de PEMEX ocurren por fallas en el manejo de materiales, le siguen en orden de importancia tomas clandestinas, fallas de equipo y fallas humanas. En 11% de los casos la causa ha sido desconocida (PROFEPA, 2002). En tan solo tres estados donde PEMEX tiene instalaciones (Veracruz, Campeche y Tabasco) ocurre 88.7 % de todos los eventos de la paraestatal. En Puebla se tiene una ocurrencia de 19 casos de un total de 471 reportados en todo el país (PROFEPA, 2002).

Con base en los datos mencionados, se observa que en menor o mayor grado la contaminación de suelos y acuíferos por hidrocarburos se presenta durante las actividades de extracción, refinación, petroquímica, transporte, distribución, almacenamiento y comercialización, por lo que todas las partes de PEMEX están involucradas (Refinación, Exploración y Producción, Gas y Petroquímica Básica).

Otra de las empresas que contribuyó a la contaminación de aguas y suelos con aceites gastados fue Ferrocarriles Nacionales, la cual se debió al inadecuado almacenamiento de residuos y combustibles como la creosota y los aceites gastados (PROFEPA, 2002).

Los aspectos de protección ambiental no fueron considerados en Ferrocarriles Nacionales de manera formal sino hasta el año 1993, cuando se crea el Comité de Protección Ambiental. Al tiempo se elaboró un plan maestro, a desarrollarse en el periodo 1993-1996, que contemplaba la realización de auditorías ambientales en las 56 instalaciones de FNM en el territorio nacional (Madriral, 1998).

Seis meses después del inicio de este plan comenzó un programa de caracterización y análisis de áreas contaminadas, el cual revela contaminación en el 90% de los sitios debido a hidrocarburos en agua y suelo, principalmente diesel y aceite. Los trabajos de rehabilitación empleados en estos sitios utilizan tecnologías como bombeo y tratamiento, sistemas de venteo, barreras hidráulicas, excavación y disposición y biorremediación (*in situ* y fuera del sitio). La más empleada es esta última debido, entre otros motivos, a los bajos costos y a que no presenta impactos adversos al medio ambiente. (Madriral, 1998).

2.2 CARACTERIZACIÓN CON MÉTODOS DIRECTOS EN MÉXICO

En México la afectación de suelos por contaminación de hidrocarburos ha provocado un gran problema ambiental. Los estudios de estas afectaciones tienen pocos años de haberse iniciado, prácticamente las últimas dos décadas (Saval, 1995) y están siendo realizados principalmente por universidades o centros de investigación del país (Iturbe *et al.*, 2002; Iturbe, 2003; Iturbe *et al.* 2007a; Iturbe *et al.*, 2007b.; Pérez *et al.*, 2004; Ferrera-Cerrato *et al.*, 2006; Hernández-Acosta *et al.*, 2006; Beltrán-Paz y Vela-Correa, 2009; Figueroa y Ávila, 2006, entre otros).

A la fecha existen algunos avances en México en materia ambiental relacionada con los hidrocarburos; sin embargo, la mayoría de las acciones orientadas a la caracterización y remediación de sitios contaminados no cuentan con el suficiente interés en la recuperación y revitalización de sitios contaminados además de no contar con una plataforma financiera que permita el logro de los objetivos del Programa Nacional para la Remediación de Sitios Contaminados (PNSC) (SEMARNAT, 2010). Los principales avances son la norma oficial mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, donde se establecen los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación, publicada en el año 2005. Además se tienen las normas mexicanas NMX-AA-134-SFCI-2006 para llevar a cabo los análisis químicos de muestras de suelos con hidrocarburos fracción pesada, NMX-AA-14-SFCI-2006, para análisis químicos de muestra de suelos con BTEX y el proyecto de norma NMX-AA-105-SCFI-2007 para los análisis químicos de muestra de suelos con hidrocarburos fracción ligera (SEMARNAT, 2008). Y por último, la guía técnica para orientar en la elaboración de estudios de caracterización de estudios contaminados, cuya primera edición es del año 2010 (SEMARNAT, 2010a).

2.3 GEOFÍSICA Y SU RELACIÓN CON LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO

En los últimos años, la resolución de problemas de carácter ambiental con la ayuda de la geofísica ha cobrado singular importancia dentro de las ciencias de la tierra. Los problemas de contaminación de suelos y aguas por actividad antrópica, su análisis, así como la viabilidad de control de dichos procesos y los posibles procedimientos de descontaminación han dado un gran impulso a esta área del conocimiento. La geofísica

propone diferentes procedimientos y aplicaciones por medio de métodos como prospección eléctrica, GPR (Ground Penetrating Radar, por sus siglas en inglés), electromagnética entre otros, que son una valiosa herramienta para la evaluación de los problemas ambientales.

2.3.1 Método de corriente continua aplicado a contaminación de suelos por hidrocarburos

La información sobre sitios contaminados por hidrocarburos es relativamente nueva y poco investigada en cuanto a la implementación del método de prospección eléctrica (corriente continua), que consiste en la medición de la respuesta eléctrica del subsuelo (resistividad eléctrica) para posteriormente ser interpretado con ayuda de un modelo geológico.

La presencia de contaminantes en las rocas, en particular son hidrocarburos, modifican la resistividad eléctrica, creando un contraste de resistividades entre las formaciones no contaminadas y las contaminadas. Esta diferencia depende, entre otros factores, de la antigüedad del derrame y tipo de hidrocarburo. Para el caso de derrames recientes, los suelos reportan valores de alta resistividad (debido a que es la firma resistiva del hidrocarburo) y cuando el derrame es antiguo, se observa lo contrario, es decir, la contaminación presenta valores de baja resistividad. Según Sauck, (2001) la anomalía de baja resistividad se debe a un aumento de los sólidos totales disueltos en el entorno ácido creado por la acción bacteriana en la parte inferior de la zona vadosa.

Hernández *et al* (2008) realiza una aplicación conjunta de métodos directos (Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs)) e indirectos (Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y Perfilaje Electromagnético (PEM)), en la caracterización de un sitio urbano contaminado en donde se logró identificar diferentes zonas en función del tiempo de residencia del derrame. Comparando y complementando los resultados de los métodos indirectos y directos (muestreo de suelo, agua y producto en fase libre) se encontraron zonas contaminadas con gasolina magna que ha sido acumulada en el subsuelo por aproximadamente 10 años, con anomalías de resistividades bajas.

Shevnin *et al.*,(2005) siguen estudiando el comportamiento de los sitios contaminados por hidrocarburos considerando parámetros como la porosidad del suelo, el contenido de arcilla y la capacidad de intercambio catiónico, con el objetivo de dar una mejor interpretación a los modelos de resistividades acotando más las propiedades físicas

presentes del subsuelo. El interés por estos parámetros se debe a las posibles interpretaciones erróneas en la presencia de hidrocarburos en las imágenes de resistividad; por ejemplo, conociendo el porcentaje existente de arcilla en el subsuelo se puede interpretar si la resistividad corresponde a ella o a la presencia de hidrocarburos intemperizados.

2.3.2 Antecedentes de técnicas de prospección geofísica empleadas para la caracterización de suelo contaminado por hidrocarburos

Las principales propiedades físicas de los contaminantes orgánicos, como líquidos ligeros en fase no acuosa (LNAPL, por sus siglas en inglés) y líquidos densos de fase no acuosa (DNAPL, por sus siglas en inglés), que pueden ser detectados con métodos geofísicos son los parámetros eléctricos de conductividad y permitividad (Daniels *et al.*, 1995)

Los problemas en la detección de hidrocarburos y líquidos de fase acuosa (NAPL) se han aproximado a través de diferentes caminos. Se usa la geofísica para definir estructuras geológicas confinadas que son las que controlan la migración de los contaminantes. Volkov *et al.*, (2000) examinó los efectos del hidrocarburo y sus derivados sobre las propiedades eléctricas de los suelos y encontró que los principales procesos que controlan los cambios en la resistividad en ellos son la evaporación del agua y los cambios relacionados en la mineralización (Pellerin, 2001).

El GPR proporciona una señal de imagen de alta resolución de los componentes de la pluma, especialmente en la zona vadosa sobre el nivel freático. Lopes *et al.* (2003) llevó a cabo un estudio con GPR para detectar y monitorear una pluma contaminante producida por el goteo de un tanque de almacenamiento enterrado. Diferentes frecuencias de radar fueron usadas para la caracterización de la pluma de LNAPL; encontró así que los datos de GPR a 400 y 200 MHz dieron la mejor relación entre resolución y profundidad de penetración en el estudio del sitio. La presencia de LNAPL en la zona vadosa fue fácilmente detectada por una zona de fuertes reflejos disminuidos.

Otros métodos geofísicos para la caracterización de suelos contaminados se utilizaron por Madrid *et al.* (2002), que reporta que el levantamiento por inducción electromagnética es sensible a la presencia de hidrocarburos en medios porosos debido a que la pluma de petróleo puede ser delineada como valores altos de resistividad ya que los hidrocarburos son menos conductivos que el agua. Por otro lado, que la pluma también puede ser

delimitada como valores bajos de resistividad cuando existe la presencia de compuestos inorgánicos que incrementen los sólidos totales disueltos en el agua.

Atekwana (2003), propone un modelo al igual que Sauck, que la actividad bacteriana produce ácidos que reaccionan con la parte sólida del suelo. Esta actividad produce surfactantes que al mismo tiempo generan una biopelícula que se adhiere a las paredes de los granos del suelo, provocando que aumente la conductividad superficial, siendo este el factor predominante en la disminución de la resistividad del suelo y no debida al aumento de la conductividad electrolítica como plantea Sauck.

2.4 CARACTERIZACIÓN CON MÉTODOS INDIRECTOS EN MÉXICO

Algunos de los trabajos realizados en la caracterización con métodos indirectos en México, fue realizado por Shevnin *et. al.* (2005), en el estado de Tabasco. Ellos realizaron una caracterización geoeléctrica en un sitio contaminado por hidrocarburos, utilizando el método de Sondeo Eléctrico Vertical con la tecnología de Imagen de Resistividad e Interpretación en 2D. Para su interpretación estos datos estuvieron apoyados en mediciones de resistividad de suelo y agua. Las zonas contaminadas corresponden con anomalías de baja resistividad eléctrica y la concentración de contaminantes confirma la existencia de contaminación madura, la cual crea anomalías de baja resistividad.

Un caso más fue analizado cerca de Cárdenas, Tabasco, en una zona de contaminación por hidrocarburos provocada por la fuga de una línea de ductos (Delgado *et al.* 2005). El estudio consistió en el método SEV en la variante de tomografía. Seis perfiles dispuestos paralelos fueron medidos y sus resultados presentados en mapas y secciones. Aunque el grado de contaminación en este sitio fue bajo, localizaron dos zonas contaminadas dentro del acuífero. Además, caracterizaron el acuífero y el acuitardo con base en su resistividad, contenido de arcilla, porosidad y capacidad de intercambio catiónico. Los valores de resistividad fueron recalculados a valores de parámetros petrofísicos utilizando un algoritmo de inversión que toma en cuenta la salinidad del agua de poro.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 CARACTERÍSTICAS TOXICOLÓGICAS DE LOS HIDROCARBUROS

Algunos de los compuestos de los TPH (Hidrocarburos Totales del Petróleo) pueden perjudicar al sistema nervioso. Un compuesto puede producir dolores de cabeza y mareo en altos niveles en el aire. Otro de los compuestos puede causar una afección a los nervios llamada “neuropatía periférica,” que consiste en adormecimiento de los pies y las piernas. Otros compuestos de los TPH pueden producir efectos a la sangre, al sistema inmunitario, los pulmones, la piel y los ojos.

Algunos de los experimentos realizados con animales, han demostrado efectos en los pulmones, el sistema nervioso central, el hígado y los riñones a causa de la exposición a compuestos de los TPH. También se ha demostrado que ciertos compuestos de los TPH pueden afectar la reproducción y el feto en animales (ATSDR, 1995).

Los hidrocarburos aromáticos polinucleares son un grupo de sustancias químicas formadas durante la incompleta combustión del carbón, aceite, gas, madera, basuras, u otras sustancias orgánicas. Los HAPs pueden ser también sintéticos o de ocurrencia general. Se encuentran en el aire, el agua y el suelo. Hay más de 100 diferentes compuestos de HAPs y los efectos a la salud de cada uno de estos, no son exactamente los mismos (ATSDR, 1995).

En ciertas circunstancias, los HAPs pueden ser dañinos para la salud. Varios HAPs como benzo(a)pireno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, criseno, dibenzo(a,h)antraceno e indeno(1,2,3-c,d)pireno, demuestran que las personas expuestas a través de la respiración o el contacto con la piel durante largos periodos de tiempo con mezclas que contienen HAPs y otros compuestos también pueden contraer cáncer.

Los estudios realizados en animales han demostrado que los HAPs pueden causar efectos dañinos en la piel, los fluidos corporales y el sistema que utiliza el cuerpo para combatir las enfermedades después de exposiciones tanto a corto como a largo plazo. Estos efectos no se han observado en los seres humanos. El Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) ha determinado que en benzo(a)antraceno, el benzo(b)fluoranteno, el benzo(j)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, el dibenzo(a,h)antraceno, el criseno y el indeno(1,2,3-c,d)pireno son reconocidos carcinógenos animales (ATSDR, 1995).

3.2 CONTAMINACIÓN DEL SUBSUELO, DISTRIBUCIÓN Y MIGRACIÓN DEL HIDROCARBURO

El impacto ambiental de los desechos liberados sería mínimo si permanecieran en el punto de liberación; desafortunadamente, la mayoría de los desechos migran hasta afectar un área extensa. Esta migración es generalmente a través de capas permeables, estructuras geológicas o aguas subterráneas. Es por esto que la principal preocupación de los derrames de estos compuestos es el potencial de migración que posee en diferentes direcciones en la zona saturada y en dirección vertical en la zona no saturada (Madrid *et al.*, 2002).

Los derrames y fugas de hidrocarburos en suelos se pueden infiltrar dentro de este hasta alcanzar grandes extensiones y afectar al medio ambiente. Para que el proceso de transporte y movilidad de los LNAPLs se lleve a cabo debe existir una variedad de parámetros. Entre ellos se pueden considerar las propiedades del propio LNAPL como la densidad, la viscosidad, la solubilidad, la presión de vapor, la volatilidad y la tensión interfacial, además de las características del suelo en el que se propaga (fuerza o presión capilar, distribución del tamaño de poros y contenido de agua inicial, estructura geológica de los estratos y características de las aguas subterráneas) y las funciones dependientes de la saturación (saturación residual y permeabilidad relativa).

El comportamiento de los productos del petróleo no siempre sigue el gradiente que se espera. La dirección, transporte y flujo multifase de los hidrocarburos dependen de procesos geoquímicos y procesos de volatilización, disolución, biodegradación, transporte y adsorción (figura 3.1). Los hidrocarburos pueden presentarse en el subsuelo en cualquiera de las siguientes fases: vapor, líquido, fase adsorbida y fase disuelta (Madrigal, 1998). De acuerdo con estas fases es el comportamiento que tendrá el contaminante al entrar en contacto con la matriz envolvente así como su migración hacia el subsuelo.

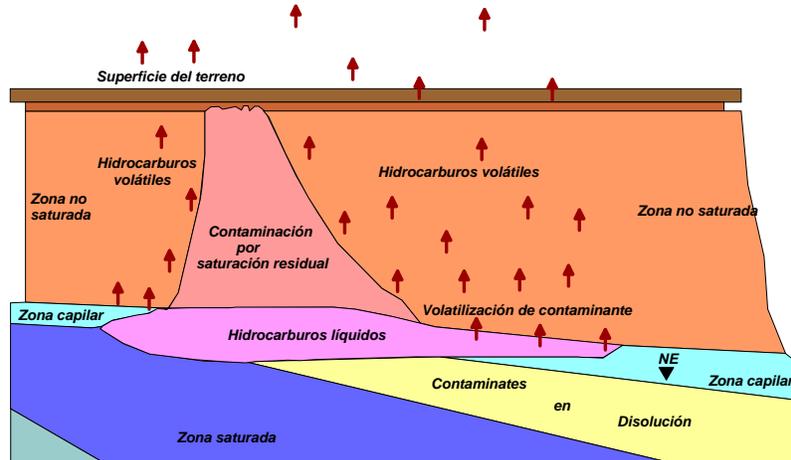


Figura 3.1 Modelo conceptual de un derrame, procesos de migración y dispersión en el suelo y la atmósfera.

Cuando se logra identificar un derrame de hidrocarburos o la fuente principal de la contaminación se deben llevar a cabo las acciones pertinentes para conocer el impacto de su migración y las posibilidades del saneamiento del suelo. Estas acciones se encuentran basadas en normas que cada país ha definido; en México se cuenta con una norma que permite evaluar la concentración de la contaminación por hidrocarburos para los diferentes usos de suelos, ya que hasta el año 2005 las caracterizaciones de los sitios contaminados se efectuaban con base en normas extranjeras.

3.3 DISPOSICIONES LEGALES NOM 138-SEMARNAT//SS-2003

Esta norma se titula "Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación." Debido a que los derrames por donde circulan los hidrocarburos ponen en peligro la integridad de los ecosistemas y la preservación de los recursos naturales por las sustancias que involucran, se estableció esta norma que tiene como objetivo definir los límites máximos permisibles (LMP) de contaminación en suelos por hidrocarburos, la caracterización del sitio y los procedimientos para la remediación para identificar los causantes de la contaminación.

En las tablas 3.1 y 3.2 se observan los hidrocarburos que deben analizarse en función del producto contaminante y sus LMP de acuerdo al uso de suelo predominante. La tabla 3.3 muestra los LMP para hidrocarburos específicos.

Tabla 3.1 Hidrocarburos para analizarse en función del producto contaminante.

PRODUCTO CONTAMINANTE	HIDROCARBUROS					
	FRACCIÓN PESADA	HAPs	FRACCIÓN MEDIA	HAPS	FRACCIÓN LIGERA	BTEX
Mezclas	X	X	X	X	X	X
Petróleo crudo	X	X	X	X	X	X
Combustóleo	X	X				
Parafinas	X	X				
Petrolatos	X	X				
Aceites	X	X				
Gasóleo			X	X		
Diesel			X	X		
Turbosina			X	X		
Keroseno			X	X		
Creosota			X	X		
Gasavión					X	X
Gasolvente					X	X
Gasolinas					X	X
Gasnafta					X	X

Tabla 3.2 Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo. 1. Para uso de suelo mixto, deberá aplicarse la especificación al menor valor de los usos de suelo involucrados. 2. Agrícola incluye suelo forestal, recreativo y de conservación. 3. Industrial incluye comercial.

FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS	Uso de suelo predominante ¹ (mg/kg base seca)		
	Agrícola ²	Residual	Industrial ³
Ligera	200	200	500
Media	1,200	1,200	5,000
Pesada	3,000	3,000	6,000

Tabla 3.3 Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos. 1. Para uso de suelo mixto, deberá aplicarse la especificación al menor valor de los usos de suelo involucrados. 2. Agrícola incluye suelo forestal, recreativo y de conservación. 3. Industrial incluye comercial. 4. la determinación de hidrocarburos aromáticos polinucleares deberá realizarse únicamente en los casos que se pretenda demostrar que se está cumpliendo con los límites máximos permisibles.

HIDROCARBUROS ESPECÍFICOS	Uso de suelo predominante ¹ (mg/kg base seca)		
	Agrícola ²	Residual ³	Industrial
Benceno	6	6	15
Tolueno	40	40	100
Etilbenceno	10	10	25
Xilenos	40	40	100
Benzo[a]pireno4	2	2	10
Dibenzo[a,h]antraceno4	2	2	10
Benzo[a]antraceno4	2	2	10
Benzo[b]fluoranteno4	2	2	10
Benzo[k]fluoranteno4	8	8	80
Indeno (1,2,3-cd)pireno4	2	2	10

Para las especificaciones de la caracterización, la norma establece que debe contener como mínimo los siguientes elementos:

- ❖ Descripción del sitio y de la afectación. Se realiza un levantamiento topográfico para la construcción de un mapa en coordenadas UTM y a una escala adecuada donde se identifiquen los puntos de muestreo además de conocer los antecedentes del lugar afectado así como reportar el tipo de contaminante.
- ❖ Estrategia de muestreo. En este caso, el muestreo se debe realizar por el método dirigido o estadístico. La cantidad de puntos a muestrear debe cubrir la zona afectada y se debe tomar el mínimo establecido dependiendo de la superficie de afectación (Véase Nom-138-SEMARNAT//SS-2003).
- ❖ Plan de muestreo. La norma plantea que el responsable tenga un plan de muestreo sustentado en la ubicación de los puntos, la profundidad y el volumen de las muestras y se lo comunique a su equipo, asignando a cada quien una actividad. Otro aspecto importante es enfrascar de forma adecuada la muestra, además de llevar su respectiva cadena de custodia (registro que acompaña a las muestras desde su obtención hasta su entrega al laboratorio de pruebas y análisis) y realizar un duplicado por cada 10.
- ❖ Informe. Como mínimo debe contener los datos anteriores, así como los resultados de los análisis, los métodos y la interpretación de resultados.

Otro de los contenidos de la norma es el referente a las especificaciones para la remediación. Las técnicas serán aplicadas al suelo que presente valores por encima de los LMP que marca la norma.

En la evaluación de riesgo al ambiente y a la salud, la finalidad será establecer cualquiera de las especificaciones siguientes:

- ❖ Acciones de remediación con base en niveles específicos.
- ❖ Acciones de remediación para disminuir los riesgos y la exposición a los contaminantes.
- ❖ Acciones de monitoreo.

El riesgo ambiental se evaluará, como mínimo, con base en la determinación de la dispersión de los contaminantes y la capacidad de su retención en el suelo, así como la exposición y toxicidad de los contaminantes a los organismos residentes en el sitio.

3.4 CARACTERIZACIÓN DE UN SITIO CONTAMINADO

El objetivo de esta actividad es contar con la información del sitio para conocer la dimensión de la afectación (Iturbe, apuntes 2009). La caracterización de un sitio contaminado es muy importante para tener un amplio conocimiento de las características y condiciones del lugar. Así, se busca definir una técnica de remediación efectiva, que logre bajar las concentraciones del contaminante utilizando la tecnología necesaria. La caracterización que se realizó en el presente trabajo está basada en NOM 138-SEMARNAT//SS-2003.

El primer paso de la caracterización es el gabinete, que implica recabar la mayor información del sitio para conocer la dimensión de la afectación; en seguida se enlistan algunos de los aspectos importantes que no se deben pasar por alto en la investigación del sitio:

- ❖ Geología. Tanto regional como local, describir la estructura geológica y la clasificación del tipo de suelo y subsuelo.
- ❖ Hidrología. Definir la región hidrogeológica, los cuerpos de aguas existentes en el área, el volumen promedio anual de lluvia, las principales corrientes subterráneas y las corrientes superficiales.
- ❖ Geohidrología local. Profundidad del nivel freático, dirección del flujo de la corriente subterránea y conductividad hidráulica.
- ❖ Climatología y meteorología. Tipo de clima, temperaturas, precipitación promedio anual.
- ❖ Plano de localización. Debe incluir una escala adecuada para poder ubicar la zona afectada, acceso y vías de comunicación.
- ❖ La información recabada permitirá proponer un primer diagnóstico general del movimiento del contaminante a través del medio poroso.

Después de tener la información organizada y entendida se procede a hacer una visita de inspección. En ésta se constata la información preliminar del sitio, además de reconocer físicamente la zona e instalaciones, las causas de la contaminación y la magnitud de impacto. Con esta visita es posible plantear un plan de muestreo, que va a proporcionar la información complementaria para realizar un acertado diagnóstico de la contaminación, por eso es de importancia elaborar un plan que permita abarcar toda el área afectada.

En la NOM-138-SEMARNAT-2003, se señala que en el muestreo dirigido se deben tomar como mínimo el número de puntos de muestreo en superficie de acuerdo con la tabla 3.4.

Cuando el muestreo dirigido no permita delimitar la distribución horizontal y vertical de la zona afectada, ni el tipo de contaminantes y su concentración, se realiza una estrategia de muestreo considerando métodos estadísticos.

Tabla 3.4 Puntos de muestreo de acuerdo al área contaminada.

AREA CONTAMINADA (ha)	PUNTOS DE MUESTREO
hasta 0.1	4
0.2	8
0.3	12
0.4	14
0.5	15
0.6	16
0.7	17
0.8	18
0.9	19
1.0	20
2.0	25
3.0	27
4.0	30
5.0	33
10.0	38
15.0	40
20.0	45
30.0	50
40.0	53
50.0	55
100.0	60

El plan de muestreo debe contener los puntos siguientes:

- ❖ Establecer y definir las responsabilidades del personal involucrado en cada procedimiento.
- ❖ Sustentar la ubicación y el número de puntos de muestreo, la profundidad y el volumen de las muestras.
- ❖ Describir la técnica, el equipo de muestreo y las medidas de seguridad.
- ❖ Establecer las medidas de aseguramiento de calidad del muestreo, incluyendo la cadena de custodia.
- ❖ Especificar los recipientes, el modo de preservación y el tipo de transporte de la muestra.

Las muestras, siempre deben ser simples, esto es, que el material colectado se tome en un solo punto. Para obtener la muestra no se deben utilizar equipos que necesiten fluidos de perforación y que ocasionen la pérdida de hidrocarburos volátiles. Como un procedimiento de aseguramiento de calidad, la norma dice que se debe obtener y analizar una muestra duplicada por cada diez muestras tomadas.

Los recipientes deben ser nuevos o libres de contaminantes. Para analizar hidrocarburos fracción ligera y BTEX, la muestra se tomará en recipientes independientes del resto de las fracciones. Los frascos deben rotularse con la básica información siguiente:

- ❖ Nombre de quien tomó la muestra.
- ❖ Fecha y hora de muestreo.
- ❖ Nombre de la empresa.
- ❖ Lugar de muestreo.
- ❖ Número o clave de identificación.

Por último, se debe realizar un reporte que incluya lo establecido en los puntos mencionados así como los resultados de los análisis los métodos utilizados, la interpretación de los resultados y la cadena de custodia.

3.5 LA GEOFÍSICA AMBIENTAL

A lo largo de la década de 1990, los métodos utilizados para caracterizar los sitios contaminados con desechos peligrosos han cambiado considerablemente. La caracterización de los sitios, a menudo requiere de un largo plazo para la obtención de datos suficientes que apoyen las decisiones correctivas. Las prácticas anteriores han llevado a la aparición de una serie de técnicas innovadoras, diseñadas para acelerar la obtención de datos, aumentar la cantidad de información recopilada y reducir el costo general de los datos coleccionados. El conjunto de tecnologías que ha encontrado una aplicación natural en el contexto de optimizar la caracterización de sitios contaminados ha sido la caracterización de tecnologías geofísicas (GPR, Electromagnética, Sísmica de reflexión/Refracción, Resistividad y Conductividad Eléctrica, Magnetometría) (EPA, 2000). La técnica utilizada en el presente trabajo fue prospección eléctrica, cuyos fundamentos teóricos se describen a continuación.

3.6 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE CORRIENTE CONTINUA

El método de exploración eléctrica de corriente continua estudia, por medio de mediciones en la superficie, la distribución de la propiedad de resistividad en el subsuelo.

Las rocas son agregados de minerales con una serie de propiedades físicas que, analizadas por medio de diversos equipos (dependiendo la metodología), permiten inferir el tipo de roca o estructura geológica asociada. Una de estas metodologías es la prospección eléctrica de corriente continua, en la que es inyectado al terreno para

generar un campo eléctrico corriente eléctrica desde la superficie y el cual registra la respuesta del medio a esta perturbación. Esta respuesta está en función de las propiedades eléctricas de las rocas, en particular la capacidad de conducir corriente (resistencia o conductividad).

3.6.1 Corrientes eléctricas en medios homogéneos y de capas horizontales en corriente continua

Para establecer un campo eléctrico en un medio de resistividad ρ , es necesario hacer circular una corriente eléctrica por medio de dos fuentes (electrodos de corriente) (Figura 3.2). Este sistema de exploración geoelectrica se compone de un generador que transmite corriente eléctrica directa por medio de cables cuyos extremos se unen a los electrodos (barras conductoras de metal) enterradas en la superficie del terreno, generando un circuito eléctrico.

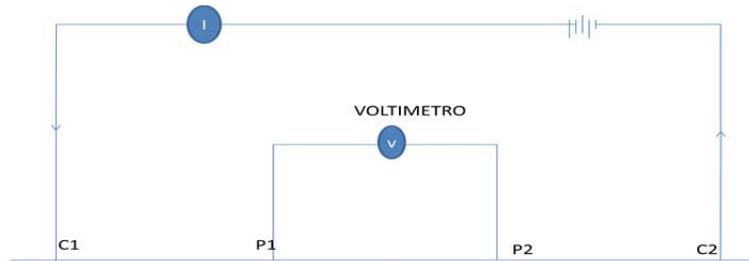


Figura 3.2 Representación de un dispositivo de resistividad.

Para resolver el campo eléctrico generado por este sistema de electrodos nos basamos en las ecuaciones siguientes (Orellana, 1982):

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{Ley de Faraday} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad \text{Ley de Ampere} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \text{Ley de Continuidad} \quad (3.3)$$

$$J = \sigma E \quad \text{Ley de Ohm} \quad (3.4)$$

La Ley de Faraday establece que, al existir un campo magnético (B) que varía en el tiempo, es compensado por un campo eléctrico. A su vez, la Ley de Ampere indica que el flujo de una corriente eléctrica produce un campo magnético en el espacio circundante. La Ley de continuidad establece que en un medio sin cargas puntuales ($\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$) la corriente introducida en un volumen de control debe necesariamente salir de él a la misma tasa. La

Ley de Ohm representa la densidad de corriente J en un punto teniendo la misma dirección y sentido que el campo E en el mismo punto, y es proporcional a él. σ es la conductividad, inversa de la resistividad ρ .

Para el caso específico de un campo eléctrico producto de una fuente de corriente continua, las ecuaciones de Maxwell se reducen a un sistema vectorial estacionario:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (3.5)$$

$$\nabla \times H = J \quad (3.6)$$

De tal forma que el campo eléctrico es irrotacional, es decir deriva de un potencial escalar U , tal que:

$$\vec{E} = -\nabla U \quad (3.7)$$

Considerando la ecuación de continuidad y la Ley de Ohm e insertando la definición de potencial escalar, tenemos que:

$$\nabla \cdot \vec{J} = \nabla \cdot (\sigma \vec{E}) = \sigma \nabla \cdot \vec{E} + \vec{E} \cdot \nabla \sigma = -\sigma \nabla \cdot \nabla U + \vec{E} \cdot \nabla \sigma = -\sigma \nabla^2 U + \vec{E} \cdot \nabla \sigma = 0 \quad (3.8)$$

Si la conductividad de un medio es uniforme el gradiente de la conductividad es cero, de tal forma que el potencial eléctrico en condiciones estacionarias cumple con la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 U = 0 \quad (3.9)$$

Si se traza alrededor de un electrodo $C1$ y dentro del semiespacio inferior una superficie semiesférica, en cualquier punto de ella, por razón de simetría, la densidad de corriente J tendrá el mismo valor y estará dirigida radialmente (figura. 3.3). La integral de J sobre la superficie semiesférica será igual a I por lo que si el radio es r se tiene:

$$2\pi r^2 J = I \quad (3.10)$$

$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (3.11)$$

Donde

$$|E| = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (3.12)$$

Esto significa que el campo E de un electrodo es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia r .

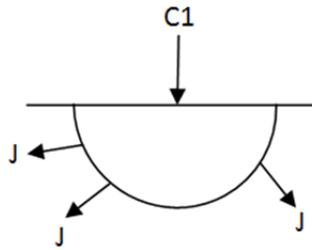


Figura 3.3 Vectores de densidad de corriente en semiespacio homogéneo, con electrodo puntual en la superficie límite (Orellana, 1982).

3.6.2 Medición del potencial eléctrico

3.6.2.1 Definición de arreglos geoelectrónicos

Para medir el potencial eléctrico se utilizan dos barras a modo de electrodos (P1 y P2) que miden la diferencia de potencial, como se muestra en la figura 3.4.

Figura 3.4 Esquema de la medición del potencial eléctrico.

La diferencia de potencial I entre los electrodos de voltaje V , es la diferencia de la suma de los potenciales asociados a los electrodos de corriente en cada punto (P1, P2). Si el medio es homogéneo de resistividad ρ , la diferencia de potencial es (Orellana, 1982).

$$\nabla U = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right] \quad (3.13)$$

Donde r_1 , r_2 , r_3 y r_4 son la distancia entre electrodos. Despejando la resistividad de la ecuación 2.13, la expresión queda

$$\rho = k \frac{\Delta U}{I} \quad (3.14)$$

Donde

$$k = 2\pi \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right]^{-1} \quad (3.15)$$

es un factor geométrico que depende de la disposición de los electrodos. Tomando en cuenta esto, se pueden definir diferentes tipos de arreglos geométricos de electrodos (figura 3.5).

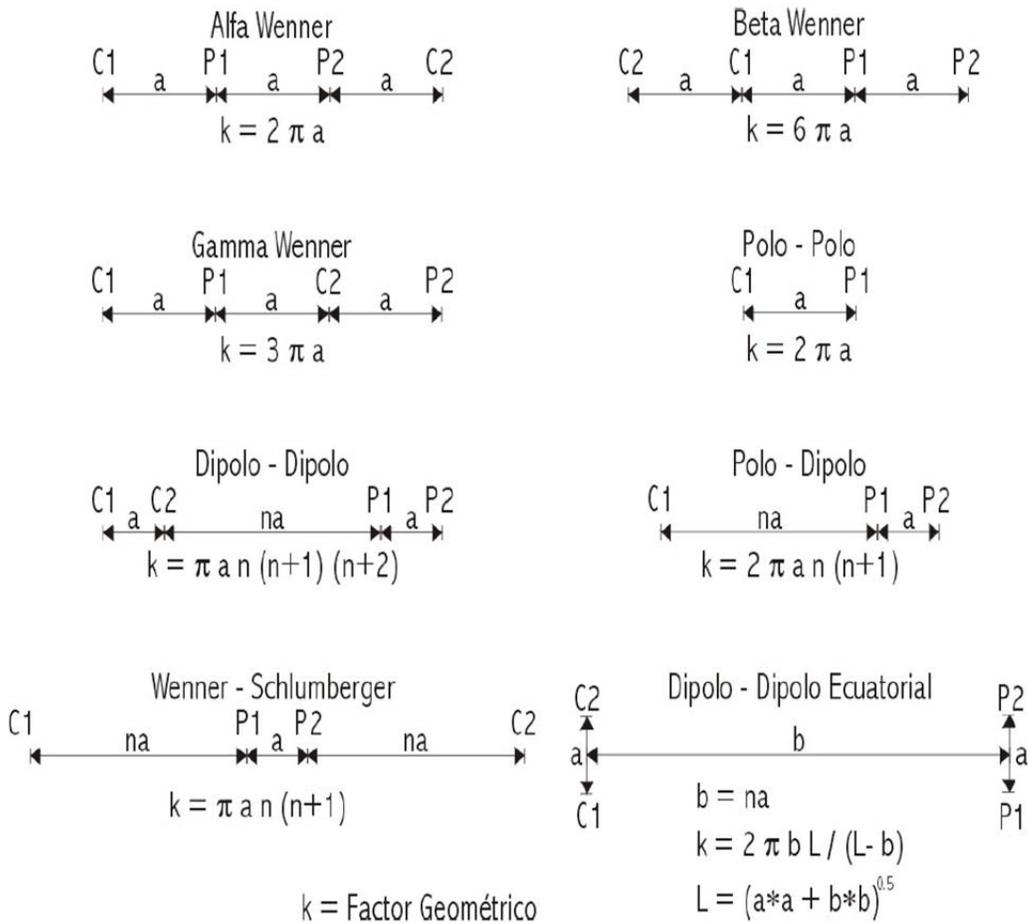


Figura 3.5 Diferentes dispositivos usados en sondeos eléctricos de resistividad 1D, 2D y 3D con sus correspondientes factores geométricos (Loke, 2001).

Estos cuatro electrodos (C1-C2, P1-P2) pueden adoptar cualquier disposición geométrica sobre un plano que representa la superficie del terreno, estas disposiciones se denominan *modalidades*, *dispositivos*, *configuraciones* o *arreglos* (Urbieta, 2001).

3.6.2.2 Resistividad aparente

Los cálculos anteriores se emplean para un subsuelo homogéneo. La utilización de la ecuación 3.14 permite obtener la resistividad verdadera del medio, aunque esto es muy difícil de encontrar en los diferentes medios a explorar. Si se mide el terreno heterogéneo

y se llevan los datos a la fórmula 3.14 se obtendrá una resistividad ficticia ρ_a que dependerá de los diferentes valores de resistividad (propiedad de cada medio) y de las distancias r_1 , r_2 , r_3 y r_4 . Es importante tomar en cuenta que no es el promedio de cada resistividad presente, sino una medición individual que se asocia al punto inmediatamente bajo el centro de la modalidad de electrodos (Urbieta, 2001). Esta resistividad, que se obtiene aplicando la expresión de medios homogéneos, a los datos obtenidos sobre un medio heterogéneo, es la resistividad aparente. Las dimensiones y unidades, ohm-m (Ω -m), son las mismas para ambas (Orellana, 1982).

3.6.3 Relación geológica y resistividad eléctrica

Los sondeos de resistividad eléctrica proporcionan una imagen de la distribución de resistividad del subsuelo. Para convertir esa imagen en una aproximación de la estructura geológica del subsuelo es importante conocer la variación de este parámetro (resistividad aparente) en los diferentes tipos de materiales que lo constituyen.

En la tabla 3.5 se observa que las rocas ígneas y metamórficas típicamente tienen altos valores de resistividad, lo cual depende en gran medida del grado de fracturamiento que tienen, además del porcentaje de agua que rellena las fracturas del terreno.

Las rocas sedimentarias son más porosas y tienen un alto contenido de agua, lo que hace disminuir sus valores de resistividad. Los suelos húmedos y el agua subterránea tienen valores aún más bajos. Para los suelos arcillosos, las resistividades son normalmente menores que las correspondientes al suelo arenoso. Aun con las características de cada tipo de material, se observa que existe superposición en los valores de resistividad debido a que este parámetro depende de factores como la porosidad, el grado de saturación de agua, la concentración de sales disueltas y la temperatura.

La resistividad del agua del terreno varía desde 10 a 100 ohm-m dependiendo de la concentración de sales disueltas. En la tabla 3.7 también se reporta el valor de resistividad de varios contaminantes industriales. Los metales, como el hierro, tienen valores sumamente bajos. La presencia de químicos, como sodio y cloruro de potasio, en el suelo producen una importante reducción en la resistividad del terreno a menos de 1 ohm-m, con concentraciones moderadas. El efecto de electrolitos, como el ácido acético, es comparativamente menor. Algunos de los compuestos de hidrocarburos, como el xileno, tienen resistividades muy altas.

El suelo es una mezcla de rocas, gases, agua y otros materiales orgánicos e inorgánicos. Esta mezcla hace que su resistividad, además de depender de su composición intrínseca, dependa de factores externos como la temperatura, humedad, presión, etc. que pueden provocar que las resistividades de un mismo suelo cambien con el tiempo (Gasula, 1999). Por ejemplo, el contenido de agua del suelo se altera por las lluvias o el riego. Es importante tomar en cuenta estas consideraciones ya que de lo contrario se puede llegar a interpretaciones erróneas de la composición del subsuelo.

Tabla 3.5 Resistividad de algunas rocas, materiales y químicos (Loke, 2001).

Material	Resistividad ($\Omega\text{-m}$)	Conductividad eléctrica (siemens/m)
Rocas ígneas y metamórficas		
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Basalto	$10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Pizarra	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	$2.5 \times 10^8 - 1.7 \times 10^{-3}$
Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Cuarcita	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Rocas sedimentarias		
Arenisca	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
Lutita	$20 - 2 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.02$
Caliza	$50 - 4 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.02$
Aguas y Suelos		
Arcilla	1-100	0.01-1
Aluvión	10-800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
Agua subterránea (no contaminada)	10-100	0.01-0.1
Agua marina	0.2	5
Químicos		
Hierro	9.074×10^{-8}	1.102×10^7
0.01M Cloruro de potasio	0.708	1.413
0.01M Cloruro de sodio	0.843	1.185
0.01M Acido acético	6.13	0.163
Xileno	6.998×10^{16}	1.429×10^{-17}

3.6.4 Métodos geoelectrónicos de corriente continua

A continuación se describen brevemente los métodos geoelectrónicos de corriente continua que actualmente se emplean para investigaciones 1D, 2D y 3D.

3.6.4.1 Sondeo eléctrico vertical (SEV)

Este método tiene sus orígenes en la década de 1920 debido al trabajo de los hermanos Schlumberger. Para aplicar los SEV, el centro del arreglo de electrodos es fijo, pero el

espaciamiento entre ellos aumenta para obtener información sobre secciones más profundas del subsuelo (figura 3.6).

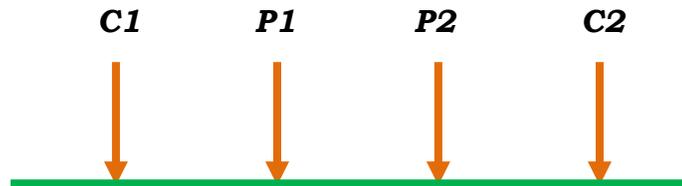


Figura 3.6 Dispositivo eléctrico convencional simétrico.

Para la interpretación de los datos del sondeo 1D, se considera por lo general que el subsuelo se conforma por capas horizontales homogéneas e isotrópicas (figura 3.7). Para estos casos, la resistividad cambia únicamente con la profundidad (p_1 , p_2 , p), pero no cambia en la dirección horizontal. A pesar de esta limitación, el método presenta resultados útiles para situaciones geológicas en las que se puede suponer un modelo unidimensional (para la determinación del nivel freático, por ejemplo). La limitación más severa del método SEV es que en el subsuelo se presentan cambios de resistividad en direcciones horizontales. En muchos estudios que presentan una geología compleja la resistividad puede cambiar rápidamente en cortas distancias, aspecto que este método no detectará con la suficiente precisión (Loke, 2001).

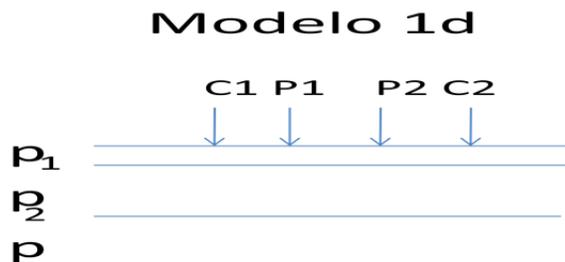


Figura 3.7 Modelo de interpretación en 1D

3.6.4.2 Calicata eléctrica

La Calicata Eléctrica se aplica en el estudio de las variaciones laterales de resistividad en el subsuelo, pero no puede detectar cambios verticales de resistividad (Urbieta, 2001). Es un método de investigación horizontal a profundidad más o menos constante, que es función tanto de la separación entre electrodos como de la distribución de resistividades bajo ellos.

Las aplicaciones de la calicata eléctrica consisten en la detección de fisuras, fallas, contactos verticales en general y objetos o estructuras enterradas. La realización de calicatas en trayectorias paralelas permite trazar la cartografía de resistividades aparentes de un terreno a profundidad constante representada por curvas de isorresistividad. Estos mapas se aplican en arqueología para decidir sobre la estrategia a seguir en las excavaciones (Gasula, 1999).

Las distancias entre los electrodos de corriente y de potencial son constantes, por lo que el arreglo de electrodos se mueve sin cambiar la configuración. Su interpretación es principalmente cualitativa.

No obstante, el objeto de la exploración es tomar la mayor cantidad posible de lecturas y tener buena resolución tanto vertical como horizontal, además de un procesamiento rápido de información. La metodología que logra estas características es la Tomografía Eléctrica en 2D, que se describe a continuación.

3.6.4.3 Tomografía Eléctrica

La Tomografía Eléctrica es, probablemente, el método de prospección geofísica más versátil para realizar análisis del subsuelo relacionados con la contaminación, dado que permite trabajar en profundidades muy variables y abordar múltiples objetivos, como la identificación de plumas de contaminación.

La tomografía eléctrica es un método prospectivo geoelectrico que analiza los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico, diferenciándolos según sus valores de resistividad eléctrica, ya que indican el grado de oposición a conducir la corriente eléctrica a través de ellos.

A partir de la ejecución de la campaña de prospección geoelectrica aplicando tomografía se determinan los valores de resistividad diferentes que permitirán identificar unidades litológicas de distinta naturaleza y los contactos que las delimitan, definiendo las masas contaminantes y acotar los terrenos del subsuelo afectados por la contaminación (Aracil, *et al.*, 2002).

Este método se basa en la implantación de numerosos electrodos a lo largo de perfiles, con una separación determinada en función del grado de resolución que se necesite; como regla general, un estudio de tomografía de resistividad eléctrica requiere la obtención de un número muy elevado de datos, con un corto espaciado entre medidas

para conseguir la necesaria resolución lateral y también que las medidas se realicen involucrando de forma progresiva varios rangos de profundidad (Hernández *et. al.*, 2008).

Cada uno de estos cuadripolos ya programados permite una medida de la resistividad que se atribuye a un determinado punto geométrico del subsuelo, cuya posición y profundidad en el perfil depende de la posición de dicho cuadripolo y de la separación entre los electrodos que lo conforman.

El resultado final de este tipo de estudio es una sección distancia-profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos o ambientales (Stewart, 1996).

3.6.5 Ventajas y desventajas de los diferentes arreglos

Los diferentes tipos de configuraciones de electrodos tienen ventajas y desventajas particulares. La elección de la “mejor” configuración para un perfil de campo depende del tipo de estructura a ser estudiada, la sensibilidad del equipo y el nivel de profundidad de la zona de estudio.

En la práctica, los dispositivos más usados en la tomografía eléctrica para la obtención de imágenes de resistividad eléctrica en 2D son: a) Dipolo-Dipolo, b) Wenner-Schlumberger, c) Wenner, d) Polo-Polo y e) Polo-Dipolo.

Las consideraciones que deben tomarse en cuenta para sus usos son las siguientes:

- ❖ **La profundidad media de investigación.** Los valores de profundidad son determinados al integrar la función de sensibilidad con la profundidad (Edwards, 1977). Hay que destacar que las profundidades son estrictamente válidas para un modelo homogéneo de la tierra. Si hay grandes contrastes de resistividad cerca de la superficie, la profundidad real de investigación podría ser diferente.
- ❖ **La sensibilidad del arreglo a los cambios verticales y horizontales.** Se denomina sensibilidad al mínimo cambio en una dada cantidad (en este caso la resistividad) que la configuración puede percibir, en tanto que la resolución es la capacidad de distinguir separadamente dos rasgos u objetos cercanos, o dicho de otra forma, a la mínima separación que pueden tener dos cuerpos sin que sus identidades individuales se pierdan. La sensibilidad es una función que muestra el grado en que un cambio en

la resistividad de una sección del subsuelo influirá en la medida del potencial. A valores más altos de la función de sensibilidad, mayor es la influencia de la región del subsuelo sobre la medida (McGillivray et al., 1990). Los valores más altos de sensibilidad se encuentran cerca de los electrodos. El rango de sensibilidades es único para un modelo de subsuelo determinado y para todos los dispositivos. Entre más alta es la sensibilidad, más confiable es el modelo de resistividad.

- ❖ **La cobertura horizontal de datos / relación señal ruido.** No todos los tipos de arreglos tienen la misma cobertura, por ejemplo, el dispositivo Wenner-Schlumberger tiene una cobertura horizontal mejor comparada con el Wenner. Por su parte, la relación señal/ruido está estrechamente relacionada con el valor de la constante k de cada dispositivo y para el mismo modelo de subsuelo, esto es, a mayor valor de constante k menor será la señal de potencial medido y viceversa. En otras palabras, la señal es inversamente proporcional al factor geométrico usado para calcular el valor de resistividad aparente.

3.6.6 Configuraciones / Dispositivos

3.6.6.1 Wenner

Los electrodos se disponen de forma equidistante sobre una línea en el orden C1-P1-P2-C2 (figura 3.8), cumpliéndose que la distancia entre electrodos consecutivos sea la misma.

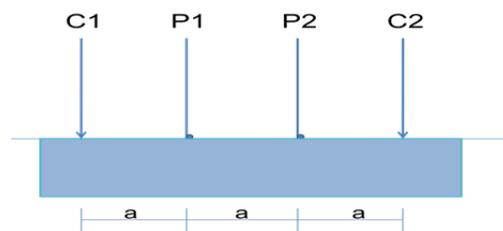


Figura 3.8 Dispositivo Wenner.

El factor geométrico del dispositivo se deduce de la ecuación. (3.15):

$$k = 2\pi a$$

En general, el dispositivo Wenner es eficaz resolviendo cambios verticales de resistividad (estructuras horizontales), pero una de sus desventajas es que es relativamente pobre en

detectar los cambios horizontales (estructuras verticales estrechas) cuando el espaciamiento entre electrodos se aumenta (Loke 2001).

3.6.6.2 Wenner-Schlumberger

Este es una configuración combinada entre los dispositivos Wenner y Schlumberger que consiste en una forma modificada del dispositivo Schlumberger con un espaciamiento constante donde n es la relación entre la distancia de los electrodos C1-P1 (o P2-C2) y el par potencial P1-P2 (figura 3.9).

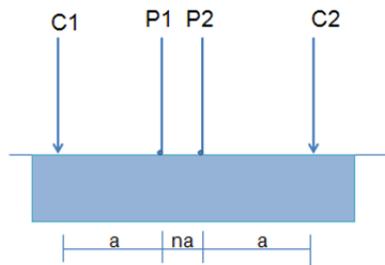


Figura 3.9 Dispositivo Wenner-Schlumberger

El factor geométrico del dispositivo es:

$$k = \pi a n(n + 1)$$

Este arreglo es moderadamente sensible a estructuras horizontales y verticales. En áreas donde se esperan ambos tipos de estructuras geológicas esta configuración puede ser utilizada convenientemente. La profundidad media de investigación es 10% más grande que para el dispositivo Wenner con la misma distancia entre los electrodos (C1 y C2).

3.6.6.3 Polo-Polo

Menos usado que los anteriores el dispositivo Polo-Polo (figura 3.10) posee un único electrodo de corriente y un electrodo de potencial. Los otros dos (C2 y P2) deben ponerse a una distancia mayor de 20 veces la separación máxima de la longitud total del tendido.

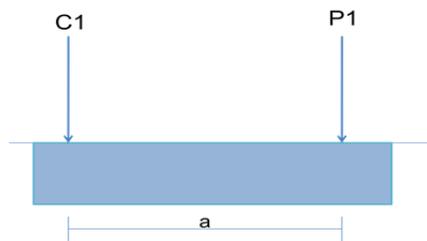


Figura 3.10 Dispositivo Polo-polo.

El factor geométrico del dispositivo se expresa:

$$k = 2\pi a$$

Una de sus desventajas es que, a causa de la gran distancia que existe entre los electrodos P1 y P2, se puede generar una cantidad importante de ruido capaz de degradar severamente la calidad de las medidas, por lo que este conjunto se usa principalmente en perfiles 2D relativamente pequeños de 50 a 80 metros totales. Es comúnmente utilizado en levantamientos arqueológicos o para sondeos tridimensionales.

El Polo-Polo tiene una cobertura horizontal muy amplia y profundidad de investigación mayor que otros arreglos. Sin embargo, tiene una resolución relativamente pobre, reflejada por el espaciamiento comparativamente grande de electrodos.

3.6.6.4 Polo-dipolo

En este caso, el electrodo de corriente C2 se halla una gran distancia de los otros tres (figura 3.11).

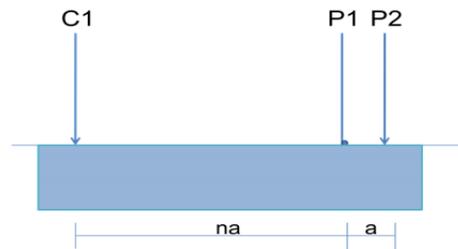


Figura 3.11 Dispositivo Polo-Dipolo

El factor geométrico del dispositivo es, en este caso:

$$k = 2\pi n(n + a)$$

Esta configuración tiene buena cobertura horizontal pero una señal significativamente más alta comparada con el dispositivo Dipolo-dipolo, además no es tan sensible al ruido como el Polo-polo. El dispositivo Polo-dipolo es asimétrico, a diferencia de los otros arreglos; sobre estructuras simétricas las anomalías de resistividad aparente en la sección son asimétricas. Para eliminar este efecto, sería conveniente repetir las mediciones con un arreglo inverso.

3.6.6.5 Dipolo-dipolo

En este dispositivo los electrodos se disponen sobre una línea C1C2-P1P2 formando así un doble dipolo (figura 3.12).

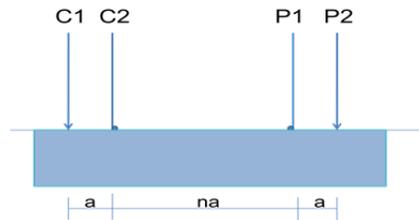


Figura 3.12 Dispositivo Dipolo-dipolo.

El factor geométrico del dispositivo es

$$k = \pi n(n + 1)(n + 2)a$$

El inconveniente en el campo es que el dispositivo dipolar decrece con el cubo de la distancia entre los dipolos de corriente y tensión, lo que significa que para la misma corriente el voltaje medido disminuye más de 200 veces cuando “n” aumenta desde 1 a 6, por lo que necesita detectores más sensibles que los otros dispositivos.

El arreglo Dipolo-dipolo es muy sensible a cambios de resistividad horizontal, pero relativamente insensible a cambios verticales, de modo que es útil en estructuras como muros enterrados, cavidades y plumas de contaminación, pero relativamente pobre en estructuras horizontales como capas sedimentarias.

La profundidad media de investigación de este conjunto depende del factor “n” así como de “a”. Para perfiles 2D este conjunto tiene una cobertura mejor de datos horizontales que el Wenner.

3.6.7 Definición del problema inverso

La teoría de inversión está organizada por un conjunto de técnicas matemáticas para la obtención de información de las propiedades físicas del suelo, basadas en observaciones. Los datos obtenidos en el sitio estudiado se interpretarán basados en la teoría de inversión, que reproducirá un modelo de acuerdo con las condiciones del sitio contaminado mediante sus parámetros de resistividad eléctrica.

La *teoría de inversión* se utiliza en contraste con el método directo, que consiste en que, dados los valores de un conjunto de parámetros para un modelo de la Tierra hipotético, se

reproducen los datos sintéticos (datos teóricos). Por el contrario, para el método inverso se utilizan los datos medidos en campo y una relación teórica para derivar los valores del conjunto de parámetros que explican o reproducen las observaciones de campo (Menke, 1989).

Problema directo:

Parámetros del modelo- modelo- predicción de datos

Problema inverso:

Datos-modelo- parámetros del modelo estimados

3.6.7.1 Teoría de inversión

En el tema siguiente se ofrece una pequeña introducción acerca de la teoría de inversión; la información está tomada de la tesis de Urbietta (2001) y el libro de Menke (1989).

Para describir matemáticamente los procesos geofísicos se puede utilizar una integral de Fredholm de segundo orden, descrita como:

$$d_i = \int_0^z K_i(z)p(z)dz$$

donde:

d_i es la respuesta del sistema medida en la i -ésima excitación artificial (en este caso inyección de corriente eléctrica).

$p(z)$ es la función relacionada con algún aspecto de la estructura o propiedad física de la tierra (resistividad).

K_i son las funciones kernel, que describen la relación entre los datos y la función $p(z)$ (modelo de la Tierra).

Entonces, el problema inverso se puede enunciar como: dado un conjunto de datos experimentales (e), determine aquellos parámetros de la Tierra (m) que explican los datos observados.

El proceso de seleccionar variables que representan datos y parámetros del modelo se conoce como *parametrización*. En este proceso es necesario expresar el problema en su forma lineal $e = F(m)$, donde F es una funcional que relaciona parámetros con los datos observados y que es computacionalmente manejable. Para un sistema discreto, se tiene que:

$$e_i = \sum_{j=1}^m F_{ij} m_j \quad i=1,2,3,\dots,m$$

La Tierra es parametrizada, en este caso, en un número de capas discretas, cada una con su propia resistividad eléctrica (ρ_i).

Lo anterior se aplica en el caso que el problema sea directo; para la determinación de las resistividades verdaderas el problema es no lineal, por lo que se plantea como sigue:

Sea $e = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T$ los datos observados (resistividades aparentes) y sea $m = (m_1, m_2, \dots, m_m)^T$ los parámetros del modelo (resistividades de los bloques), el problema directo y el problema inverso se definen como el mapeo de un “espacio de modelo (m)” y un “espacio de datos (e)”. Para lo que a este trabajo atañe, se tendrá un espacio definido sobre un cierto intervalo y un espacio de datos que es un vector n -dimensional, por tanto, el problema directo se puede describir como:

$$e_j = F_j(m) \quad j = 1,2,3, \dots, N$$

$F_j(m)$ es una función que relaciona a un modelo dado $m(x)$ con el j -ésimo dato e_j .

Si el problema es lineal, la ecuación anterior se describe como:

$$e_j = \int k_j(x) m(x) d^3x \quad j = 1,2,3, \dots, N$$

$k_j(x)$ es el kernel de la función asociada con el j -ésimo dato.

Para el problema inverso se quiere determinar un modelo estimado $m_{est}(x)$ tal que satisfaga:

$$e_j^{obs} = F_j(m_{est}) \quad j = 1,2,3, \dots, N$$

e_j^{obs} es la j -ésima observación.

Una de las opciones para la solución de problemas no lineales encontrados en geofísica es comenzar con una solución estimada m_{est} y resolver el problema directo para obtener estos datos estimados. Entonces, con una perturbación $\delta m(x)$ que sumada a m_{est} nos devuelva un nuevo modelo que reproduzca los datos observados, la ecuación anterior se expresa como una serie de Taylor:

$$e_j^{obs} = F_j(m_{est}) + F_j^1(m_{est})\delta m + \frac{1}{2!}F_j^2(m_{est})\delta m^2 + \dots$$

donde

$F_j^n(m)$ es la llamada derivada de Fréchet de orden n de $F_j(m)$. La derivada de primer orden simplemente es la derivada de Fréchet.

Si se define la diferencia para la j-ésima observación como $\delta e_j = e_j^{obs} - F_j(m_{est})$, entonces se tiene que:

$$\delta e_j = F_j^1(m_{est})\delta m + O(\|\delta m\|^2)$$

Considerando los términos de orden mayor como despreciables y teniendo en cuenta la ecuación x, la solución es:

$$\delta e_j \approx \int K_j(x, m_{est})\delta m(x)d^3x$$

donde $K_j(x, m)$ es el kernel de Fréchet asociado a la j-ésima observación. El kernel establece la relación entre una perturbación pequeña en el modelo y los correspondientes cambios en los datos. Como la ecuación x es lineal, $\delta m(x)$ se puede encontrar empleando técnicas numéricas comunes cuando el kernel de Fréchet ha sido determinado.

3.6.7.2 Modelo de inversión 2D

En este modelo de inversión 2D, donde se basa el software RES2DINV consiste de un número de bloques rectangulares en 2D (figura 3.13). Estos bloques son igual al número de datos en la pseudosección de resistividades aparentes y son arreglados de igual manera. Los centros en el interior de los bloques se colocan en la profundidad de investigación media (Edward, 1977) para los diferentes espaciamentos usados en los electrodos. La profundidad media de investigación es aproximadamente 0.5 veces el espaciamento de los electrodos para el arreglo Wenner. El método convencional de

mínimos cuadrados de Gauss-Newton se utiliza para determinar la resistividad de los bloques rectangulares (parámetros del modelo) que minimizarán las diferencias entre los valores de resistividad aparente calculados y medidos.

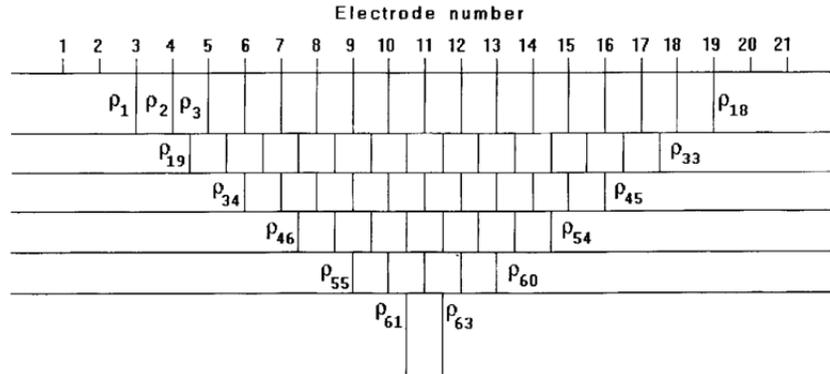


Figura 3.13 Arreglo de bloques rectangulares utilizados en el modelo 2D

El RES2DINV utiliza un método iterativo que a partir de un modelo inicial trata de encontrar un modelo mejorado cuyos valores de resistividad aparente sean más cercanos a los valores medidos. Un método conocido de inversión iterativa es el método de suavizado y constreñido (deGroot-Hedlin *et al.*, 1990), que tiene la forma matemática:

$$(J_i^T J_i + \lambda_i C^T C) P_i = J_i^T g_i$$

donde i es el número de iteración, J_i es la matriz jacobiana de derivadas parciales, g_i es el vector de discrepancia que contiene las diferencias entre logaritmos de los valores de resistividad aparente medidos y calculados, λ_i es el factor de amortiguamiento y P_i es el vector de la perturbación del modelo de parámetros para la i -ésima iteración. Para 2D C es un filtro utilizado para suavizar las perturbaciones del modelo de parámetros para cierto valor constante (Looke y Barker, 1996).

4. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA

4.1 UBICACIÓN DE LA ZONA

El estado de Puebla se localiza en la porción centro-este de la República mexicana, colinda al norte y al este con el estado de Veracruz, al sur con los estados de Oaxaca y Guerrero y al oeste con los estados de Hidalgo, Tlaxcala, México y Morelos. Tiene una extensión territorial de 34, 290 Km² y ocupa el vigésimo primer lugar en extensión dentro del territorio nacional, que corresponde a 1.8% de la superficie total del país (INEGI, 2005).

El área de estudio se encuentra ubicada en la parte central del estado de Puebla, en la ciudad del mismo nombre que se comunica a través de varias carreteras asfaltadas, siendo la más importante la carretera federal México-Puebla (figura 4.1). El área que ocupa la unidad se encuentra limitada por las coordenadas geográficas siguientes: al norte 19° 02'; al sur 19° 00' de latitud norte; al este 98° 14' y al oeste 98° 16' de longitud oeste.

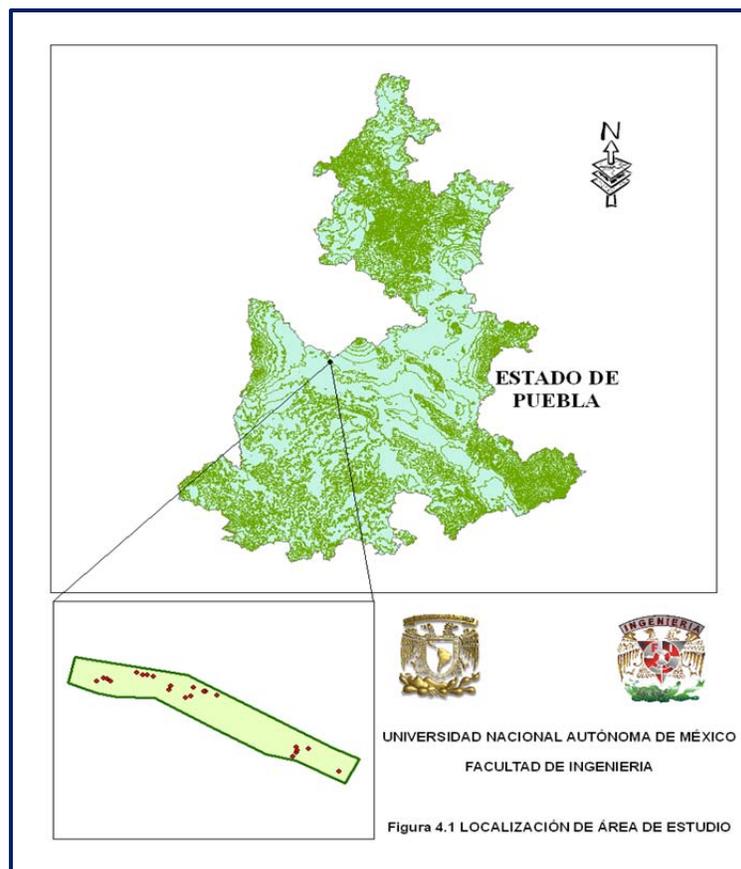


Figura 4.1 Ubicación del estado de Puebla y la zona de estudio.

4.2 GEOLOGÍA REGIONAL

El marco geológico-regional del área de estudio fue obtenido de las cartas geológicas minero Acatlán de Osorio E14-B83, Chiautla E14-B72 y Zacatlán E14-B14 del Servicio Geológico Mexicano (SGM). El estado de Puebla está representado por rocas sedimentarias e ígneas, principalmente. Su basamento se encuentra conformado por una secuencia paleozoica indiferenciada altamente plegada, fracturada y foliada.

En el estado de Puebla afloran rocas del Precámbrico al Reciente. Las rocas más antiguas del Precámbrico pertenecen al Complejo Oaxaqueño, constituido por ortogneises de biotita y granulitas afectadas por intrusiones graníticas. Sobre estas rocas precámbricas descansa una secuencia metamórfica del Paleozoico inferior conocida como Complejo Acatlán, seguida en discordancia por una secuencia sedimentaria de origen deltaico del Paleozoico superior (Formación Matzitzi), sobre la que descansa un paquete sedimentario representando a varios elementos paleogeográficos como las cuencas mesozoicas de Tlaxiaco, Zongolica, Zapotitlán, Tampico, Misantla, la Plataforma Guerrero-Morelos, la Cobertura volcánica terciaria de la Franja Volcánica Transmexicana y sedimentos terciarios de origen continental. En la zona del Macizo de Teziutlán afloran rocas intrusivas del Pérmico que constan principalmente de granodiorita y metagranito.

En la parte sureste del estado existen pequeños cuerpos de rocas metamórficas, pertenecientes a la parte más septentrional del terreno metamórfico dentro del Complejo Oaxaqueño. Son rocas metamórficas de alto grado, de las facies de granulita y anfibolita, constituidas por gneis, charnokita, anortosita y pegmatita. Afloran en el municipio de Caltepec en forma de ventanas geológicas de poca extensión, con mayor presencia hacia el estado de Oaxaca. Junto con el Complejo Acatlán, constituyen el basamento sobre el cual se desarrollaron todas las secuencias litológicas posteriores.

4.3 GEOLOGÍA LOCAL

La región consiste en un basamento de calizas marinas cretácicas, cubierto parcialmente por gruesos depósitos volcánicos basálticos terciarios. Las calizas son representadas por las formaciones estratigráficamente llamadas Cuautla y Margas Tilantongo, que afloran en plegamientos suaves NW-SE como extensas ventanas en la porción norte y predominantemente en la porción sur.

La caliza Cuautla tiene un espesor mayor de 50 metros. La formación superyacente Tilantongo tiene unos 30 metros de espesor promedio.

La litología característica de la zona de estudio, de acuerdo al análisis granulométrico realizado en las muestras de suelo extraídas, muestran que el suelo predominante es arena de fina a gruesa. En la zona de estudio se llevaron a cabo trabajos de nivelación del terreno por parte de la empresa, de manera que, al menos superficialmente, la litología que se encontró fue material de relleno.

4.4 CLIMATOLOGÍA Y METEOROLOGÍA

El clima en la ciudad de Puebla se clasifica como tipo templado subhúmedo, con lluvias en verano (CONAGUA, 2009). También se identifican los climas cálidos presentes en la zona norte del estado, los semicálidos hacia el noreste y suroeste principalmente; entre los templados y los cálidos hacia las zonas norte y centro-suroeste; en el sursuroeste encontramos los climas semisecos; los secos, al sur y sureste de Tehuacán; los semifríos (que corresponden a las áreas más extensas) encuentran hacia las laderas de la Sierra Nevada, el Pico de Orizaba y la Malinche. Los climas fríos ocupan las cumbres de la sierra y volcanes antes mencionados (INEGI,2004). La zona de estudio se localiza dentro de los climas templados del valle de Puebla, sólo en la cumbre de la Malinche presenta un clima frío.

4.4.1 Temperatura media

La estación Puebla es la más representativa de las condiciones de la región estudiada, manifiesta una temperatura promedio de 16°C, con una temperatura promedio del año más frío (1976) de 13 °C y 16 °C del año más caluroso (1948).

4.4.2 Precipitación pluvial

De acuerdo con la misma estación meteorológica, reporta una precipitación media anual de 825 mm, siendo la máxima de 1 170 y una mínima de 538 mm (CONAGUA, 2009).

4.4.3 Otros fenómenos meteorológicos

Algunos fenómenos meteorológicos que se producen con mayor frecuencia en la entidad, además de la lluvia, son las heladas, las cuales se presentan en todo el estado. La primera helada por lo general se produce en octubre, la última en marzo y la máxima incidencia en diciembre. Las granizadas ocurren con mayor frecuencia en el centro-sur del estado, este fenómeno se produce principalmente en los meses de marzo, abril, mayo y junio. En las zonas de elevada altitud, Ciudad Serdán, Tlachichuca y la ciudad de Puebla, donde el clima es templado subhúmedo, las granizadas se presentan con una frecuencia mayor de cinco días al año; las nevadas se producen en terrenos cuya altitud es mayor de 4 000 m, como en el caso de los volcanes Pico de Orizaba, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, La Malinche y cerro La Negra. En la Sierra Nevada, así como en el Pico de Orizaba ocurren las nevadas en todos los meses del año; mientras que en La Malinche se presentan en los meses de diciembre y enero (INEGI, 2004).

4.5 HIDROLOGÍA

La totalidad del territorio de Puebla se encuentra comprendida dentro de cuatro grandes regiones hidrológicas de las 37 en que está dividido el territorio mexicano. Estas regiones son, en orden de extensión dentro de la entidad, Río Balsas, Ríos Tuxpan-Nautla, Río Papaloapan y Río Pánuco. Las tres primeras abarcan casi la totalidad del estado, mientras que la última ocupa tan solo unas pocas decenas de km². Solamente la región del Balsas pertenece a la vertiente del Pacífico; las restantes descargan sus captaciones hacia el Golfo de México (figura 4.2).

La entidad cuenta con 11 presas almacenadoras, ocho derivadoras (canal construido transversal a la pendiente, con un bordo en la parte baja con la finalidad de generar una salida controlada a los excesos de escurrimiento) y 40 bordos, que suman en conjunto una capacidad total de almacenamiento de 643 Mm³ (INEGI, 2004).

La región hidrológica que comprende la zona de estudio es la del Río Balsas. Esta región es una de las más importantes del país, ya que ocupa las zonas central y suroccidental del estado. Se extiende desde Michoacán y en una pequeña porción del estado de Veracruz, donde está limitada por las elevaciones que circundan la cuenca Oriental-Perote, entre las que destacan la caldera de los Humeros, el volcán Pico de Orizaba, el Cofre de Perote y el volcán Atlítzin o Sierra Negra. Hacia el sur de estas montañas, el

parteaguas oriental de la región, se prolonga a lo largo de las serranías que constituyen el borde occidental de la cañada poblana-oaxaqueña. Al norte y al sur, la región se encuentra limitada por los parteaguas del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur (INEGI, 2004).

A su vez, esta zona está dividida en 10 cuencas, de las cuales, se encuentran parcialmente incluidas en territorio poblano: Río Atoyac, Río Balsas-Mezcala, Río Tlapaneco y Río Grande de Amacuzac. En conjunto suman aproximadamente 59.14% de la superficie estatal.



Figura 4.2 Regiones hidrológicas del Estado de Puebla (INEGI, 2004).

El municipio de Puebla (zona de estudio) pertenece a la cuenca del río Atoyac, una de las más importantes del estado, ya que recorre el poniente del municipio de norte a sur y sirve en algunos tramos como límite con los municipios de Ocoyucan, San Andrés Cholula y Cuautlancingo; a la postre cambia de curso hacia la depresión de Valsequillo donde se forma la presa Manuel Ávila Camacho o de Valsequillo, con 405 millones de metros cúbicos de capacidad, que hace posible el establecimiento del distrito de riego Valsequillo, con 21,864 hectáreas de tierra beneficiadas. De las laderas de la Malinche descienden numerosas corrientes intermitentes que provocan inundaciones en la zona norte de la ciudad de Puebla en época de lluvias.

4.6 GEOHIDROLOGÍA

En el estado de Puebla se tienen nueve acuíferos (figura 4.3), tres son compartidos con el estado de Veracruz. Los acuíferos de Valle de Temachalco, Libres-Oriental y Atlixco-Izucar de Matamoros se encuentran sobreexplotados (CONAGUA, 2009).

La misma fuente reporta para 1997, un total de 615 aprovechamientos, 222 para uso agrícola, 230 público urbano, 83 doméstico-abrevadero y 80 industriales, que extraen 241.1 Mm³ anuales con el siguiente desglose: 94.23 uso agrícola, 96.15 público-urbano, 12.08 domestico-abrevadero y 44.64 industrial. Sin embargo, hidrometrias recientes, describen un volumen de extracción mayor de 307 Mm³/año (CONAGUA, 2009).



Figura 4.3. Acuíferos del estado de Puebla(CONAGUA, 2009)

El acuífero correspondiente a la ciudad de Puebla es el 2104 Valle de Puebla. El acuífero superior es el que abastece principalmente a la ciudad de Puebla. Este acuífero funciona como libre y está formado por la secuencia aluvial y volcánica del Cuaternario, que recibe

directamente una recarga subterránea proveniente de las partes altas de la cuenca, donde tiene lugar una importante infiltración del agua de lluvia, principalmente de la Formación Tarango, que ocupa las colinas de La Malinche y de la Sierra Nevada, originando un flujo subterráneo de la primera hacia el NE-SW, mientras que de la segunda es con dirección NW-SE. Su espesor varía de unos cuantos metros en sus bordes a más de 200 metros en su porción central, que corresponde con el área circundante a la ciudad de Puebla (CONAGUA 2009). Su agua es de buena calidad y en el área de la ciudad de Puebla se han observado profundidades de los niveles freáticos de aproximadamente 120 metros, debido a la extracción excesiva de los acuíferos.

De la interpretación de 18 pruebas de bombeo de corta duración realizadas por CONAGUA en 1997 (CONAGUA, 2009), se tiene que las transmisividades varían en un rango de 55.3 a 2410.5 m²/d, de acuerdo con el criterio de Theis (1935), y entre 7776 y 14083 m²/d de acuerdo con el criterio de Hantush (1960).

La disponibilidad de aguas subterráneas, conforme a la metodología indicada en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, que establece la metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, se obtiene de restar el volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA. Este resultado es 38, 588,410 m³/año para el acuífero del Valle de Puebla (CONAGUA, 2009).

4.7 GEOMORFOLOGÍA

Por su orientación, conformación, ubicación y extensión el municipio de Puebla presenta una topografía variada, desde áreas planas hasta formaciones montañosas y depresiones marcadas, pasando por cerros aislados, pequeñas sierras y declives abruptos. En su territorio confluyen varias formaciones morfológicas importantes (figura 4.4).



Figura 4.4 Geomorfología del estado de Puebla (INEGI, 2006).

El volcán de La Malinche o Matlalcuéyatl es un volcán apagado y denudado; su cima tiene forma de cresta dentada con varios picos. Tiene una altitud de 4,461 msnm y sus faldas se extienden sobre un gran altiplano a 134 kilómetros a su alrededor, siendo notable por las rocas descubiertas de su cima. Está formado por desprendimientos de la Sierra Nevada (INEGI, 2006).

El valle de Puebla es el sector principal de la altiplanicie poblana; limita al norte con una serie de elevaciones que se relacionan con el Iztaccíhuatl, al sur con la depresión de Valsequillo, al este con el valle de Tepeaca y al occidente con la Sierra Nevada. La formación del valle de Puebla data del plioceno; aparecen en él arenas volcánicas cementadas, especialmente al pie del cerro donde se encuentran los fuertes de Loreto y Guadalupe, las cuales están bien estratificadas (INEGI, 2006).

La parte oriental del valle de Puebla cubre el noroeste y centro del municipio de Puebla, en donde se localiza la capital del estado; presenta una altura promedio de 2,140 metros sobre el nivel del mar y se caracteriza por su topografía plana, con un ligero declive en dirección noreste sur, con pendientes menores de 2°. Esta uniformidad sólo es interrumpida por cerros de poca altura: Loreto y Guadalupe, al noreste de la ciudad; el

cerro de San Juan al oeste y una loma ubicada al noreste llamada San Jerónimo Caleras (INEGI, 2006).

4.8 EDAFOLOGÍA

En el estado se presentan 16 diferentes tipos de suelo, sus nombres junto con el porcentaje que ocupan en la superficie estatal se muestran en la Tabla 4.1. El mayor porcentaje de la superficie la ocupan el litosol y el regosol.

Tabla 4.1 Tipos de suelo en el estado de Puebla (INEGI, 2004).

Tipo de suelo	% de la superficie estatal	Tipo de suelo	% de la superficie estatal
Acrisol	0.84	Luvisol	6.11
Cambisol	7.12	Nitosol	0.46
Chernozem	0.14	Regosol	19.31
Rendzina	6.84	Andosol	10.4
Gleysol	0.09	Vertisol	6.74
Feozem	8.15	Xerosol	1.29
Litosol	29.65	Solonchak	0.83
Fluvisol	1.7	Otros	0.33

4.8.1 Uso del suelo

Son dos los principales usos potenciales de la tierra en Puebla: agrícola y pecuario. En la Tabla 4.2 se muestra la distribución de los usos de acuerdo al porcentaje correspondiente con respecto a la superficie del estado.

Tabla 4.2 Uso potencial de la tierra en el estado de Puebla (INEGI, 2004).

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	PORCENTAJE ESTATAL (%)
Uso agrícola	Mecanizada continua	26.57
	De tracción animal continua	5.15
	De tracción animal estacional	5.37
	Manual continua	9.2
	Manual estacional	3.02
	No aptas para la agricultura	50.69
CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	PORCENTAJE ESTATAL (%)
Uso pecuario	Para el desarrollo de praderas cultivadas	24.32
	Para el aprovechamiento de la vegetación natural diferente del pastizal	26.32
	Para el aprovechamiento de la vegetación natural únicamente por el ganado caprino	48.53
	No aptas para uso pecuario	0.83

5. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología que se siguió para la obtención de los datos analizados, consistente en el muestreo de suelo y la tomografía de resistividad eléctrica.

5.1 MUESTREO DEL SUELO CONTAMINADO

El plan de muestreo se realizó de acuerdo con lo establecido en la NOM-138-SEMARNAT-SS/2003, definiendo las actividades a realizar de cada integrante.

Los puntos muestreados se definieron en campo de acuerdo con la inspección e información previas sobre el lugar para cubrir el área contaminada total. Las muestras obtenidas fueron simples de acuerdo con lo que señala la normatividad, además se obtuvo una muestra duplicada por cada 10, sin utilizar lodos de perforación. Para tener un adecuado control en el muestreo, el personal encargado llevó una bitácora, hojas de campo para cada muestra obtenida y las cadenas de custodia, señalando los análisis químicos específicos para cada muestra.

5.1.1 Ubicación de los puntos de muestreo

Los puntos muestreados en el sitio contaminado fueron 23 en total, a distancias variables (figura 5.1), entre la superficie y 3 m de profundidad en promedio, excepto el punto PUE18 que se muestreó a 5.20 m de profundidad debido a que se observó fuerte contaminación desde la superficie hasta ese punto.



Figura 5.1 Ubicación de los puntos de muestreo

Estas profundidades se definen en campo por apreciación visual y organoléptica. En total se realizaron 42 muestras, incluidos 4 duplicados.

En la tabla 5.1 se muestra el número de puntos muestreados, la profundidad a la que se llegó y el análisis realizado.

Tabla 5.1 Puntos muestreados, profundidad y análisis.

NÚM	IDENTIF.	PROF (m)	OBSERVACIONES	ANÁLISIS
1	PUE1A	1.2	Contaminación visible Fuerte olor a hidrocarburo	HFM
2	PUE1B	4.7		HFM, HAP
3	PUE2A	3.1	Poco olor a hidrocarburo	HFM
4	PUE3A	2.6	Sin olor	HFM, HAP
5	PUE4A	1.2	Sin olor	HFM
6	PUE4B	2.6		HFM
7	PUE5A	1.1	Sin olor	HFM, HAP
8	PUE5B	2.2		HFM
9	PUE6A	0.9	Olor a hidrocarburo	HFM, HAP
10	PUE6B	2		HFM
11	PUE6BD*	2.1		HFM
12	PUE7A	0.9	Sin olor	HFM
13	PUE8A	1.1	Sin olor	HFM
14	PUE10A	0.6	Sin olor	HFM, HAP
15	PUE11A	0.6	Sin olor	HFM, HAP
16	PUE12A	0.6	Sin olor	HFM
17*	PUE13A	1.2	Sin olor	HFM, HAP
18	PUE13AD*	1.4		HFM
19	PUE13B	2.4		HFM

20	PUE14A	1.1	Poco olor a hidrocarburo	HFM, HAP
21	PUE14B	2.2		HFM
22	PUE15A	1.3	Olor a hidrocarburo	HFM, HAP
23	PUE15B	1.8		HFM, HAP
24	PUE15C	2.5		HFM, HAP
25*	PUE16A	1.2	Sin olor	HFM
26	PUE17A	1.2	Sin olor	HFM
27	PUE18A	1.3	Fuerte olor a hidrocarburo	HFM, HAP
28	PUE18B	2.2		HFM, HAP
29	PUE18BD*	2.3		HFM
30*	PUE18C	3.8		HFM, HAP
31	PUE18D	4.9		HFM, HAP
32	PUE18E	5.2		HFM, HAP
33	PUE19A	1.1	Poco olor a hidrocarburo	HFM, HAP
34	PUE19B	2.4	Poco olor a hidrocarburo	HFM
36	PUE20A	1.6	Fuerte olor a hidrocarburo	HFM, HAP
36	PUE20B	3.6		HFM, HAP
37	PUE20BD*	3.8		HFM
38	PUE21A	1.4	Sin olor	HFM
39	PUE22A	1.4	Sin olor	HFM
40	PUE22B	2.5		HFM, HAP
41	PUE23A	1.4	Sin olor	HFM
42	PUE23B	2.5		HFM

HFM (Hidrocarburos Fracción Media)
HAP (Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares)
* Duplicado

5.1.2 Descripción de los trabajos de perforación y muestreo de suelos

Las muestras fueron recolectadas con la ayuda de un equipo neumático Long Year modelo 34 del año 2006 (figura 5.2), con motor diesel marca Perkins que incluye un sistema para evitar la formación de chispa durante el encendido. El motor de velocidad variable de perforación consta de los accesorios siguientes:

- ❖ Control mecánico para encendido y cabezal 3 7/8. Este sistema de control permite el arranque, movimiento y fijación del sistema de perforación. Cuenta con cuatro velocidades, con movimiento vertical y horizontal.
- ❖ El martinete o pistón consta de dos secciones de tubos mecánicos de 10 cm de diámetro y 1.10 m de longitud, tiene rosca en uno de sus extremos para acoplar al émbolo que golpea al tubo muestreador a través de una espiga.
- ❖ La espiga es una pieza mecánica construida con una barra de 5 cm de diámetro y 20 cm de longitud con rosca en los dos extremos; está cubierta con Nylamide para evitar la producción de chispas al golpear al tubo muestreador.
- ❖ El tubo muestreador consta de dos secciones de tubo mecánico de 60 cm de longitud y 3.8 cm de diámetro con rosca en cada extremo. En su interior se coloca un tubo de aluminio de 3.17 cm de diámetro, que penetra la muestra de suelo. El tubo partido permite extraer la muestra sin que existan pérdidas por volatilización de hidrocarburos. La zapata del tubo mecánico de 7.6 cm de longitud y 5 cm de diámetro; al extremo inferior cuenta con rosca para acoplarse al tubo partido.

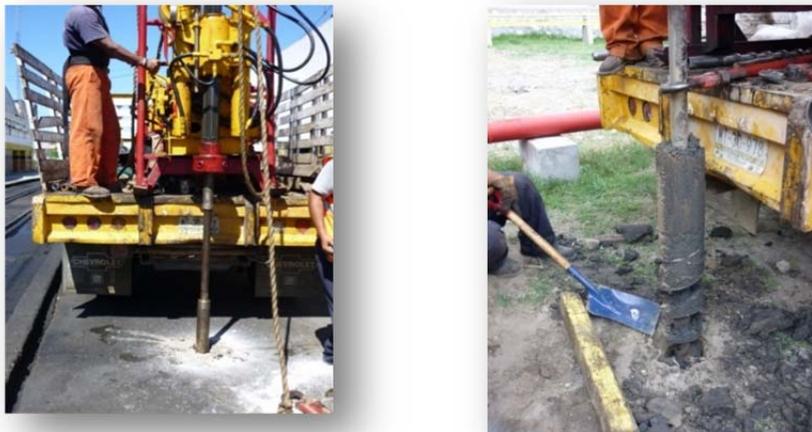


Figura 5.2 Toma de muestra con el equipo Long Year

Se analizaron hidrocarburos fracción media (HFM) e hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP) con los métodos EPA8015B y EPA 8310, respectivamente. Para los análisis de HFM y HAP se extrajo el suelo del tubo partido, se tamizó en malla del número 10 y se colocó en un frasco de vidrio de 300 ml de capacidad. En el caso de que el suelo presentara humedad alta o saturación de hidrocarburos o cuando el suelo fue muy plástico, no fue posible tamizar y en esos casos las muestras se obtuvieron en el tubo de aluminio (*liner*) aunque el análisis a realizar fuera HFM. El tubo de aluminio se extrajo del tubo partido y se cortó en ambos extremos quedando de una longitud aproximada de 25 cm, inmediatamente se colocó teflón y sobre éste cinta canela.

Más tarde se colocó una etiqueta en la superficie del tubo de aluminio o del frasco de vidrio con la identificación de la muestra, profundidad, fecha, hora, responsable del muestreo y análisis a realizar. Finalmente, los *liners* y los frascos de vidrio se colocaron dentro de una bolsa de plástico y ésta dentro de una hielera donde permanecieron a baja temperatura (4 grados centígrados) hasta su llegada al laboratorio encargado de realizar los análisis. Los tubos partidos, las zapatas y las helicoidales se lavaron con agua y detergente marca Extran, que es libre de fosfatos antes de la extracción de la muestra. Después del muestreo las perforaciones se cubrieron con suelo limpio del sitio sin dejar identificaciones de campo.

5.1.3 Descripción de los análisis químicos realizados

De acuerdo con las observaciones en campo para este estudio, el diesel es el combustible más utilizado en las actividades desarrolladas en el sitio. La NOM-138-SEMARNAT señala que cuando el sitio está contaminado con diesel deben analizarse los hidrocarburos fracción media (HFM) e hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP).

Los análisis se realizaron en los Laboratorios ABC. Química, Investigación y Análisis S.A. de C.V., con la aprobación de la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) para cada análisis.

Para la caracterización del suelo en estudio se tomaron 5 kg de suelo para determinar los parámetros físicos, químicos y biológicos (Tabla 5.2), pruebas que fueron realizadas en el laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM. La muestra de suelo para los análisis biológicos se obtuvo en un frasco de 100 ml y se mantuvo a 4°C.

Tabla 5.2 Método de análisis para los parámetros de caracterización

PARÁMETRO	MÉTODO
pH	AS-02 (NOM-021-RECNAT-2000)
Contenido de agua	AS-05 (NOM-021-RECNAT-2000)
Análisis granulométrico	Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) (ASTM, D 422)
Conteo de bacterias heterótrofas	Conteo en placa (NOM-092-SSA-1994)

5.2 PERFILES DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA EN EL SITIO

5.2.1 Instrumentación y procedimiento de medición

El equipo que se empleó para la adquisición de los datos de campo fue el SYSCAL Pro (figura 5.3). Esta unidad de medición de resistividad está diseñada para toma de datos masiva. El equipo contiene un transmisor, receptor y alimentación por lo que es una herramienta muy práctica en campo. Las características técnicas principales se mencionan a continuación:

- ❖ Consta de 10 dipolos de recepción que son capaces de realizar varias mediciones en el campo.
- ❖ Tiene una resolución de 1 μV sobre el voltaje primario, permitiendo obtener mediciones muy precisas.
- ❖ La energía de la unidad es suministrada por una batería recargable (12 V-7.2 A).



Figura 5.3 Fotografía del equipo SYSICAL Pro.

En la zona de estudio se realizaron seis perfiles, según la información proporcionada del sitio, para obtener los datos de la tomografía eléctrica. Se colocaron 41 electrodos en cada línea con un espaciamiento entre ellos de 0.5 m y una separación entre cada línea de 4 m (figura 5.4), la orientación de los perfiles fue E-W. El arreglo utilizado para este estudio fue Dipolo-Dipolo debido a la utilidad de sus características para este estudio en particular.

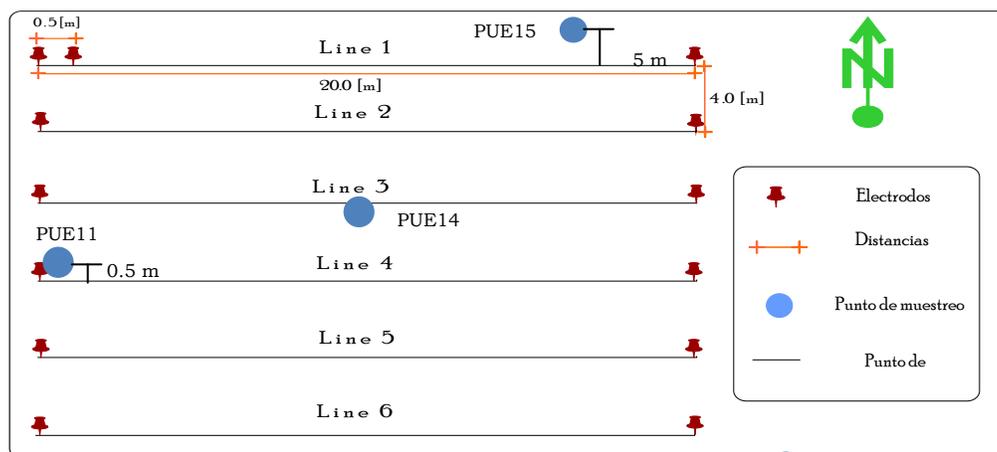


Figura 5.4 Disposición de los perfiles y geometría empleada.

La metodología consistió en clavar 41 barras de cobre sobre el perfil orientado E-W, con un espaciamiento de 0.5 m entre los electrodos (figura 5.5). Se procedió a conectar el equipo, quedando en medio de la línea tendida y conectando correctamente los que actuarán como electrodos de corriente y potencial, así como verificar que cada uno quedó bien conectado en el cable que va hacia el equipo.



Figura 5.5 Perfil 5 en la zona de estudio

Para obtener las mediciones del suelo se debe programar el equipo especificando el tipo de arreglo y parámetros como el espaciamiento entre electrodos, las unidades, el número de electrodos, el nivel de investigación al que se pretende llegar, el primer electrodo donde empieza la medición y su coordenada en X y Y. Posteriormente se realiza una prueba de contacto entre los electrodos y el suelo para saber que no hay una fuga de corriente que provoque “malas” lecturas. Con todo esto completo, es posible empezar las mediciones de resistividad del subsuelo y esperar a que termine para guardar los datos y medir las siguientes líneas, cumpliendo la misma metodología.

Análogamente se realizaron dos líneas adicionales en los puntos más contaminados (PUE1A y PUE18A) (figuras 5.6 y 5.7). El primero fue en línea paralela a la contaminación visible y el segundo, de acuerdo a los resultados del método directo (figuras 5.8).

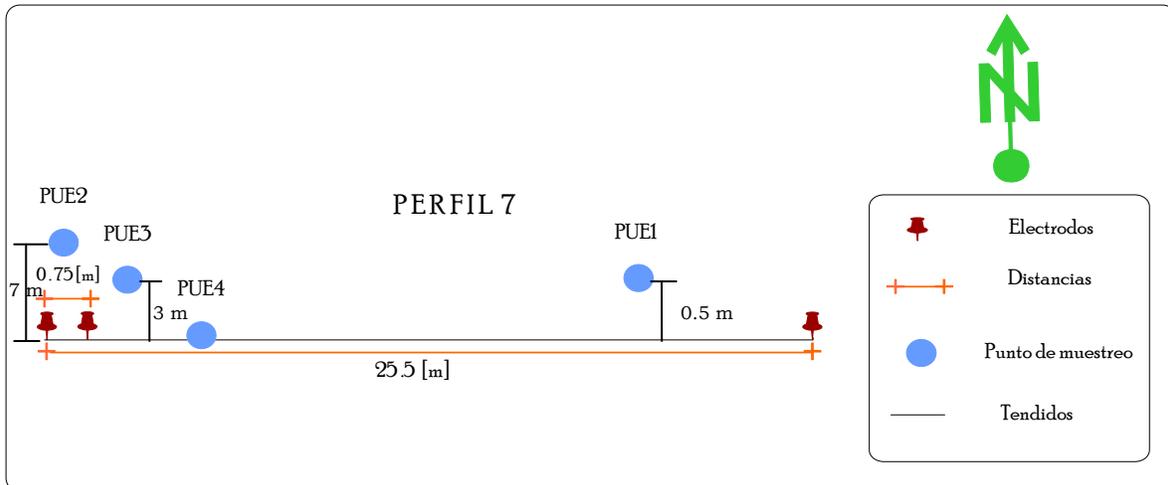


Figura 5.6 Perfil 7 ubicado en el punto de muestreo PUE1A.

Para estos perfiles se utilizaron 34 electrodos con un espaciamiento entre ellos de 0.75 m. El arreglo fue Wenner – Schlumberger con el objetivo de tener una mayor profundidad de investigación.

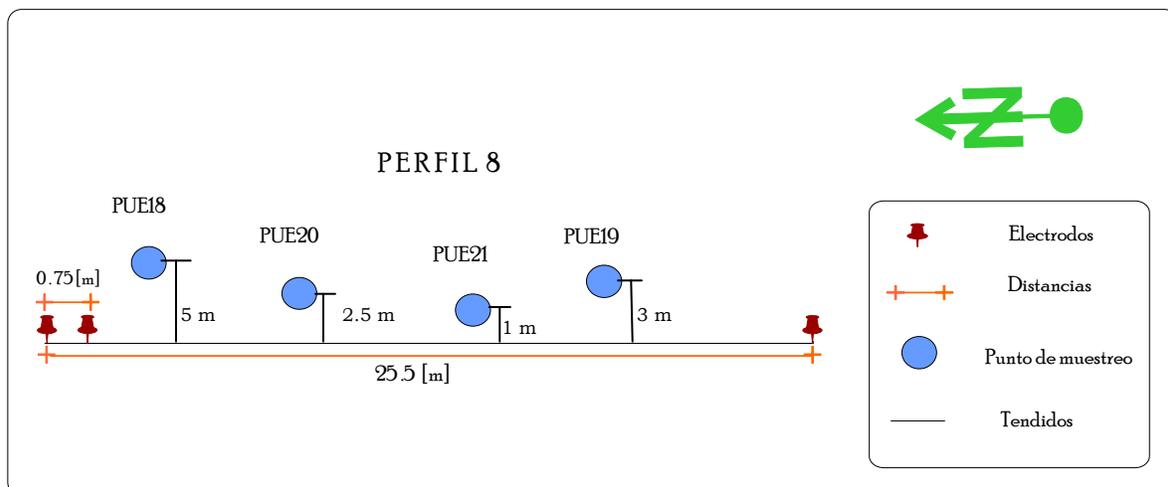


Figura 5.7 Perfil 8 y su arreglo geométrico.



Figura 5.8 Disposición del Perfil 7, se logra apreciar el diesel.

En el lugar se obtuvo muestra de suelo en dos sitios diferentes: uno contiguo al perfil seis y el segundo ubicado a un metro del perfil siete (figuras 5.9 y 5.10), con el objetivo de realizar el análisis granulométrico (Anexo).



Figura 5.9 Muestreo ubicado en el perfil 6.



Figura 5.10 Muestreo ubicado en el perfil 7.

5.2.2 Inversión de los datos

Para la inversión de los datos se utilizó el software RES2DINV; los resultados obtenidos de los modelos de inversión se exportaron a SURFER para lograr una mejor visualización.

El RES2DINV es un software que automáticamente determina modelos de resistividad en dos dimensiones, obteniendo imágenes eléctricas de los perfiles. El modelo utilizado para la inversión en 2D consiste en un número de bloques rectangulares correspondientes a la

distribución de los datos en la pseudosección. Para la visualización de los datos en 3D, se acomodaron los datos 2D en el Voxler, representando el comportamiento del contaminante en extensión y profundidad.

Una subrutina del modelado se utilizó para calcular la resistividad aparente y una técnica de optimización no lineal de mínimos cuadrados para la rutina de inversión. El programa se respalda con dos técnicas de modelado: diferencias finitas y elemento finito. El RES2DINV lee formato .txt o .dat para funcionar y obtener los resultados deseados. En el caso del Voxler, utiliza la interpolación.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL SUELO CONTAMINADO POR EL MÉTODO DIRECTO

6.1.1 Hidrocarburos Fracción Media (HFM)

Con los resultados obtenidos del análisis realizado en el laboratorio a las muestras de suelo, se procede a comparar los valores máximos permisibles establecidos en la NOM-138-SEMARNAT//SS-2003 con los detectados en el lugar de estudio. Los límites máximos permisibles que establece la norma en suelos de uso industrial, ya mencionados en el capítulo tres son los siguientes: 500 mg/kg para hidrocarburos de fracción ligera (HFL), 5000 mg/kg para hidrocarburos de fracción media (HFM) y 6 000 mg/kg para hidrocarburos de fracción pesada (HFP).

Analizando los resultados obtenidos para hidrocarburos fracción media (HFM), se observa que nueve muestras de suelo de un total de 42 (que representan 21%), registran valores por arriba de los 5 000 mg/kg. Los valores que exceden dicho límite, oscilan entre 5 468 mg/kg y 36 565 mg/kg.

En la Tabla 6.1 se presentan los resultados para los hidrocarburos fracción media, analizados en las muestras de suelo, los puntos marcados con rojo indican que rebasan dicho límite.

Tabla 6.1 Concentraciones de hidrocarburos fracción media para las muestras de suelo.

NÚM.	IDENTIF.	PROF (m)	HFM (mg/kg)	OBSERVACIONES
1**	PUE1A**	1.2	36 565	Contaminación visible
2	PUE1B	4.7	ND	Mucho olor a hidrocarburo
3	PUE2A	3.1	ND	Poco olor a hidrocarburo
4	PUE3A	2.6	ND	Sin olor
5	PUE4A	1.2	ND	Sin olor
6	PUE4B	2.6	ND	
7	PUE5A	1.1	ND	Sin olor
8	PUE5B	2.2	ND	
9*	PUE6A	0.9	24 678	Olor a hidrocarburo
10	PUE6B	2	ND	

11	PUE6BD	2.1	ND	
12	PUE7A	0.9	ND	Sin olor
13	PUE8A	1.1	ND	Sin olor
14	PUE10A	0.6	579	Sin olor
15	PUE11A	0.6	4 145	Sin olor
16	PUE12A	0.6	727	Sin olor
17	PUE13A	1.2	ND	Sin olor
18	PUE13AD	1.4	ND	
19	PUE13B	2.4	ND	
20	PUE14A	1.1	ND	Poco olor a hidrocarburo
21	PUE14B	2.2	ND	
22*	PUE15A	1.3	7 227	Olor a hidrocarburo
23	PUE15B	1.8	462	
24	PUE15C	2.5	2 964	
25	PUE16A	1.2	ND	Sin olor
26	PUE17A	1.2	ND	Sin olor
27	PUE18A*	1.3	7 048	Fuerte olor a hidrocarburo
28	PUE18B*	2.2	5 468	
29	PUE18BD	2.3	3 991	
30	PUE18C*	3.8	8 551	
31	PUE18D*	4.9	9 317	
32	PUE18E*	5.2	6 108	
33	PUE19A	1.1	ND	Poco olor a hidrocarburo
34	PUE19B	2.4	ND	
35	PUE20A*	1.6	9 903	Fuerte olor a hidrocarburo
36	PUE20B	3.6	ND	
37	PUE20BD	3.8	1 814	
38	PUE21A	1.4	ND	Sin olor
39	PUE22A	1.4	213	Sin olor
40	PUE22B	2.5	ND	
41	PUE23A	1.4	ND	Sin olor
42	PUE23B	2.5	ND	

* Mayor al LMP de 5,000 mg/kg

**Máxima concentración detectada

ND. Inferior al límite de detección

En la Tabla 6.2 se presenta la distribución de hidrocarburos, por su longitud de cadena, en las muestras que sobrepasan los valores de HFM establecidos por la norma.

Tabla 6.2 Distribución de hidrocarburos por longitud de cadena

NUM.	IDENTIF.	C ₁₀ -C ₁₅ (%)	C ₁₅ -C ₂₀ (%)	C ₂₀ -C ₂₅ (%)	>C ₂₅ (%)
1	PUE1A	2	23	43	32
2	PUE6A	2	25	41	32
3	PUE15A	9	30	34	26
4	PUE18A	23	51	22	5
5	PUE18B	24	51	21	5
6	PUE18C	25	48	22	5
7	PUE18D	25	48	22	5
8	PUE18E	25	48	22	5
9	PUE20A	23	50	23	5
	PROM	18	42	28	13

Se observa que el mayor porcentaje, corresponde a las cadenas que se encuentran entre C₁₅ y C₂₀ con un 41%; las que se encuentran entre C₂₀ y C₂₅ tienen 28%, entre C₁₀ y C₁₅ tienen un 18% y con el menor porcentaje de 13% se presentan las cadenas de hidrocarburos mayores a C₂₅.

Los resultados de las muestras 1A, 6A y 15A presentan hidrocarburo con cadenas que corresponden a un hidrocarburo más pesado o más intemperizado. Las muestras PUE18 y PUE20 corresponden a un hidrocarburo más ligero, típico del diesel.

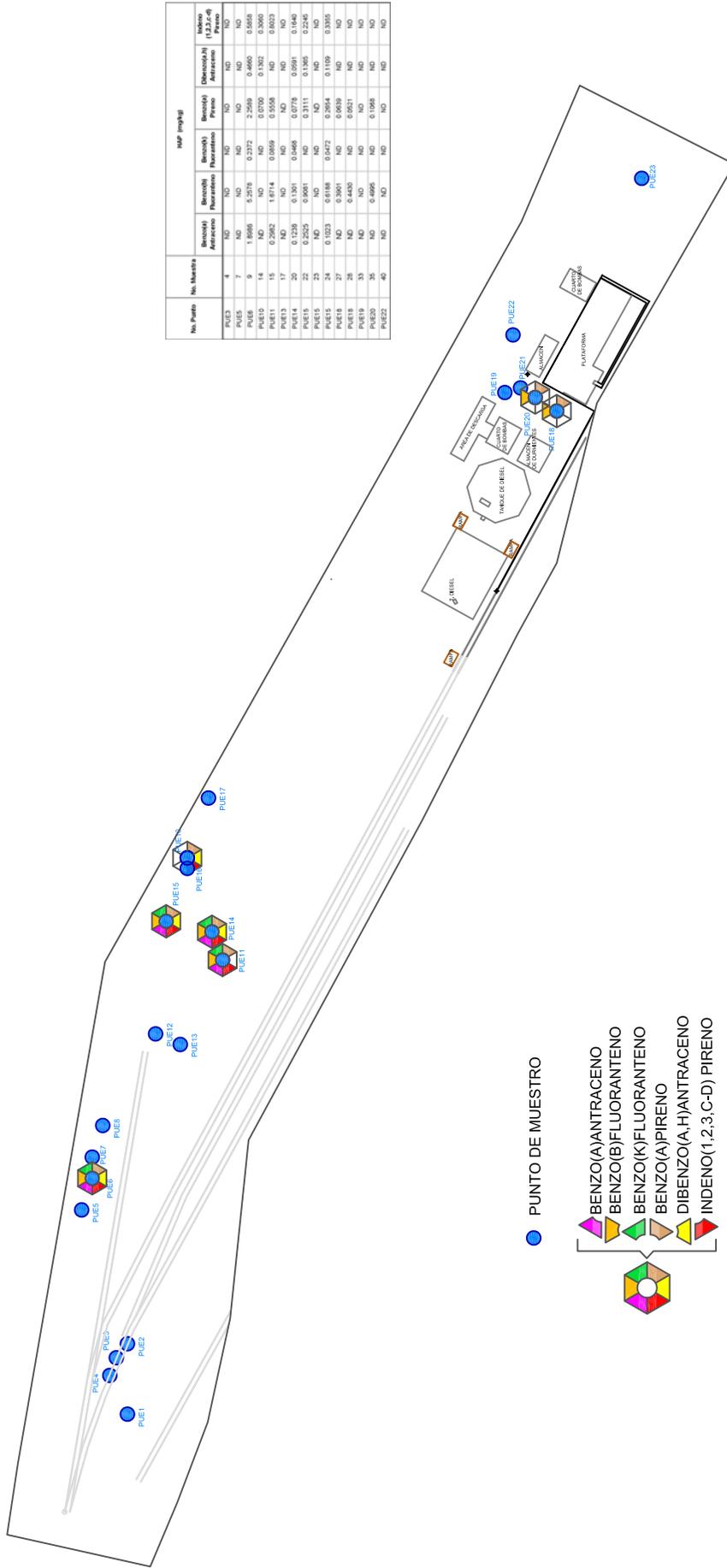
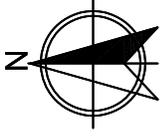
De toda el área estudiada la más afectada se ubica en la zona 4, en la cual se encuentran los tanques elevados y la muestra con mayor concentración PUE1A con un valor reportado de 36 565 mg/kg, Esta muestra se realizó entre la superficie y 2 m de profundidad.

6.1.2 Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares (HAP)

En este caso no se realizó el análisis para todas las muestras, sólo donde se apreciara contaminación visual. En la Tabla 6.3 se presentan los resultados. Para el caso del análisis de Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares (HAP) los resultados obtenidos se compararon con los LMP de la tabla 6.4, al realizar esto se obtuvo en 12 de las 20 muestras analizadas; sin embargo, todas se encuentran dentro de los límites máximos permisibles. Los resultados se compararon con el estudio realizado por Bojes y Pope (2007), donde reportan las concentraciones de HAP encontradas en sitios de exploración y producción de combustibles a través del estado de Texas. Las concentraciones

promedio del extaller de ferrocarriles de Puebla, para cada uno de los seis hidrocarburos aromáticos polinucleares que contempla la NOM-138-SEMARNAT//SS-2003, se encuentran muy por abajo de los niveles encontrados por Bojes y Pope (2007), (benzo(a)antraceno 11 mg/kg; benzo(b)fluoranteno 5.1 mg/kg; benzo(k)fluoranteno 5.1 mg/kg; benzo(a)pireno 4 mg/kg; dibenzo(a,h)antraceno 3 mg/kg y el indeno (1,2,3-cd) pireno es de 7.3 mg/kg).

En las figuras 6.1 y 6.2 se encuentran ubicados y graficados los puntos con su respectiva concentración de HAPs. En la figura 6.1 se muestran los HAP desde la superficie hasta los 3 metros de profundidad y en la figura 6.2 los HAP entre 3 y 6 metros.



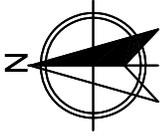
No. Punto	No. Muestra	MAP (ppb/g)					
		Benzo(a) Antraceno	Benzo(b) Fluoranteno	Benzo(k) Fluoranteno	Benzo(a) Pireno	Dibenzo(a,h) Antraceno	Indeno (1,2,3-c-d) Pireno
PUE3	4	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PUE5	6	1.5646	0.2578	0.2122	2.2609	0.4600	0.6044
PUE10	14	ND	ND	ND	0.0700	0.1302	0.3600
PUE11	15	0.2662	1.6714	0.0659	0.5558	ND	0.8023
PUE13	17	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PUE14	20	0.1258	0.1301	0.0488	0.0778	0.0591	0.1840
PUE15	21	0.0225	0.0111	0.0111	0.0111	ND	ND
PUE16	22	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PUE18	24	0.1023	0.6188	0.0472	0.2654	0.1109	0.3395
PUE19	26	ND	0.3091	ND	0.0639	ND	ND
PUE19	28	ND	0.4430	ND	0.0621	ND	ND
PUE19	34	ND	0.0295	ND	0.0295	ND	ND
PUE22	40	ND	0.0295	ND	0.0295	ND	ND
PUE22	42	ND	0.0295	ND	0.0295	ND	ND
PUE22	44	ND	0.0295	ND	0.0295	ND	ND
PUE22	46	ND	0.0295	ND	0.0295	ND	ND

FIGURA 6.1
HIDROCARBUROS AROMATICOS
POLINUCLEARES ENTRE 0 Y 3m DE PROFUNDIDAD



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
 DE MÉXICO





No. Punto	No. Muestra	MSP (mg/kg)						Método (1,2,3,4-8)	Fecha
		Benzo(a) Fluoranteno	Benzo(b) Fluoranteno	Benzo(k) Fluoranteno	Benzo(a) Pireno	Dibenz(a,h) Antraceno	Indeno(1,2,3-c,d) Pireno		
PUE1	2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PUE18	30	ND	0.012	ND	0.018	ND	ND	ND	ND
PUE18	31	ND	0.705	ND	0.120	ND	ND	ND	ND
PUE20	38	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

No. Punto	No. Muestra	MSP (mg/kg)						Método (1,2,3,4-8)	Fecha
		Benzo(a) Fluoranteno	Benzo(b) Fluoranteno	Benzo(k) Fluoranteno	Benzo(a) Pireno	Dibenz(a,h) Antraceno	Indeno(1,2,3-c,d) Pireno		
PUE19	32	142	8.475	110	0.197	102	110	110	



FIGURA 6.2
HIDROCARBUROS AROMATICOS
POLINUCLEARES ENTRE 3 Y 5m DE PROFUNDIDAD



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
 DE MÉXICO

Tabla 6.3 Concentraciones de HAP para las muestras de suelo (mg/kg).

NÚM.	IDENTIF.	PARÁMETRO (mg/kg)					Indeno (1,2,3,c- d) pireno
		Benzo(a) antraceno	Benzo(b) fluoranteno	Benzo(k) fluoranteno	Benzo(a) Pireno	Dibenzo(a,h) antraceno	
1	PUE1B	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2	PUE3A	ND	ND	ND	ND	ND	ND
3	PUE5A	ND	ND	ND	ND	ND	ND
4	PUE6A	1.8986	5.2578	0.2372	2.2589	0.4660	0.5858
5	PUE10A	ND	ND	ND	0.0700	0.1302	0.3060
6	PUE11A	0.2982	1.6714	0.0859	0.5558	ND	0.8023
7	PUE13A	ND	ND	ND	ND	ND	ND
8	PUE14A	0.1238	0.1301	0.0468	0.0778	0.0591	0.1640
9	PUE15A	0.2525	0.9081	ND	0.3111	0.1365	0.2245
10	PUE15B	ND	ND	ND	ND	ND	ND
11	PUE15C	0.1023	0.6188	0.0472	0.2654	0.1109	0.3355
12	PUE18A	ND	0.3901	ND	0.0639	ND	ND
13	PUE18B	ND	0.4430	ND	0.0521	ND	ND
14	PUE18C	ND	0.6152	ND	0.0816	ND	ND
15	PUE18D	ND	0.7665	ND	0.1290	ND	ND
16	PUE18E	ND	0.4735	ND	0.0917	ND	ND
17	PUE19A	ND	ND	ND	ND	ND	ND
18	PUE20A	ND	0.4995	ND	0.1068	ND	ND
19	PUE20B	ND	ND	ND	ND	ND	ND
20	PUE22B	ND	ND	ND	ND	ND	ND

En la Tabla 6.4 se presentan las concentraciones máximas permisibles para los HAP que se consideran en la NOM-138-SEMARNAT//SS-2003 para un suelo de uso industrial.

Tabla 6.4 Límites máximos permisibles para HAP para suelos de uso industrial.

COMPUESTO	CONCENTRACIÓN (mg/kg)
Benzo(a)pireno	10
Dibenzo(a,h)antraceno	10
Benzo(a)antraceno	10
Benzo(b)fluoranteno	10
Benzo(k)fluoranteno	80
Indeno(1,2,3-,d)pireno	10

6.1.3 Resultados de caracterización del suelo del sitio

En la Tabla 6.5 se presentan los resultados correspondientes a los análisis de los parámetros físicos, químicos y biológicos.

Tabla 6.5 Parámetros físicos, químicos y biológicos.

PARÁMETRO	INTERVALO
pH	7.4
Contenido de agua, w (%)	12 - 32
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	312
Densidad aparente, ρ_b (g/cm^3)	1.27
Densidad real, ρ_r (g/cm^3)	2.48
Porosidad, n	0.49
Materia orgánica (%)	3.0
Fracción de carbono orgánico	0.013
Análisis granulométrico	
Suelo 1	Arena 84.5%; Limo 12%; Arcilla 3.5%
Suelo 2	Grava 33%; Arena 63%; Limo 3%; Arcilla 1%
Potencial redox	114.25
Fósforo disponible (mg/kg)	9.5
Conteo de bacterias heterótrofas (UFC)	1×10^4

UFC = Unidades formadoras de colonias

6.1.4 Aplicación del modelo Surfer. Áreas y volúmenes de suelo contaminado

Para el modelado espacial de la zona de estudio se utilizó el programa Surfer, debido a que genera contornos y superficies 3D a partir de una serie de puntos aislados y su representación gráfica en diferentes formas.

La aplicación del modelo consistió en indicar las concentraciones de HFM para cada punto de muestreo y profundidad. La salida del modelo es para una sola profundidad, por lo que se consideraron tres capas:

- ❖ La primera entre la superficie y 3 m de profundidad.
- ❖ La segunda entre 3 m y 5 m de profundidad.
- ❖ La tercera mayor a 5 m de profundidad.

La salida del modelo genera curvas de isoconcentraciones para cada una de las capas considerada, de tal manera que es posible medir el área generada dentro de cada grupo de curvas. El volumen se calcula multiplicando el área del contorno por el espesor de la capa.

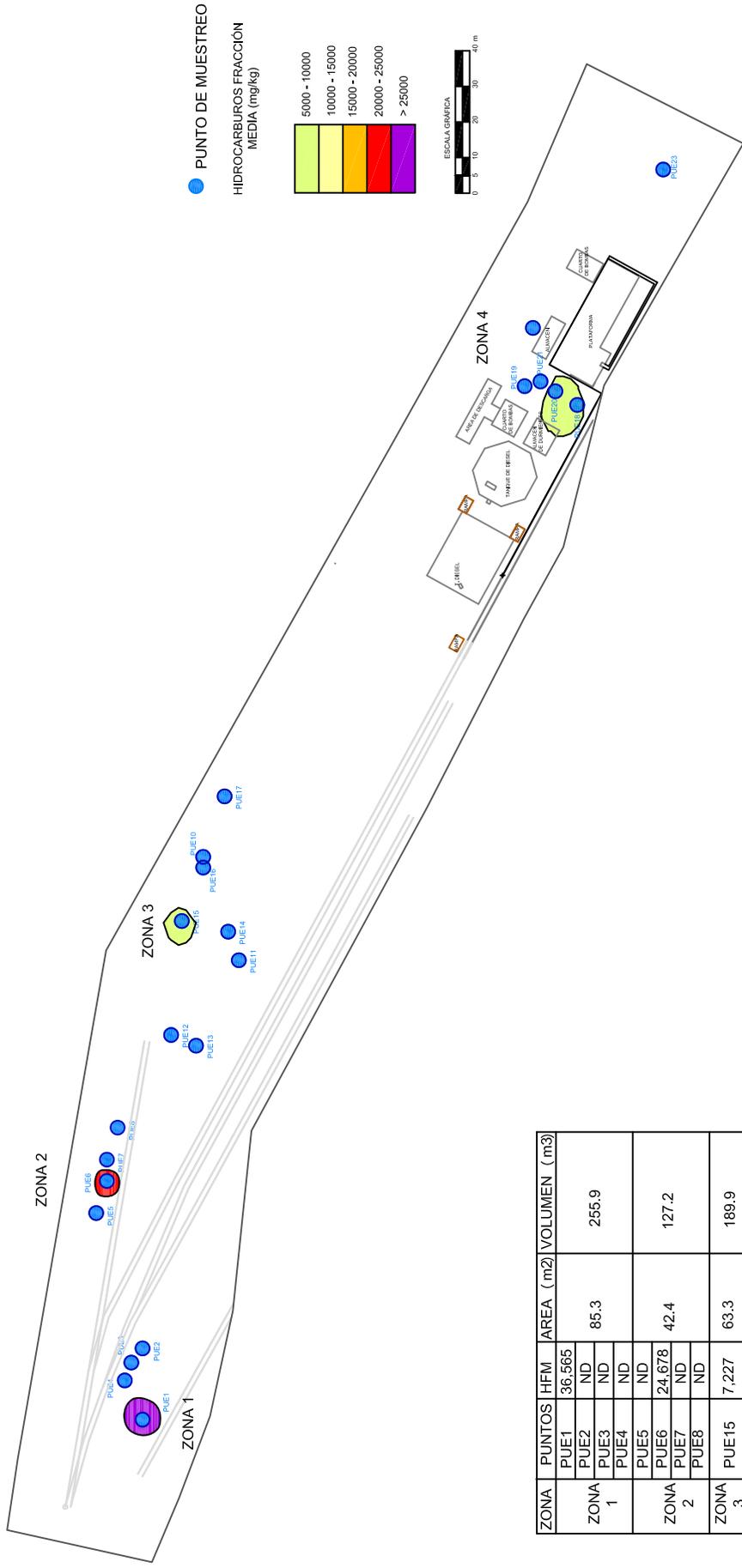
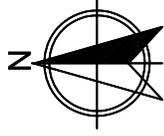
Por consiguiente, los volúmenes que requieren remediación se calcularon en base a las áreas obtenidas con el modelo Surfer y las profundidades a las que se obtuvieron las muestras (Tablas 6.6, 6.7 y 6.8). A continuación se presentan las áreas y volúmenes contaminados con hidrocarburos fracción media de acuerdo con los resultados de la aplicación del modelo Surfer. En las figuras 6.3, 6.4 y 6.5 se encuentran las zonas configuradas y los volúmenes calculados.

Tabla 6.6 Áreas y volúmenes contaminados con hidrocarburos fracción media entre la superficie y 3.0 m de profundidad.

Intervalo de concentraciones de HFM (mg/kg)	Área (m²)	Volumen (m³)
5 000 – 10 000	214	642
10 000 – 15 000	-	-
15 000 – 20 000	-	-
20 000 – 25 000	43	129
➤ 25 000	85	255
TOTAL	342	1026

Tabla 6.7 Áreas y volúmenes contaminados con hidrocarburos fracción media entre 3.0 y 5.0 m de profundidad.

Intervalo de concentraciones de HFM (mg/kg)	Área (m²)	Volumen (m³)
5 000 – 10 000	116	232
TOTAL	116	232



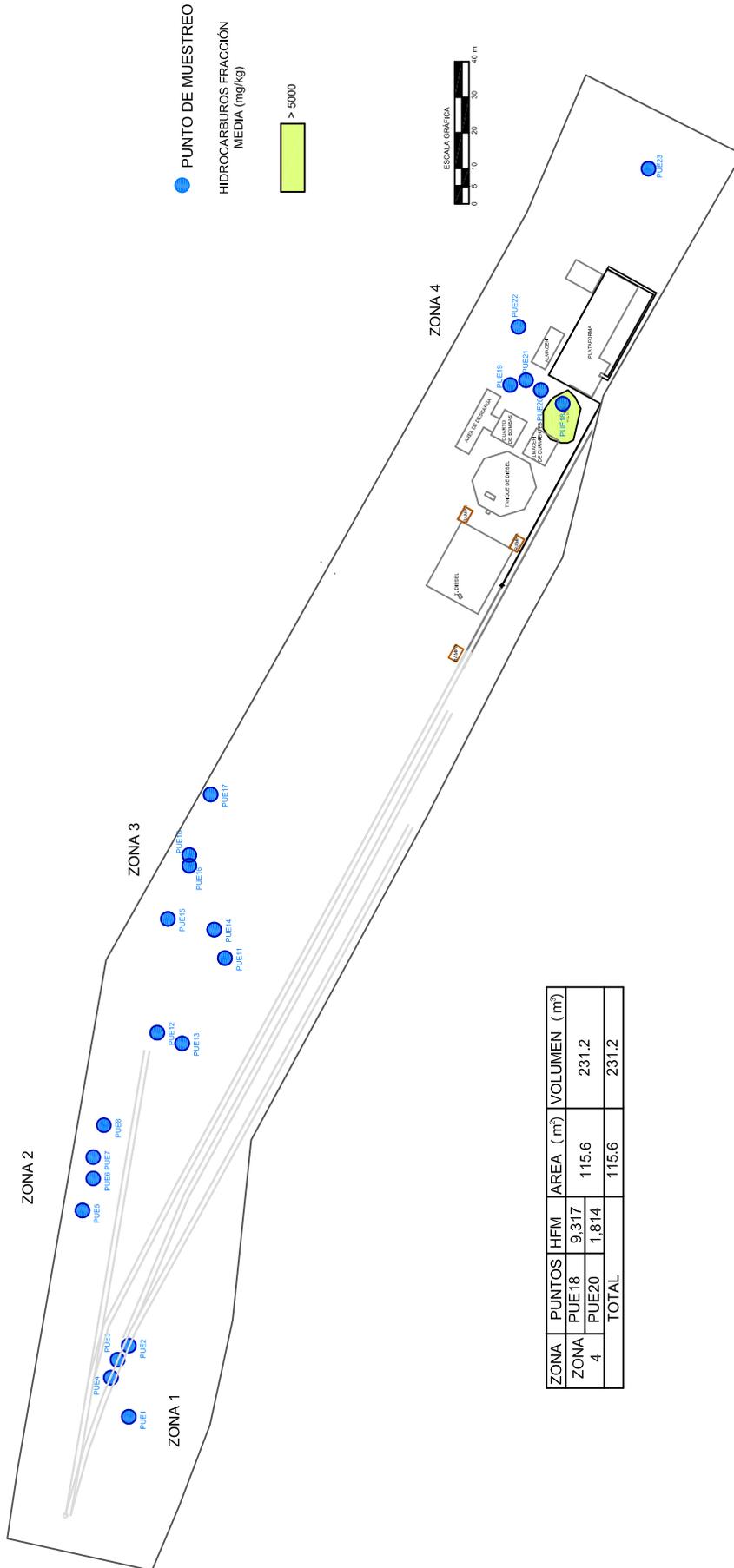
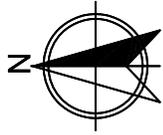
ZONA	PUNTOS	HFM	AREA (m2)	VOLUMEN (m3)
ZONA 1	PUE1	36.565	85.3	255.9
	PUE2	ND		
	PUE3	ND		
	PUE4	ND		
	PUE5	ND		
ZONA 2	PUE6	24.678	42.4	127.2
	PUE7	ND		
	PUE8	ND		
ZONA 3	PUE15	7.227	63.3	189.9
ZONA 4	PUE18	7.048	150.9	452.7
	PUE20	9.903		
TOTAL			341.9	1025.7

FIGURA 6.3

HIDROCARBUROS FRACCIÓN MEDIA
ENTRE 0 Y 3 m. DE PROFUNDIDAD



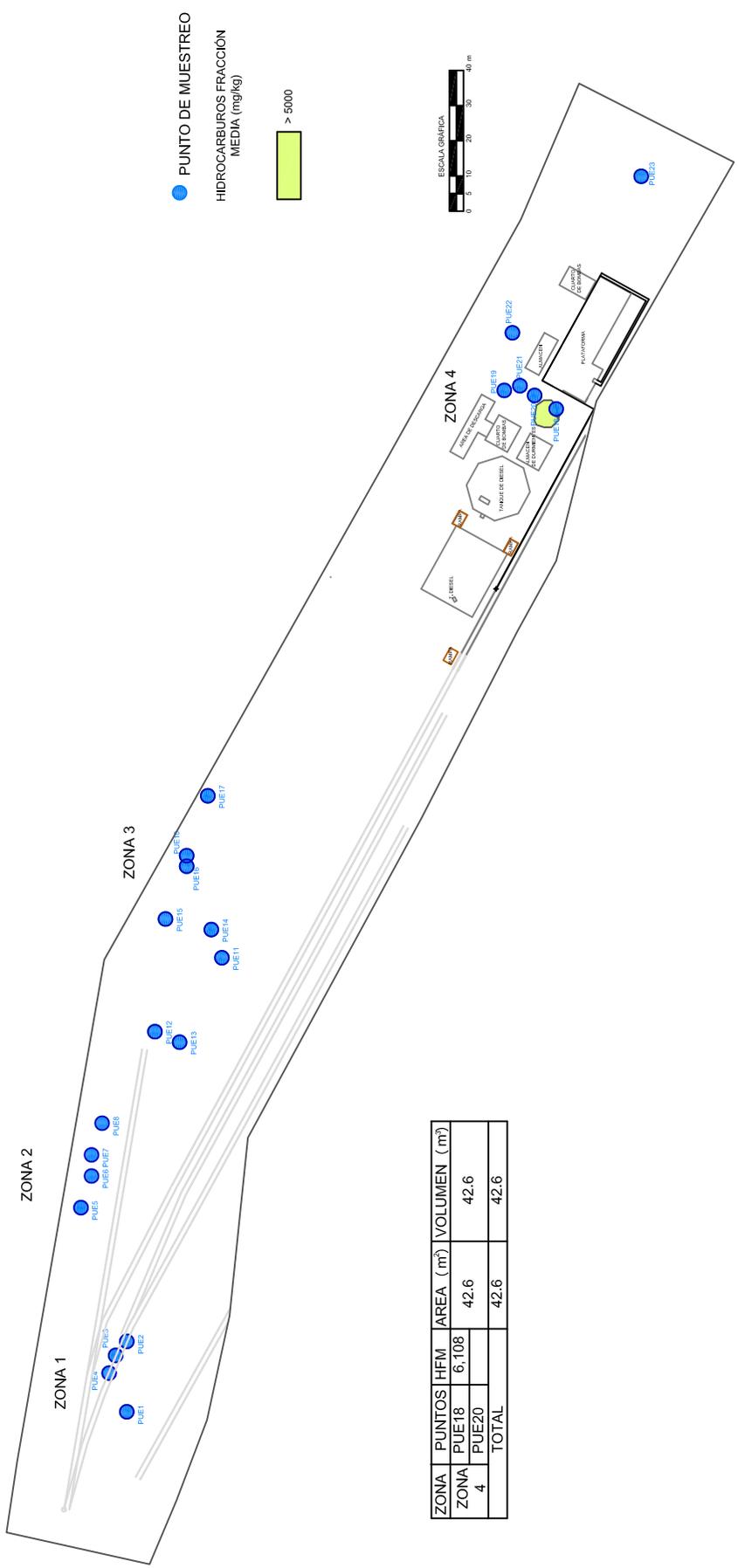
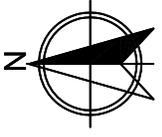
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



ZONA	PUNTOS	HFM	AREA (m ²)	VOLUMEN (m ³)
ZONA 1	PUE18	9,317	115.6	231.2
ZONA 2	PUE20	1,814		
TOTAL			115.6	231.2

FIGURA 6.4
 HIDROCARBUROS FRACCIÓN MEDIA
 ENTRE 3 y 5 m. DE PROFUNDIDAD





ZONA	PUNTOS	HFM	AREA (m ²)	VOLUMEN (m ³)
ZONA 4	PUE18	6,108	42.6	42.6
	PUE20			
TOTAL			42.6	42.6



FIGURA 6.5
HIDROCARBUROS FRACCION MEDIA
ENTRE 5 Y 6 m. DE PROFUNDIDAD



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
 DE MÉXICO

Tabla 6.8 Áreas y volúmenes contaminados con hidrocarburos fracción media a más de 5.0 m de profundidad.

Intervalo de concentraciones de HFM (mg/kg)	Área (m²)	Volumen (m³)
5 000 – 10 000	43	43
TOTAL	43	43

El volumen total de suelo que sobrepasa la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 para HFM es de **1 300 m³**.

6.2 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL SUELO CONTAMINADO POR EL MÉTODO INDIRECTO

6.2.1 Inversión de los perfiles de resistividad

A continuación se interpretan los perfiles realizados en el sitio de acuerdo con sus propiedades de resistividad y la delimitación de los contaminantes. La ubicación de los ocho perfiles se muestra en la figura 6.6.

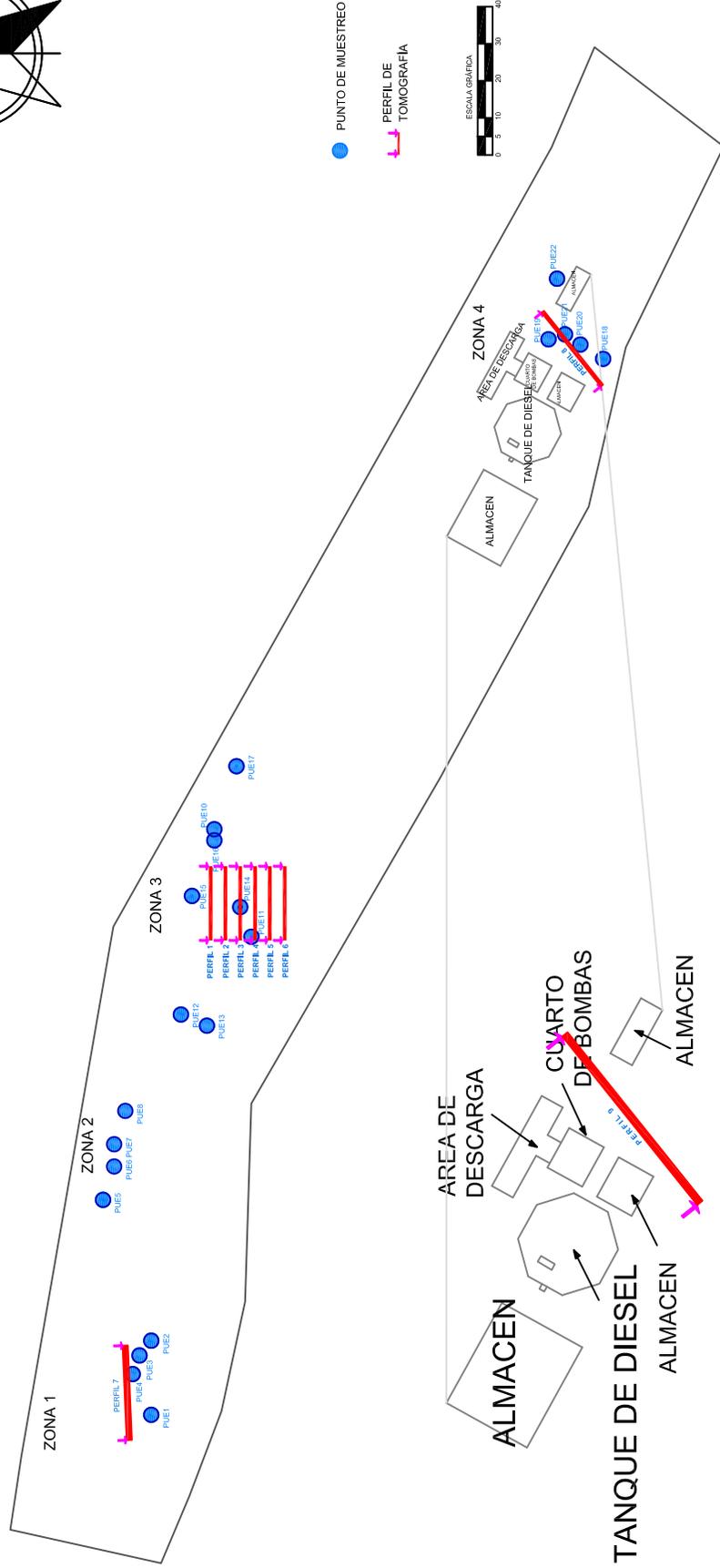
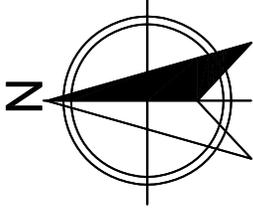


FIGURA 6.6
UBICACION DE LAS ZONAS DE MONITOREO Y OBSERVACION DE LOS
TENDIDOS DE TOMOGRAFIA DE RESISTIVIDAD ELECTRICA.



❖ **Perfil 1**

En la figura 6.7 se muestra el resultado de la inversión de los datos tomados en campo, donde a partir del primer metro de profundidad se pueden observar valores de resistividad altos (entre 600 y 1000 ohm-m); al parecer el medio se encuentra impregnado de un material externo a este. El terreno natural que corresponde a las zonas verdes, tiene resistividades entre 25 y 40 ohm-m. Los valores que aparecen representados entre los 100 y los 250 ohm-m, se puede inferir que es una zona menos contaminada que las resistividades más altas de 1000 ohm-m.

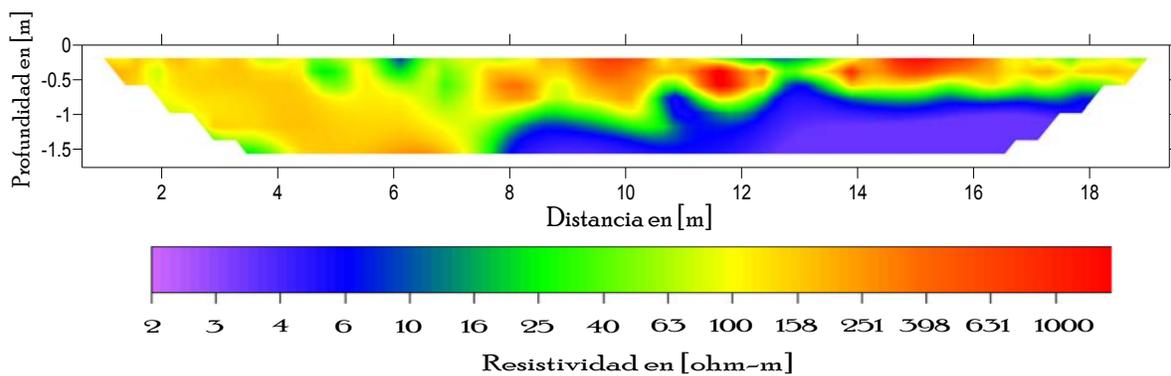
PERFIL 1

Figura 6.7 Perfil 1. Inversión obtenida con el software RES2DINV.

❖ **Perfil 2**

En el caso del perfil 2 (figura 6.8) se tienen dos zonas muy marcadas, la primera corresponde a un área muy resistiva (color rojo) que se aparece a lo largo de todo el perfil y aproximadamente a 1 m de profundidad. Además se observa que sigue un patrón casi de las mismas dimensiones que en el perfil 1.

A los 0.5 metros de profundidad se observan valores altos de resistividad y a la profundidad más o menos de 1.5 m, al igual que en el perfil 1, aparece un medio que se atribuye al terreno natural, además de zonas que pudiera estar migrando el contaminante hacia la parte inferior, aunque con menos concentración (resistividades entre 100 y 250 ohm-m).

PERFIL 2

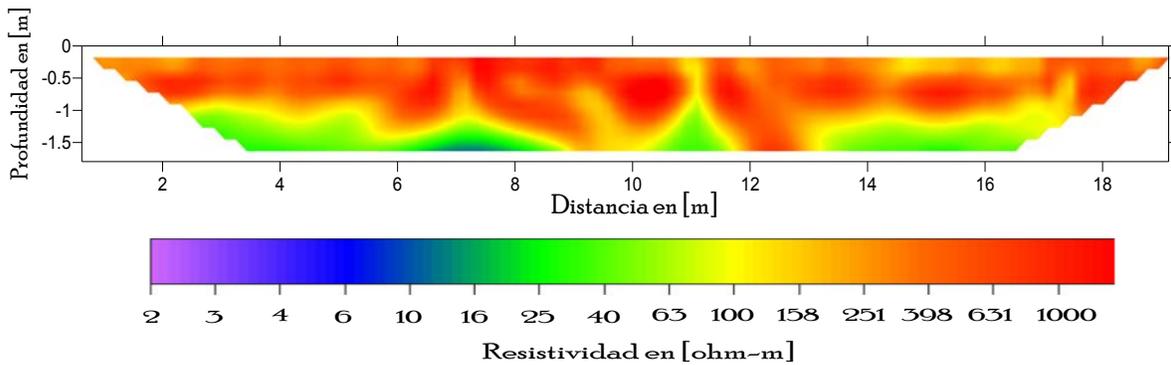


Figura 6.8 Perfil 2. Inversión obtenida con el software RES2DINV.

❖ **Perfil 3**

En el perfil 3 (figura 6.9) se observa nuevamente el medio resistivo, pero con una intensidad menor que los dos anteriores. Aunque en el centro se vuelve a presentar una resistividad de entre 600 y 1000 ohm.m. Se observa nuevamente el medio natural hacia el fondo del perfil.

PERFIL 3

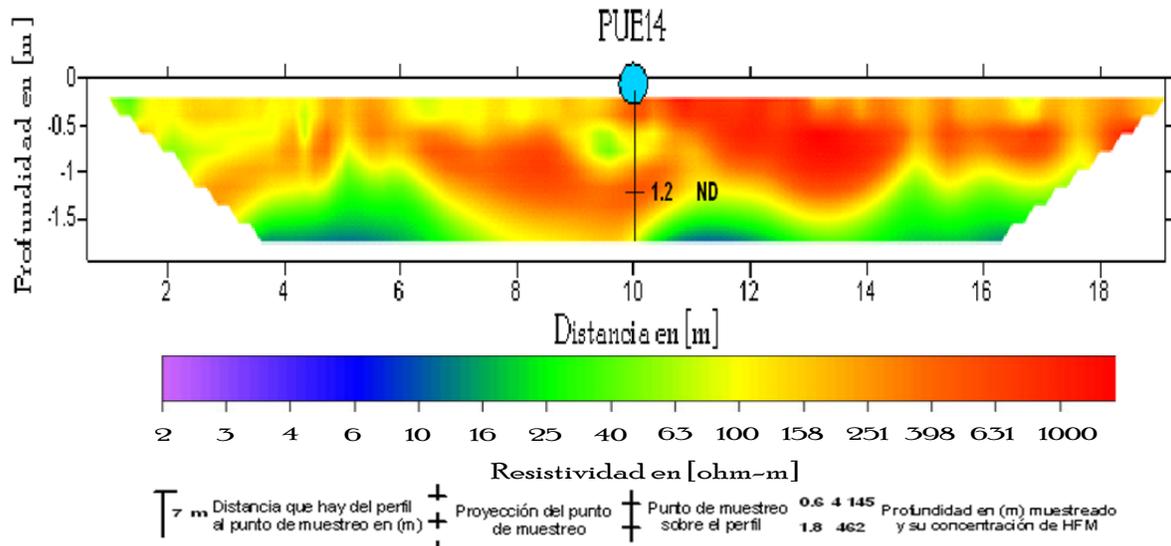


Figura 6.9 Perfil 3. Inversión obtenida con el software RES2DINV.

❖ **Perfil 4**

En este perfil (figura 6.10) se observa la disminución de la resistividad en general, aunque hacia el lado izquierdo vuelve a marcarse el alto resistivo. En cambio, del centro y a hacia la derecha del perfil disminuye la resistividad.

Entre 0 y 4 m en la dirección x se presenta desde la superficie hasta casi alcanzar los 1.5 m de profundidad. El medio natural se presenta de los 8 m hasta el final en este perfil, contrastando con los valores de resistividades altos. El PUE11 lo confirma en el lado izquierdo del perfil con una concentración de 4 145 mg/kg a 0.6 m de profundidad.

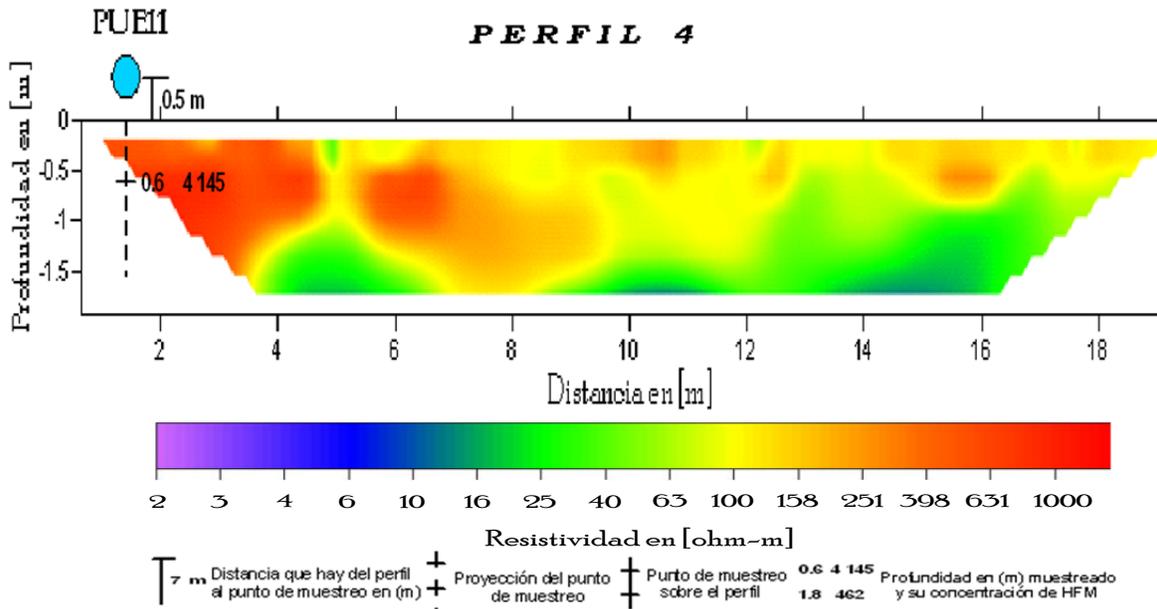


Figura 6.10 Perfil 4. Inversión obtenida con el software RES2DINV.

❖ **Perfil 5**

A diferencia de los perfiles anteriores, en éste (figura 6.11) desaparece por completo el alto resistivo en la superficie; sin embargo, aproximadamente entre 1m y 1.5m de profundidad vuelve a aparecer el alto resistivo. No es tan marcado como las anteriores y se logra ver con mayor claridad el terreno natural (color verde), en éste sitio se podría decir que hubo un relleno de material limpio sobre un suelo ya contaminado previamente.

PERFIL 5

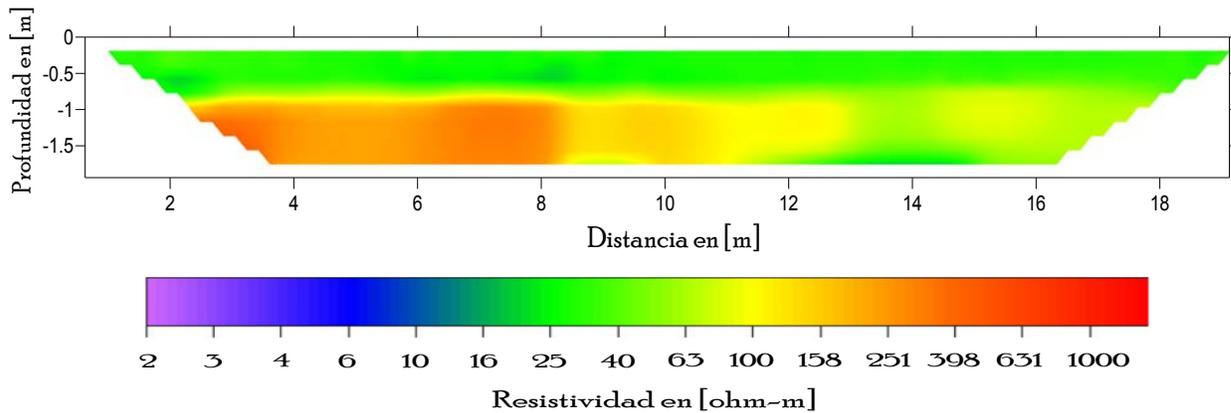


Figura 6.11 Perfil PUE1. Inversión obtenida con el software RES2DINV.

❖ **Perfil 6**

Al igual que en el perfil 5, en este perfil (figura 6.12) el alto resistivo no se presenta desde la superficie (solo del lado izquierdo), sin embargo, a partir de una profundidad de 0.5 m se presenta nuevamente un alto resistivo que va disminuyendo hacia el centro de la imagen y aumentando nuevamente hacia la superficie en el lado derecho (entre 15 a 18m en la dirección x). Marcándose la resistividad del medio natural, al igual que los perfiles anterior en color verde.

PERFIL 6

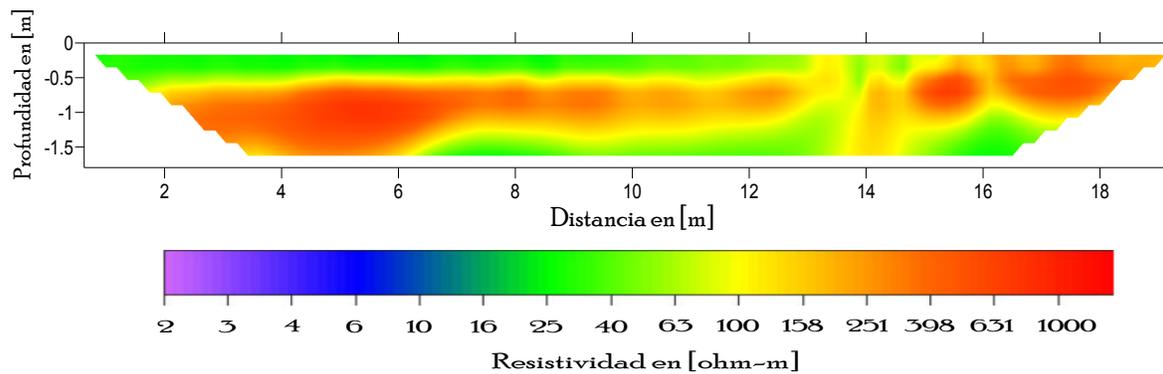


Figura 6.12 Perfil PUE18. Inversión obtenida con el software RES2DINV.

❖ **Perfil 7**

El perfil se encuentra ubicado cerca del punto de muestreo PUE1 (figura 6.13), En campo, se logró observar directamente el hidrocarburo (diesel) aflorando, el perfil quedo paralelo a esta mancha. Además se presenta una franja conductiva, a partir de 1.5 m de profundidad. En la parte superior del perfil, se delinean zonas de mayor resistividad disminuyendo con la profundidad hasta aproximadamente 1 m.

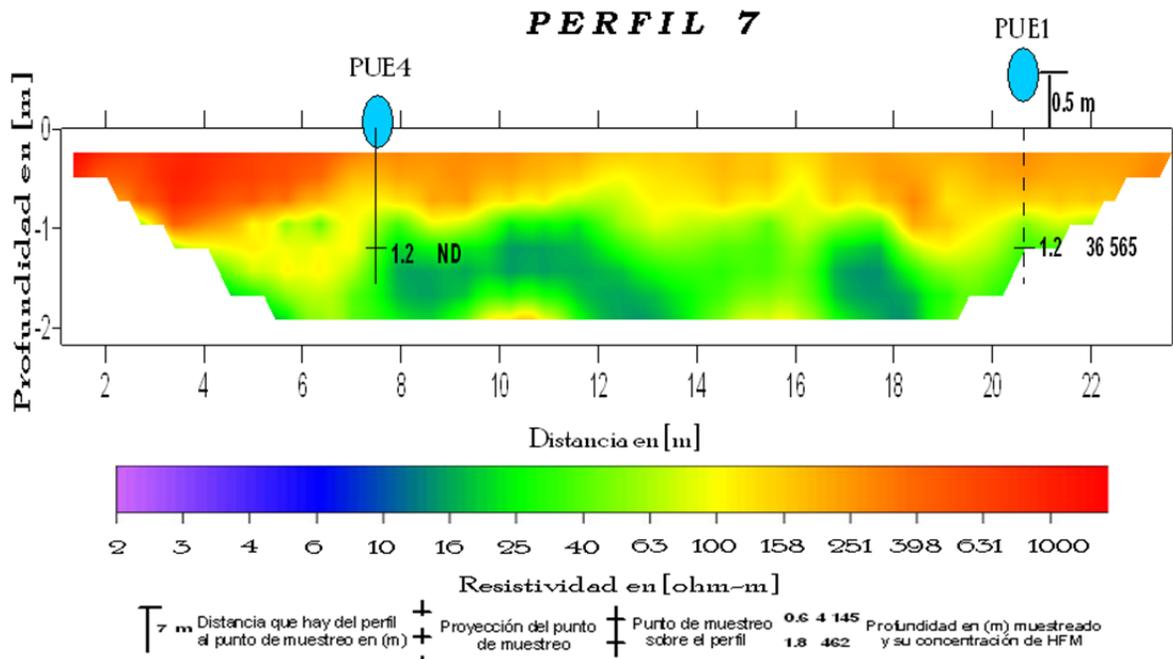


Figura 6.13 Perfil 7. Inversión obtenida con el software RES2DINV.

❖ **Perfil 8**

El siguiente perfil (figura 6.14), se encuentra localizado entre dos tanques de almacenamiento de diesel. Se observa que cruza los puntos PUE18, PUE20, PUE21 y PUE 19. En el informe de los análisis de contenido de hidrocarburos para estos puntos, el PUE18 resultó el más contaminado con una concentración de 7,048 mg/kg a una profundidad de 1.3 m. Desafortunadamente, en la inversión se pierden esos datos, aunque se puede asumir que las zonas rojas son el contaminante, ya que en esa zona se mantienen activos los tanques de almacenamiento y existe la posibilidad de encontrar hidrocarburo reciente. Los demás puntos no rebasan el límite máximo permisible de la norma, sin descartar que exista contaminación.

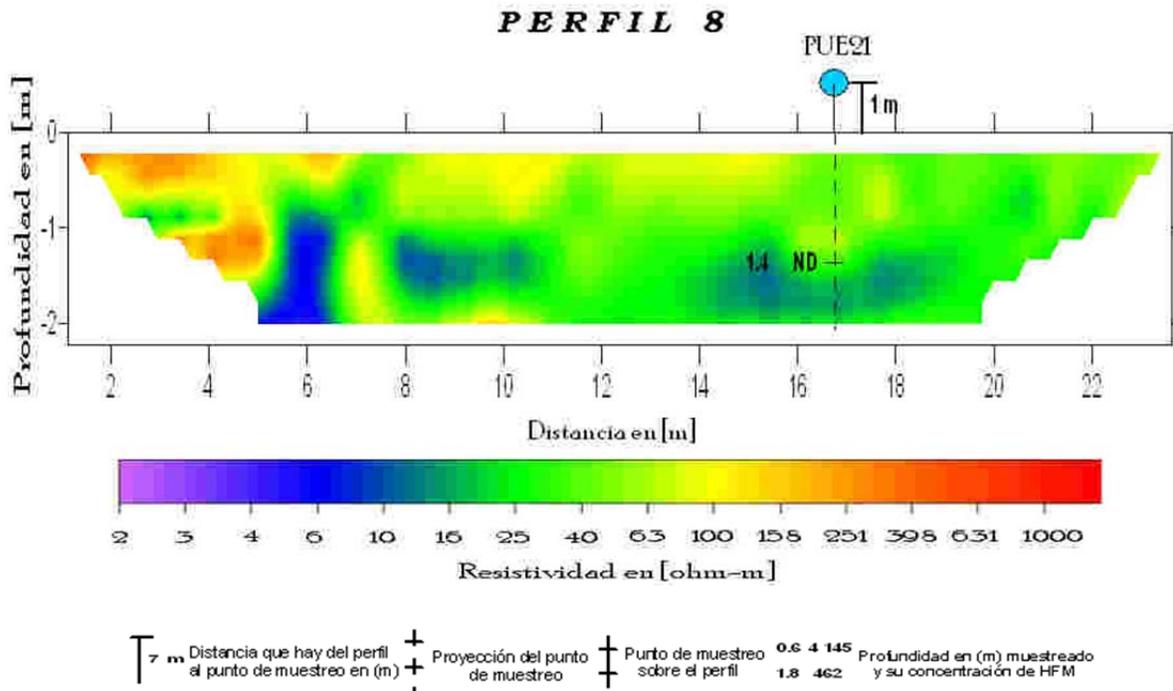


Figura 6.14 Perfil 8. Inversión obtenida con el software RES2DINV.

Además de las configuraciones realizadas en Surfer, se utilizó el software Voxler (versión 2.0), para una mejor apreciación de la migración y la delineación de la contaminación en la zona de estudio. Los datos utilizados fueron de los perfiles 1 a 6 a tres profundidades diferentes: -0.5, -1.0 y -1.5. A continuación se muestran las imágenes obtenidas por dicho software y su descripción.

Es una herramienta que nos ayuda a dar una aproximación del comportamiento de la pluma contaminante, debido a que la separación de los perfiles es de 4 metros, implicando que el software interpole los datos con la información que tiene (datos de las resistividades bidimensionales).

En la figura A, se graficaron los puntos de resistividad de los seis perfiles. Se identifican las diferentes profundidades que se tomaron de los datos invertidos, para lograr su apreciación en 3D y visualizar la tendencia que presenta la contaminación. Los puntos rojos representan la contaminación y las zonas verdes y amarillas es el medio natural del sitio sin contaminación.

Además en la figura B, se muestra el cubo de resistividades para las tres diferentes profundidades (0.5, 1.0 y 1.5), donde se aprecia el plano X-Y de 0.5 m de profundidad hasta 1.5 m en Z. Sin embargo, los planos X-Y para las profundidades de 1.0 y 1.5 m no son visibles, por lo que se presentan más adelante los planos X-Y para las tres profundidades, logrando mejor apreciación de las configuraciones de los datos (figuras C, D Y E).

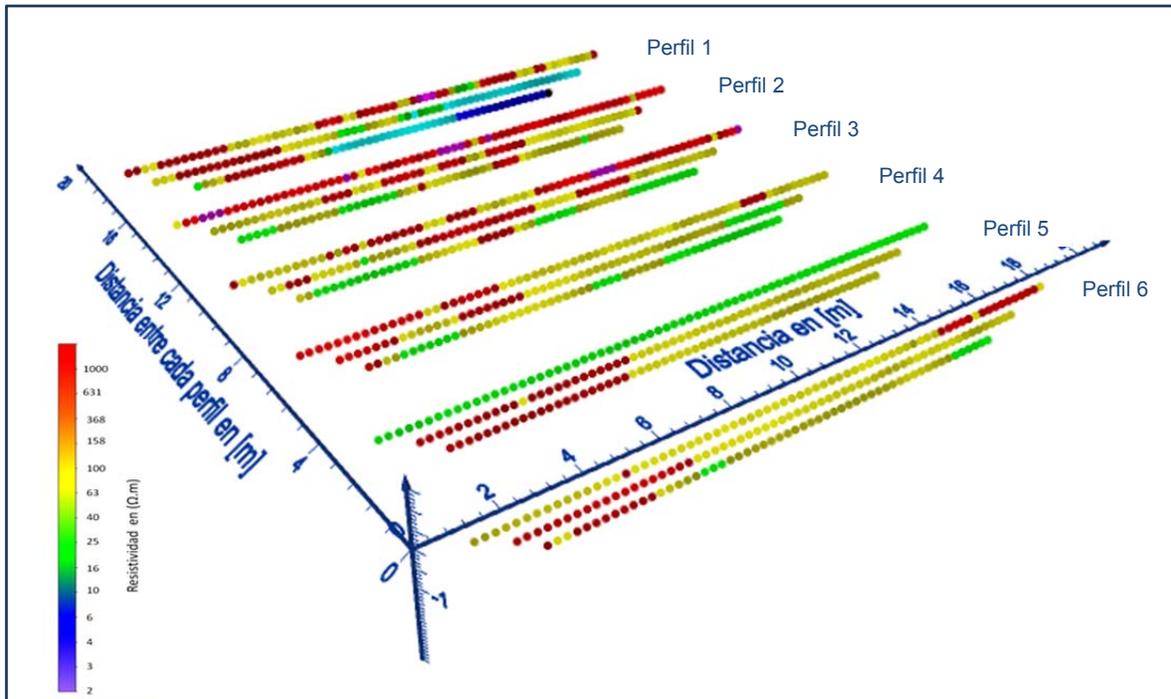


Figura A. Puntos de los datos de resistividad en ohm.m, de los 6 perfiles.

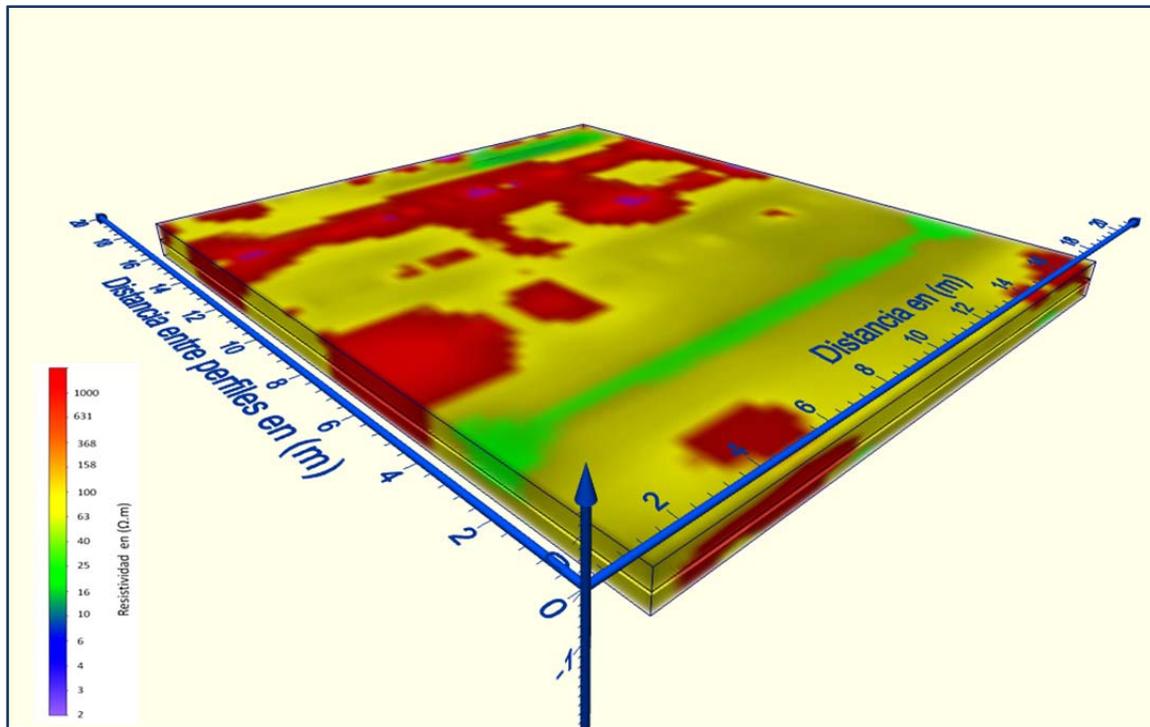


Figura B. Cubo de resistividades en plano X-Y-Z de los 6 perfiles.

La figura C es un plano X-Y a una profundidad de -0.5 m, donde se logra apreciar una posible delineación de la pluma contaminante entre el perfil 2 y el perfil 3. Hacia el perfil 4, el punto PUE11 con un valor de 4 145 mg/kg de concentración de hidrocarburo muestreado a -0.6 m, cae sobre una zona delineada con valores de hasta más de 1000 ohm.m (zona roja), mostrando la presencia del contaminante. Las zonas que presentan resistividades entre 25 y 40 ohm.m, son aquellas que se consideran el medio natural sin contaminación por el hidrocarburo, presentes en la parte centro-este y el perfil 5 delinea una zona de entre 16 y 40 ohm-m, muy probablemente perteneciente a la zona de relleno. También se logran apreciar zonas más puntuales de la contaminación en la zona estudiada, sin contar con dato de muestreo directo.

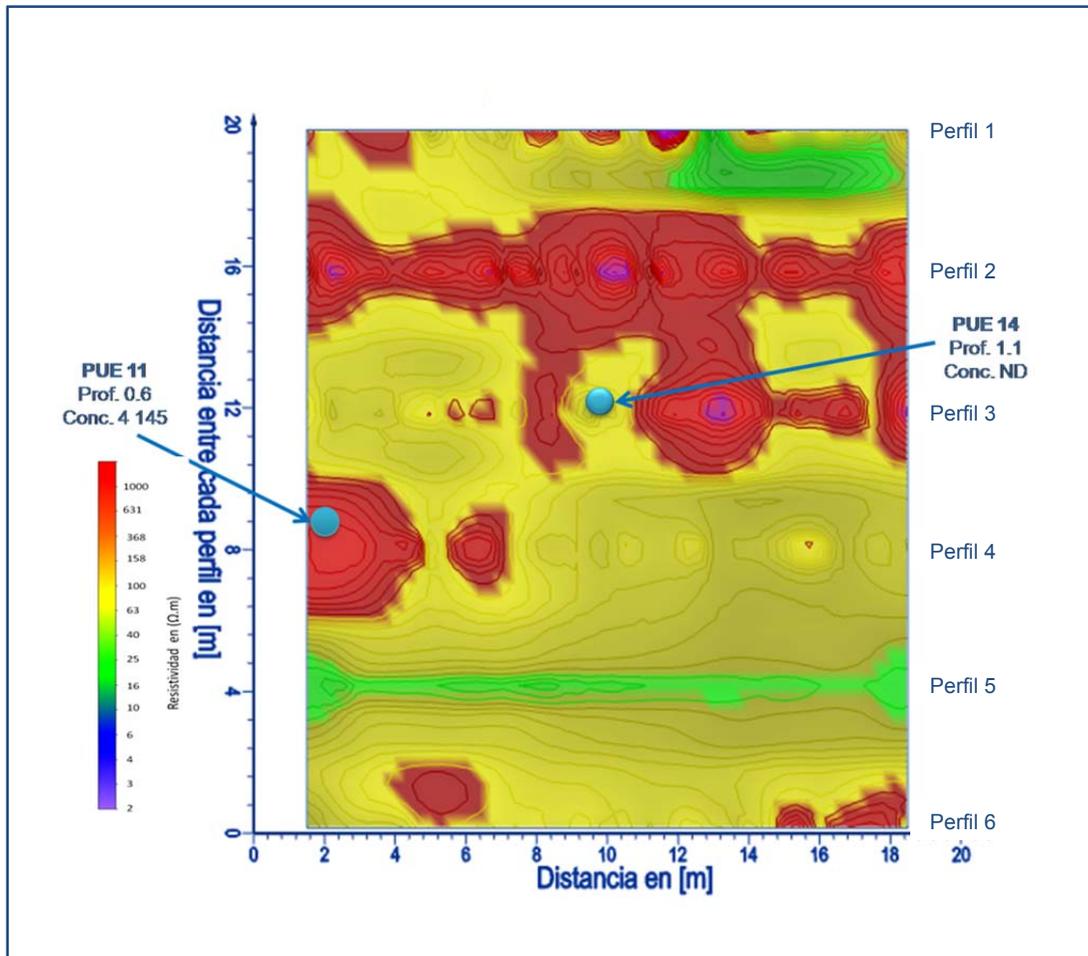


Figura C. Delineación de la contaminación en un plano X-Y a 0.5 m de profundidad (zonas rojas).

La figura D es un plano X-Y a una profundidad de -1.0 m. Se puede interpretar una disminución en la mancha del contaminante, entre los perfiles 2 y 3, aunque la contaminación se continúa apreciando. La muestra PUE14 cae en una zona de contaminación como se muestra en la figura D; sin embargo, se reporta ND a esta profundidad de -1.1 m; esto se explica porque la muestra pudo haber sido tomada justo en una pequeña interfaz donde la contaminación no fuera significativa y por lo tanto no se manifestó ninguna concentración. Los puntos aislados contaminados siguen presentándose en la imagen y en la zona centro-este se mantiene sin contaminación.

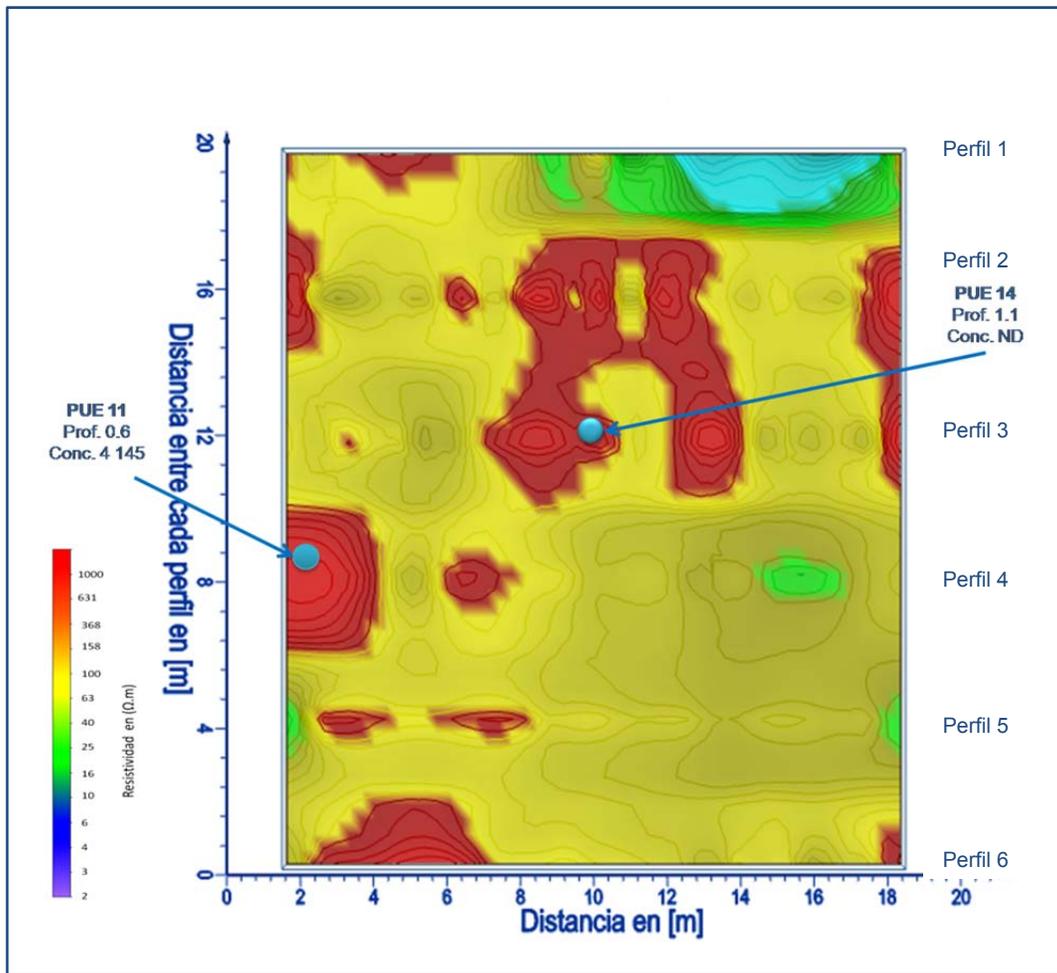


Figura D. Delineación de la contaminación en un plano X-Y a 1.0 m de profundidad (zonas rojas).

La figura E, a una profundidad de -1.5 m en el plano X-Y, se identifica un área más pequeña de la pluma contaminante entre los perfiles 2 y 3, en comparación con la figura D. Para el caso del perfil 4, la contaminación continúa y en el perfil 5 se incrementa la delineación de la zona roja en su lado oeste definiendo la misma forma que la figura D. La contaminación sigue apreciándose en el perfil 6 a su lado oeste al igual que en la profundidad de -1.0 m. La zona limpia se muestra en una mayor área de la zona estudiada, con puntos aislados de pequeñas manchas con resistividades altas.

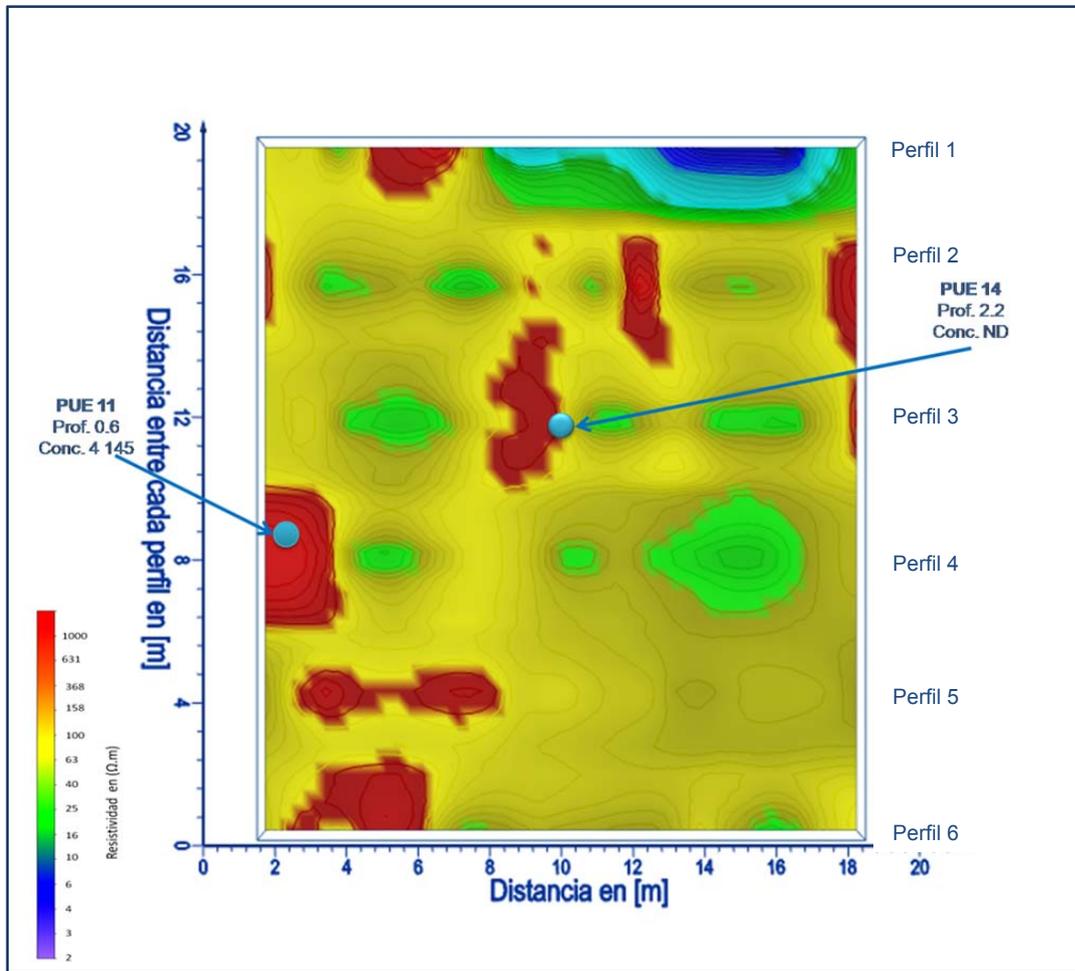


Figura E. Delineación de la contaminación en un plano X-Y a 1.5 m de profundidad (zonas rojas).

6.3 CORRELACIÓN DEL MÉTODO DIRECTO (MUESTREO) Y EL MÉTODO INDIRECTO (TOMOGRFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA) EN TRES ZONAS DIFERENTES

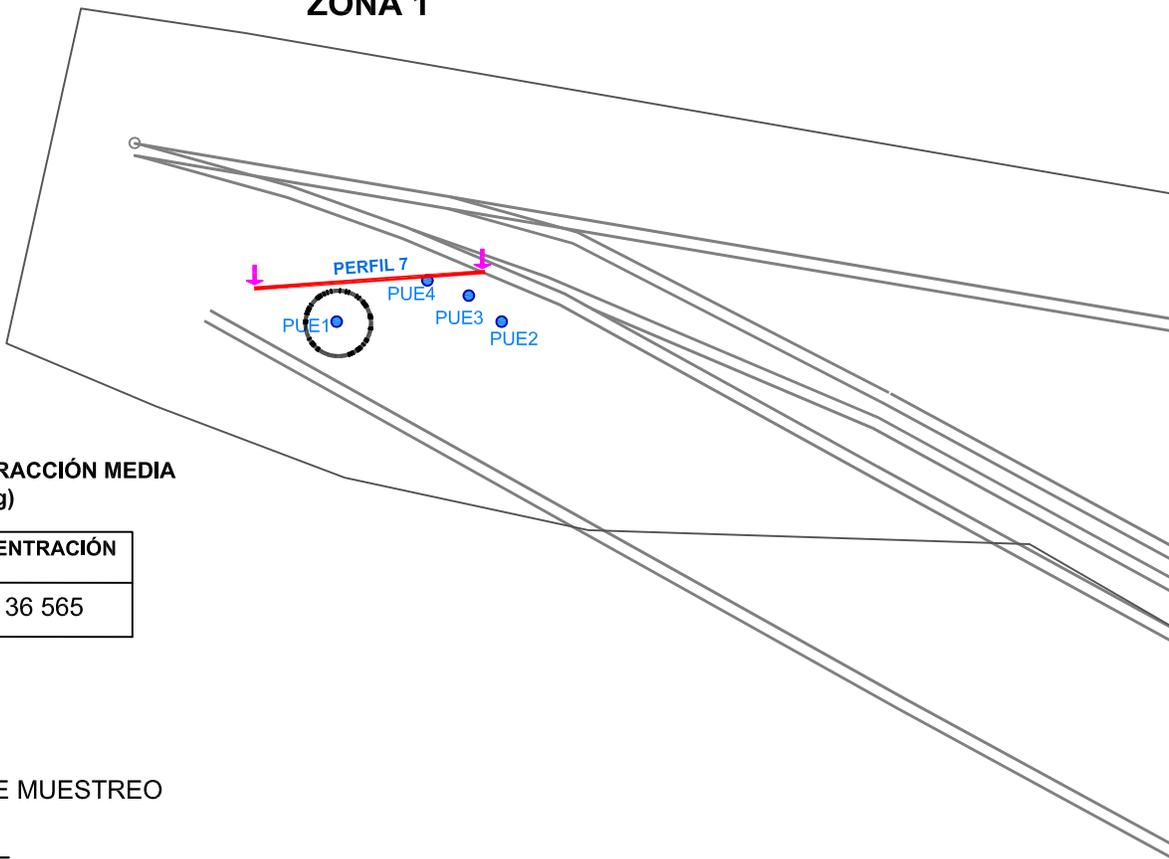
Tomando en cuenta los pocos puntos que se logran correlacionar con los perfiles de tomografía eléctrica, se identifica que el alto resistivo son zonas con una mayor problemática de contaminación, que va disminuyendo a profundidad conforme la resistividad (valores entre 600 y 1000 ohm-m).

En la figura 6.15 se muestra la zona 1, cuya esquematización fue aproximada y puntual de acuerdo con las observaciones de campo y con los resultados reportados, donde el punto PUE1 reporta una contaminación de 36,565 mg/kg a una profundidad de 1.2 m. El perfil relacionado a este punto es el 7. Donde se delinea una contaminación mas influenciada hacia el lado derecho del perfil.

En la zona 3 se esquematizan las concentraciones a dos profundidades diferentes: una de 0 a 1 m de profundidad (figura 6.16) y de 1 a 2 m (figura 6.17). En la configuración de 0-1 m se tomaron los puntos PUE10, PUE11 y PUE12; el que presenta mayor concentración es el punto PUE11 con 4 145 mg/kg, logrando correlacionar el punto con la contaminación que reporta valores de alta resistividad.



ZONA 1



HIDROCARBUROS FRACCIÓN MEDIA (mg/kg)

PUNTO	CONCENTRACIÓN
PUE1	36 565



PUNTO DE MUESTREO



PERFIL DE
TOMOGRFÍA



FIGURA 6.15

ZONA 1. CONFIGURACIÓN DEL PUNTO CONTAMINADO
PUE1 Y LA UBICACIÓN DEL PERFIL 7.



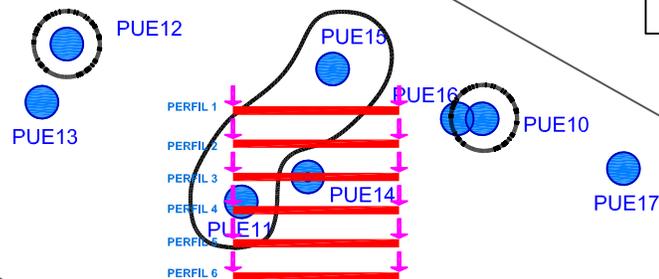
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



**HIDROCARBUROS FRACCIÓN MEDIA
(mg/kg)**

PUNTO	CONCENTRACION
PUE10	579
PUE11	4145
PUE12	727
PUE15	*

ZONA 3



 PUNTO DE MUESTREO

 PERFIL DE TOMOGRAFÍA

ESCALA GRÁFICA

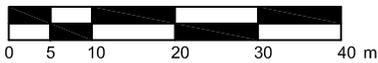


FIGURA 6.16

ZONA 3. CONFIGURACIÓN DE LOS PUNTOS CONTAMINADOS ENTRE LA SUPERFICIE Y 1 m DE PROFUNDIDAD, UBICACIÓN DE LOS PERFILES DE TOMOGRAFÍA



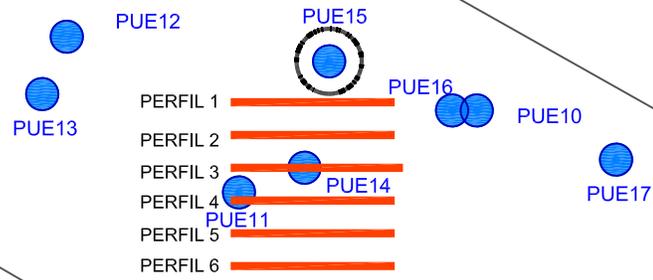
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**



HIDROCARBUROS FRACCIÓN MEDIA
(mg/kg)

PUNTO	CONCENTRACION
PUE15	7227

ZONA 3



 PUNTO DE MUESTREO

 PERFIL DE TOMOGRAFÍA

ESCALA GRÁFICA

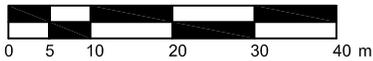


FIGURA 6.17

ZONA 3. CONFIGURACIÓN DE LOS PUNTOS CONTAMINADOS ENTRE 1 m Y 2 m DE PROFUNDIDAD, UBICACIÓN DE LOS PERFILES DE TOMOGRAFÍA.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

Para las concentraciones encontradas entre 1 y 2 m fueron los puntos PUE13, PUE14, PUE15, PUE16 y PUE17. La mayor concentración en esta zona la tiene el punto PUE15 con 7 227 mg/kg. Las dos configuraciones abarcan parte de los perfiles paralelos (Perfil1 a Perfil6).

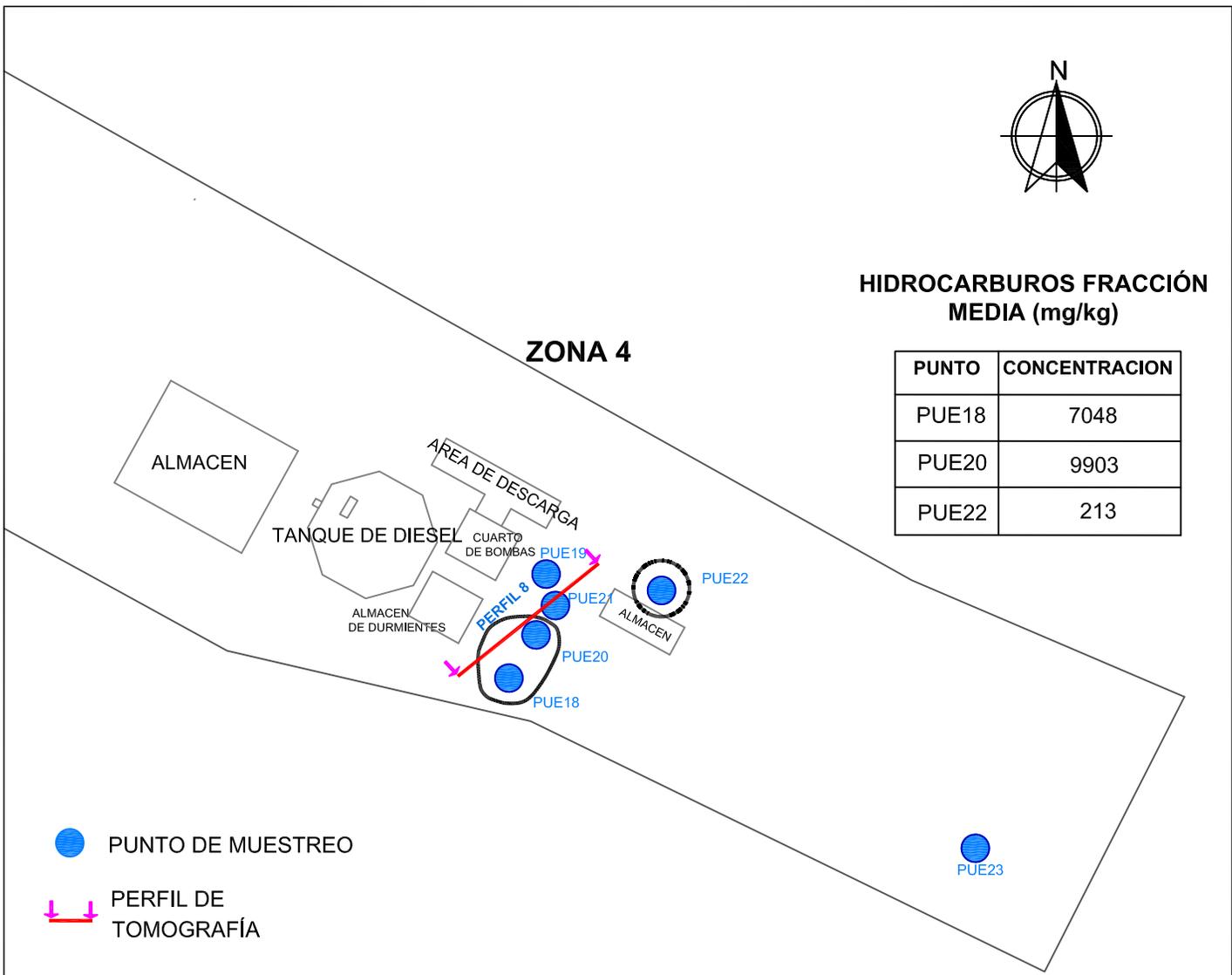
En el caso de la zona 4 también se configuraron las concentraciones a dos intervalos de profundidades: una de 0 a 1.5 m y la otra de 1.5 en adelante. En el primero se tomaron en cuenta los puntos PUE18, PUE20 y PUE22, donde el punto más contaminado es el PUE20 con una concentración de 9,903 mg/kg a una profundidad de 1.6 m (figura 6.18). Para la profundidad de 1.5 en adelante, los puntos configurados fueron PUE18 y PUE20, el punto más contaminado es el primero con 7,048 mg/kg a una profundidad de 1.3 m. El punto 18 se muestreó hasta una profundidad de 5.2 m, encontrando una concentración de 6 108 mg/kg, aunque el perfil sólo llega a una profundidad de investigación de aproximadamente 2 m (figura 6.19). El perfil que se correlaciona con esta zona es el Perfil 8, que pasa sobre el punto reportado más contaminado (PUE18).



HIDROCARBUROS FRACCIÓN MEDIA (mg/kg)

PUNTO	CONCENTRACION
PUE18	7048
PUE20	9903
PUE22	213

ZONA 4



-  PUNTO DE MUESTREO
-  PERFIL DE TOMOGRAFÍA

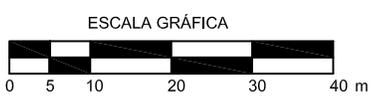


FIGURA 6.18

ZONA 4. CONFIGURACIÓN DE LOS PUNTOS CONTAMINADOS ENTRE LA SUPERFICIE Y 1.5 m DE PROFUNDIDAD. UBICACIÓN DE LOS PERFILES DE TOMOGRAFÍA.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



HIDROCARBUROS FRACCIÓN MEDIA (mg/kg)

PUNTO	CONCENTRACION
PUE18	7048
PUE20	1814

ZONA 4



-  PUNTO DE MUESTREO
-  PERFIL DE TOMOGRAFÍA

ESCALA GRÁFICA

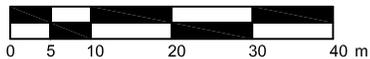


FIGURA 6.19

ZONA 4. CONFIGURACION DE LOS PUNTOS CONTAMINADOS DE 1.5 m DE PROFUNDIDAD EN ADELANTE. UBICACION DE LOS PERFILES DE TOMOGRAFIA.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

6.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Dentro de la zona donde se llevaron a cabo los perfiles se tienen pocos puntos contaminados con los que se puede hacer una correlación. En los perfiles del 1 al 6, correspondiente a la zona 3, solamente se tiene a los puntos PUE15 y PUE 11 con alta concentración de hidrocarburos. En el caso del perfil 7 en la zona 1, únicamente el punto PUE1 tiene concentración de hidrocarburos; y por último, en el perfil 8 de la zona 4, se cuenta con los puntos PUE18 y PUE20.

Las características del medio de la zona 3 donde se realizaron los perfiles del 1 al 6, se tiene un suelo de relleno que fue depositado para la nivelación de las instalaciones y de acuerdo a su análisis, es un suelo arenoso con contenido importante de gravas y cantos rodados (Anexo).

En general, se puede decir que a partir del primer metro de profundidad se encuentran valores altos de resistividad (entre 600 y 1000 ohm-m). Este resultado se infiere de la observación de un material con un valor de entre 25 y 60 ohm-m definido como el material del terreno natural, que representan valores característicos de las arenas (Orellana, 1982), ya que se encuentra regularmente hacia la base de los perfiles y éste parece impregnado de un material externo a este (que pudiera ser el hidrocarburo).

El único punto de muestreo en el que se observó concentración de hidrocarburos y que pudiera corresponder a un alto resistivo en la zona 3, es el punto PUE11 con una concentración de 4 145 mg/kg. Esta misma resistividad se detecto en el perfil 3, pero se observó que el punto PUE14 indicó una concentración no detectada, aunque como se mencionó anteriormente pudo ser que la muestra haya caído en una zona con una presencia insignificante de contaminación no detectada en el análisis de dicha muestra.

El bajo resistivo se muestra con el color azul. Los bajos resistivos generalmente se asocian con lentes arcillosos; sin embargo, en la zona de estudio el porcentaje de arcilla es aproximadamente del 1%, por lo que el bajo resistivo no se debe a esta litología. Tal vez es debido a alguna acumulación de agua o material con contenido de fierro del mismo sitio (chatarra) enterrado o mezclado con el mismo suelo, reflejando estos valores de resistividad.

7. ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN DEL SUELO

Después de la evaluación de un sitio contaminado, donde se ha determinado que el suelo presenta concentraciones que rebasan los LMP de la norma, se debe proponer una técnica de remediación adecuada para lograr bajar las concentraciones de contaminación hasta que cumplan con lo establecido.

Se entiende por *técnicas de remediación* los procesos que se aplican a materiales contaminados para alterar su estado en forma permanente por medios químicos, físicos o biológicos. El objetivo de estos tratamientos es que los materiales contaminados disminuyan o se elimine su peligrosidad.

Para la remediación se debe tomar en cuenta lo siguiente de acuerdo a lo que establece la NOM-138-SEMARNAT/2003:

- ❖ Se debe evitar la transferencia de contaminantes al suelo limpio, al aire y al agua.
- ❖ No se deben generar mayores alteraciones ambientales que las producidas por el suceso que provocó la contaminación.
- ❖ No se debe diluir el suelo contaminado, entendiendo por ello la mezcla de suelo contaminado con suelo limpio o menos contaminado, cuando por esta acción directa se pretenda lograr concentraciones de hidrocarburos por debajo de los límites establecidos en esta Norma.
- ❖ Sólo se permite la adición de materia orgánica como co-sustrato cuando ésta sea parte de la técnica de remediación.
- ❖ Sólo se permite el uso de formulaciones químicas o de microorganismos que no alteren en detrimento las características y propiedades del ecosistema.
- ❖ No se deben utilizar microorganismos modificados a través de manipulación genética.
- ❖ Cuando la técnica de remediación utilizada modifique el pH del suelo, se debe garantizar al final de la remediación que éste sea similar al de la zona aledaña.
- ❖ Los lixiviados generados durante el tratamiento del suelo contaminado deberán manejarse conforme a la legislación vigente.
- ❖ Cuando las actividades de limpieza impliquen la construcción de obra civil o hidráulica adicional a la existente se deberá cumplir con la normatividad en materia de impacto ambiental.

- ❖ En el caso de que los niveles de fondo de hidrocarburos sean mayores a los límites máximos permisibles de contaminación establecidos de esta Norma Oficial Mexicana, los trabajos de remediación serán realizados hasta alcanzar los niveles de fondo.

7.1 PROPUESTAS DE REMEDIACIÓN

Dadas las características del suelo correspondientes a una areno-limoso, con muy bajo contenido de materia orgánica, un contenido de fósforo disponible alto y un contenido de bacterias de 1×10^4 (UFC), se considera posible aplicar una técnica de biorremediación.

7.1.1 Aplicación de posibles Técnicas

Las prácticas de biorremediación consisten en el uso de microorganismos como plantas, hongos, bacterias naturales o modificadas genéticamente para neutralizar sustancias tóxicas, transformándolas en sustancias menos tóxicas o volviéndolas inocuas para el ambiente y la salud humana (GTZ, 2000, Plaza *et al.*, 2001). Dentro de las principales técnicas de biorremediación se encuentran la biolabranza y las biopilas.

Biolabranza

La biolabranza (llamada también cultivo de la tierra) consiste en esparcir los suelos contaminados excavados en una capa delgada sobre una superficie impermeable, estimulando la actividad microbiana mediante aireación y adición de nutrientes y humedad. El sistema lleva implícito un colector de lixiviados. Sobre la superficie impermeable puede depositarse suelo tratado y se añade suelo contaminado para reiniciar el proceso. Periódicamente se voltea o “labra” la tierra esparcida para estimular la actividad degradativa de las poblaciones indígenas (Trejo, 1997; Orozco *et al.*, 2004). Los procesos degradativos que ocurren durante la biolabranza son principalmente biológicos (Nápoles *et al.*).

El objetivo, al igual que en las biopilas, es la mineralización de los hidrocarburos en CO_2 y agua mediante la estimulación de los microorganismos que los degradan. La ventaja de la biolabranza comparada con las biopilas consiste en un costo menor y la desventaja es que requiere una gran área.



Figura 7.1 Representación esquemática de biolabranza (Nápoles *et al.*)

El cultivo de la tierra es muy útil en la degradación de hidrocarburos pesados del petróleo (diesel, *fuel, oil*) y policíclicos aromáticos (HPAs), efectivo en el tratamiento de sedimentos contaminados con pentaclorofenoles (PCP), creosota y carbón (Mueller*et al.*, 1991).

Las principales ventajas que se logran aplicando la biolabranza son: los contaminantes se destruyen en vez de pasar a otra condición; la aplicación del tratamiento es muy sencilla; el saneamiento del suelo se lleva a cabo en un período entre 3 y 6 meses, dependiendo de las condiciones climáticas, la concentración de hidrocarburos y del tipo de suelo; el suelo saneado se coloca nuevamente en su sitio y el costo es más competitivo con respecto a otras técnicas de saneamiento de suelos.

Las limitaciones que tiene la biolabranza en el tratamiento de suelos contaminados son que requiere de grandes emplazamientos para su aplicación y algunas condiciones que afectan la degradación biológica de los contaminantes (temperatura y lluvia) son incontrolables, incrementando el tiempo en que se efectúa la biorremediación.

Biopilas

La técnica de biopilas se basa en la formación de pilas no mayores de 2 metros de altura de material biodegradable, formadas por suelo contaminado y materia orgánica que propicien condiciones favorables para el desarrollo de procesos de biodegradación de los contaminantes. Estas pilas pueden ser aireadas de forma activa (biopilas dinámicas), volteando la pila, o de forma pasiva (biopilas estáticas) mediante tubos perforados de aireación. Se estimula la actividad microbiana por adición de nutrientes y humedad (Trejo, 1997; Jorgensen*et al.*, 2000).

La materia orgánica en la biopila mejora la estructura del suelo y favorece el proceso de biodegradación al actuar como co-sustrato. El sistema de biopilas alargadas es más económico y sencillo, el material se apila sobre una plataforma en montones alargados (Figura 7.2) y la aireación se realiza mediante el mezclado manual o mecánico, proceso que a su vez permite homogeneizar la temperatura. El mezclado de la pila proporciona una mayor distribución y facilita la biodegradación de los contaminantes, ya que permite la homogenización de estos, los nutrientes, el agua, el aire y los microorganismos (Nápoles *et al.*).

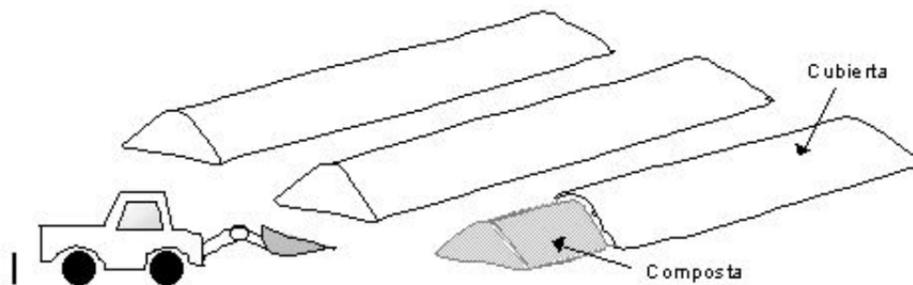


Figura 7.2 Representación esquemática de un sistema de biopilas alargadas (Nápoles *et al.*)

A diferencia de las anteriores, las biopilas estáticas no necesitan mezclarse mecánicamente, ya que la aireación y homogeneización del calor se lleva a cabo por medio de un sistema de inyección (compresor) o extracción (vacío) de aire mediante tubos colocados en la base, alineados paralelamente a lo largo de la pila (Figura 7.3). En las biopilas estáticas normalmente se emplea un sistema de extracción de aire, ya que ello permite la eliminación de los vapores de cierta fracción de compuestos orgánicos volátiles que llegan a ser removidos del suelo contaminado durante el proceso de aireación. Estos vapores son enviados a un sistema de biofiltración u oxidación catalítica para su tratamiento.

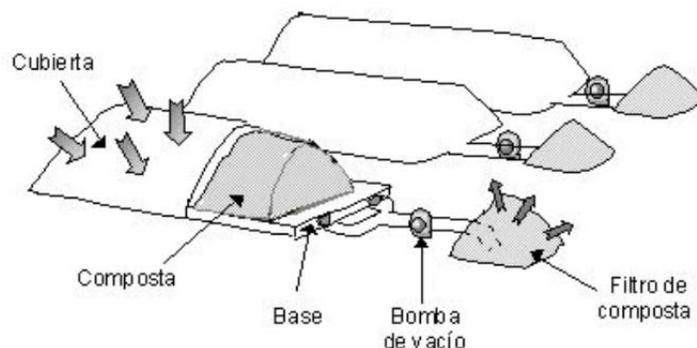


Figura 7.3 Representación esquemática de un sistema de biopilas estáticas (Nápoles *et al.*)

Uno de los principales problemas de la biodegradación es que, en presencia de altas concentraciones de contaminante en el suelo, pueden existir efectos de toxicidad sobre la población microbiana. Otro es la insuficiencia de nutrientes en el suelo; sin embargo, la presencia de cantidades mínimas de nitrógeno y fósforo mejoran la posibilidad de biodegradación en el suelo.

Los factores ambientales que afectan la actividad microbiana y por lo tanto la biodegradación son el contenido de agua, la temperatura, los nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo), los aceptores de electrones (oxígeno, nitrato, sulfato), el pH, la presencia de metales pesados y el tipo y cantidad de material orgánico presente (carbono).

La degradación depende principalmente de la actividad de los microorganismos aerobios, por lo que se requiere un suministro adecuado de oxígeno al suelo. Aproximadamente se requieren de 2 a 3 kg de oxígeno por kg de hidrocarburos para asegurar una buena degradación. Cuando los poros del suelo se encuentran ocupados por moléculas de agua, la difusión del oxígeno es menor y se pueden presentar condiciones anóxicas. Para tener una degradación aerobia es necesario tener aproximadamente 10% de poros libres en la matriz del suelo. (López e Iturbe, 2008).

Algunas consideraciones para definir si la degradación es factible son las siguientes:

- ❖ Los hidrocarburos alifáticos son más fáciles de degradar que los compuestos aromáticos.
- ❖ Los hidrocarburos alifáticos de cadena recta son más fáciles de degradar que los que tienen radicales, ya que el radical impide la biodegradación.

- ❖ Los hidrocarburos saturados son más fáciles de degradar que los insaturados. La presencia del doble o triple enlace dificulta la degradación.
- ❖ Las cadenas largas de hidrocarburos son más fáciles de degradar que las cortas. Los hidrocarburos con menos de nueve carbonos son difíciles de degradar ya que son tóxicos; el contenido óptimo de carbonos en la cadena para degradar es de 10 a 20.

La efectividad de la biopila depende de los siguientes factores (Fahnestock, F.M., 1998):

- ❖ Características del suelo.
- ❖ Características de los contaminantes.
- ❖ Condiciones climatológicas.

Muchos contaminantes orgánicos son removidos satisfactoriamente utilizando biopilas, entre ellos encontramos plaguicidas, hidrocarburos aromáticos halogenados e hidrocarburos del petróleo. Este tratamiento se puede utilizar tanto a escala piloto como a escala de campo, especialmente para hidrocarburos del petróleo (Samsonet *al.*, 1994; Koning y col., 1998) e hidrocarburos poliaromáticos (Porta y col., 1994).

En el caso de las biopilas, las ventajas son: los contaminantes se destruyen en vez de pasar a otra condición, el diseño y construcción son relativamente fáciles, el saneamiento del suelo se lleva a cabo en un período de entre 3 y 6 meses, dependiendo de las condiciones climáticas, la concentración de hidrocarburos y del tipo de suelo; el suelo saneado mediante biopilas no requiere ser confinado después y el costo es más competitivo con respecto a otras técnicas de saneamiento de suelos.

Los siguientes inconvenientes o limitaciones de este tratamiento son: se requiere de la excavación del suelo contaminado, las pruebas de tratabilidad deben ser aplicadas para determinar la biodegradabilidad de los contaminantes así como la oxigenación y nutrientes apropiados y la presencia de metales pesados puede inhibir el crecimiento de microorganismos.

7.2 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

Los siguientes criterios se seleccionaron de acuerdo a Fahnestock (1998).

- ❖ Establecer la extensión del suelo contaminado (volumen y datos del sitio).
- ❖ HTP < 50.000 ppm.
- ❖ Bacterias heterótrofas >1 000 UFC/g en suelo seco.
- ❖ pH entre 6 y 9.
- ❖ Contenido de agua entre 70 y 95% de la capacidad de campo.
- ❖ Bajo contenido de arcilla y/o limo.
- ❖ C:N:P:K debe ser aproximadamente de 100:15:1:1.
- ❖ Metales tóxicos <2 500 mg/kg.

7.3 RECOMENDACIONES DE LA TÉCNICA DE REMEDIACIÓN MÁS ADECUADA

Analizando los resultados del muestreo directo del suelo y tomando en cuenta el volumen a remediar (1 300 m³), la técnica recomendada es la de biolabranza, haciendo una excavación desde la superficie y hasta los 3.0 m de profundidad en la Zona 1, 2 y 3; en la Zona 4 (área de los tanques elevados PUE18) a partir de la superficie y hasta los 6.0 m de profundidad. La técnica de biolabranza se considera adecuada debido a la extensión de terreno libre para efectuar la remediación, ya que se cuenta con suficiente espacio.

Se propone extender los 1 300 m³ de material en un área tal que se mezcle una capa de suelo de aproximadamente 0.80 m de espesor con la adición de nutrientes y agua requeridos. Se estima que con esta aplicación el suelo puede quedar saneado en el término de 4 a 6 meses, con un costo aproximado de \$250.00/m³/mes (Martin y Bardos, 1996). Es decir, para cuatro meses de tratamiento el costo total sería de aproximadamente \$ 1,300,000.00 (un millón trescientos mil pesos^{00/100} M.N.).

Para el área de la zona 3 dónde se realizaron los seis perfiles de tomografía de resistividad eléctrica, se calculó el volumen de suelo contaminado tomando en cuenta el área mayor de afectación de las tres profundidades mapeadas en el software Voxler y multiplicando por un espesor de tres metros de profundidad, dando un total de 289 m³ aproximadamente. Sin embargo, esto no nos dice si rebasa los límites máximos permisibles de la NOM-138-SEMARNAT/2003 para uso de suelo industrial.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Para la caracterización del suelo contaminado en nuestra área de estudio por el método de muestreo asistido, se obtuvo que de las 42 muestras de suelo analizadas nueve son las que sobrepasan los LMP de HFM establecidos en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003; para el caso de los HAPs ninguna muestra excede los valores establecidos.

Como se observó en las imágenes del área afectada y las configuraciones realizadas con la ayuda del muestreo, se puede decir que la contaminación es puntual en algunas áreas. No se aprecia una migración del contaminante a mayores profundidades ni extensión en el área, a excepción del punto PUE18, en el que se detectó contaminación hasta una profundidad de 6.0 m.

El volumen total calculado de suelo afectado que sobrepasó la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 para HFM es de 1 300 m³ de acuerdo a las zonas establecidas, la distribución se aprecia en la siguiente tabla:

ZONAS	ÁREA m ²	VOLUMEN m ³
1	85	256
2	42	127
3	64	189
4	310	726
TOTAL	501	1 300

Los datos obtenidos con la técnica de tomografía de resistividad eléctrica 2D, indican que la contaminación es también puntual; sin embargo, la configuración de los datos de manera tridimensional con ayuda del software Voxler logró delinear un flujo y/o tendencia de la migración del contaminante (para la zona 3), a diferencia del muestreo directo que es puntual.

Con la tomografía de resistividad eléctrica 2D se delinearón zonas que pudieran contener una mayor concentración del contaminante o zonas limpias; logrando así, demostrar que la técnica es de gran utilidad para proponer puntos de muestreo directo que identifiquen la

presencia del contaminante en un área tanto lateralmente como a profundidad. En las imágenes bidimensionales se logró visualizar el corte de cómo se comportaba el contaminante, aunque la visualización tridimensional tiene una mejor resolución de cómo y hasta donde podría extenderse dicha contaminación.

Los puntos de muestreo que se lograron correlacionar con las zonas que obtuvieron valores altos de resistividad son los siguientes: el punto PUE11 localizado en el perfil 4 (zona 3) con una concentración de 4 145 mg/kg; este punto en las imágenes eléctricas de los planos X-Y a diferentes profundidades, la contaminación siempre fue visible. En la zona 1, donde se realizó el perfil 7, solamente el punto PUE1 registró concentración superior a la de la norma, su concentración es de 36 545 mg/kg. En este sitio se muestra una posible mancha del contaminante que va desde la superficie hasta un metro de profundidad; la mancha desaparece casi en su totalidad después de una de 1.5 metros; esto se observa en la imagen eléctrica 2D. Por último, en la zona 4, el punto PUE18 reportó un valor de concentración de hidrocarburo de 7 048 mg/kg a una profundidad de 1.3 m; sin embargo, en el perfil 8 sólo se aprecian valores altos de resistividad hasta una profundidad de medio metro, ya que se pierde información a mayor profundidad, esto se puede deber a la inversión de los datos.

De las observaciones del método de tomografía de resistividad eléctrica, se concluye que la contaminación presenta valores de entre 600 y 1 000 ohm.m en los perfiles interpretados, posiblemente puede corresponder a una contaminación por hidrocarburos. Las zonas limpias y/o el material del terreno se identifican con valores entre 25 y 40 ohm-m. En el caso de las resistividades entre 16 y 40 ohm-m corresponden a material de relleno.

La configuración tridimensional que se realizó en la zona 3, muestra que la contaminación por hidrocarburos empieza a disminuir a partir de una profundidad de metro y medio aproximadamente.

Las técnicas de remediación que se proponen de acuerdo al análisis son dos: la biolabranza y las biopilas por razones técnicas y económicas.

RECOMENDACIONES

Uno de los factores que no se cumplieron y que pudieran ser de ayuda para la aplicación combinada de ambos métodos, logrando la mejor interpretación y aprovechamiento de estas técnicas, es el realizar un intenso reconocimiento previo de las condiciones del área afectada para la aplicación del método geofísico antes del muestreo, para poder así delimitar el área afectada y proponer un número de muestras necesarias que abarquen dicha zona. Con ello disminuir el costo de la caracterización del sitio así como los tiempos.

Se recomienda también realizar 3 o 4 perfiles perpendiculares a los 6 horizontales, para una mejor delineación en el plano X-Y de la pluma contaminante. Definiendo con mayor certeza, la dirección de dicha contaminación y su extensión.

Realizar perfiles más largos y a una mayor profundidad de investigación, para abarcar un área de extensión más amplia, que de una mejor visión del comportamiento de la pluma contaminante.

Continuar con el estudio y la correlación en conjunto de estas dos técnicas (muestreo y tomografía de resistividad eléctrica), para lograr que los métodos indirectos tengan parámetros (dependiendo del tipo de suelo, contaminante, grado de contaminación, etc.) que puedan ser implementados en las normas de caracterización de sitios contaminados, de forma que no sean solo como una opción a la aplicación de estas.

BIBLIOGRAFÍA

Aracil Ávila Enrique, Porres Benito José Ángel, Espinosa González, Ana Belén, Maruri Brouard, Unai Vallés Iriso Javier, García Castillo, Luis Ibáñez García. Aplicación de La Tomografía Eléctrica Para la Caracterización de un Deslizamiento de Ladera En Un Vertedero. VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables Valencia, 2005.

Atekwana Estrella A. Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of Applied Geophysics* 44 2000. 2000, 167–180.

Beltrán-Paz, O. y Vela-Correa, G. (2009). Suelos contaminados con hidrocarburos y su efecto en la formación de agregados del suelo en La Venta, Tabasco. http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Extenso/CA/EC/CAC-03.pdf

Biorremediación como una solución ecológicamente compatible. Cooperación Técnica Alemana (GTZ). 2000. En: www.gtz.org.mx/sitios-contam/articulos/biorremed_Mex2.pdf.

Bojes, Heide y Pope, Peter (2007). Characterization of EPA's 16 priority pollutant polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in tank bottom solids and associated contaminated soils at oil exploration and production sites in Texas. *Revista Regulatory Toxicology and Pharmacology* 47, 288-295.

Chappin, R. G., L. R. Summerlin. 1988. Química. Publicaciones Cultural. México.
Trejo, M. 1997. Biorremediation principles. Mc Graw – Hill, Boston

De la Cruz Gómez Rosalba. Contaminación de suelos con hidrocarburos derramados en la Ciudad de México y sus alrededores de 1996 al 2000 y propuestas de restauración. Química, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. 2002. Tesis.

Delgado R. Omar, Shevnin Vladimir, Ochoa V. Jesús y Ryjov Albert (2006). Geoelectrical characterization of a site with hydrocarbon contamination caused by pipeline leakage. *Geofísica Internacional*. Vol. 45, Num. 1.

Deyta Teco Ana Laura. 1999, Caracterización de dos suelos contaminados con gasolinas y evaluación de su capacidad degradadora de hidrocarburos monoaromáticos. México DF. Instituto de Ingeniería UNAM. (Tesis de Maestría).

Díaz Irving, Mojica, Alexis Ho Carlos. Monitoreo de los niveles de humedad de los suelos basado en métodos Electro-resistivos: Caso de la zona de Gamboa Canal de Panama.

Díaz Rengifo, Juan A, Desarrollo de un sistema integrado para la monitorización in situ de metales pesados. Barcelona, 2001. Tesis.

Edwards, L.S., A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, 1977:1020-1036.

Environmental Protection Agency (2000). *Innovations in Site Characterization: Geophysical Investigation at Hazardous Waste Sites*.

Fahnestock von, F.M. (1998). *Biopile Design, Operation and Maintenance Handbook for Trating Hydrocarbon- Contaminates Soils*. Battelle Press. W. Menke. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press. New York, 1989.

Ferrera-Cerrato, R., Rojas-Avelizapa, NG., Poggi-Varaldo, HM., Alarcón, A. y Cañizares-Villanueva, RO (2006). *Revista Latinoamericana Microbiología*. Vol. 48, No. 2. Pp. 179-187.

Figuroa, Y. y Ávila, MA. (2006). Destilación simulada como una alternativa de caracterización de suelos contaminados con hidrocarburos. *Memorias del Simposio de Metrología*. Querétaro, Qro.

Gasulla Forner Manel (1999). Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica en el subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Universidad Politécnica de Catalunya, Depto. De Ingeniería electrónica.

Gutiérrez, E. M. 1990. *Los Residuos Sólidos Peligrosos: ¿ Un Riesgo sin Solución?* . Ciencias. No. 20 UNAM.

Hernández Márquez Juan O., Rodríguez Villuendas Arturo. Aplicación de métodos geoelectricos para el diagnostico de un sitio urbano contaminado por hidrocarburos. México D.F., 2008

Hernández-Acosta, E., Gutiérrez-Castorena, MC., Rubiños-Panta, JE y Alvarado-López, J. (2006). Caracterización del suelo y plantas de un sitio contaminado con hidrocarburos. *Terra Latinoamericana*, Vol. 24, Núm. 4, pp. 463-470.

Iturbe R, Flores C., Chavez C., y Roldan A. (2002). Saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos mediante bio-pilas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. Vol. III, No. 1.

Iturbe Rosario Argüelles, Castro Alejandrina Flores R. Carlos y Torres G. Luis. Sub-soil contamination due to oil spills in six oil-pipeline pumping stations in northern Mexico. Instituto de Ingeniería, UNAM. Grupo saneamiento de suelos y acuíferos: Coordinación de Ingeniería Ambiental, 2007.

Iturbe Rosario Argüelles, Flores Rosa M., Flores R. Carlos y Torres G. Luis. TPH-Contaminated mexican refinery soil: health risk assessment and the first year of changes. Instituto de Ingeniería, UNAM. Coordinación de Ingeniería Ambiental 2003.

Jorgensen, K.; Puustinen, J.; Sourtti, A. 2000. Bioremediation of petroleum hydrocarbon – contaminated soil by composting in biopiles. *Environ. Pol.* 107:245 – 254

Koning, M. ; Hupe, K.; Lüth, J-C.; Cohrs, I.; Quandt, C. y Stegmann, R. 1998. Comparative investigations into the biological degradation of contaminants in fixed- bed and slurry reactors. En: *Contaminated soil*.1998. Thomas Telford, London. Pp 531- 538.

Loke M. H. (2001). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D survey.*

Lokenot M.H. (2003). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. Journal of Applied Geophysics.*

Lopes de Castro David. 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history. *Journal of Applied Geophysics* 54 (2003) 127– 144.

López O., Jessica, Iturbe A., Rosario. “Remediation of a site contaminated with heavy fraction.hidrocarbons using biopiles”.Presentación de poster en Congreso de Viena, Eurosoil Soil-Society-Environment. Agosto 2008.

Madrid Miguel et. Al. Caracterización de fosas petroleras y sitios contaminados por crudo a través de métodos geofísicos y sensores geoquímicos in situ. XI congreso venezolano de geofísica. Noviembre de 2002. Caracas, Venezuela.

Madrigal Monárrez Ismael 1998. Alternativas de tratamiento para la rehabilitación de sitios contaminados con hidrocarburos en México. México DF febrero 1998. Instituto de Ingeniería UNAM (Tesis de maestría ambiental).

Manilla-Perez,, Efraín, Poggi-Varaldo, Héctor M y Chavez-Gomez, Benjamín. Evaluación del funcionamiento de un tambor rotatorio aplicado a la biorremediación de un suelo contaminado con hidrocarburos. *INCI*, sep. 2004, vol.29, no.9, p.515-520. ISSN 0378-1844.

Mattney G. Cole. 1994 Assessment and remediation of petroleum contaminated sites. Lewis Publishers, USA.

McGillivray, P.R. and Oldenburg, D.W., Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem: A comparative study. *Geophysical Prospecting*, 38, 1990, 499-524.

Mueller, J.; Lantz, S.; Blatt Mann, B.; Cahpman, P. 1991. Bench – scale evolution of alternative biological treatment processes for the remediation of PCPs and creosote – contaminated materials: slurry phase bioremediation. *Environ.*

Nápoles Álvarez MSc. Janet, Dra. Rodríguez Arelis Ábalos. Biorremediación de Ecosistemas Contaminados con Xenobióticos. Universidad de Oriente. Facultad De Ciencias Naturales.Centro De Estudios De Biotecnología Industrial.

Orellana E., 1972. Prospección Geoeléctrica en corriente continua. Editorial Paraninfo, segunda edición, España.

Orozco, C.; Pérez, A.; González, M. N.; Rodríguez, F.; Alfayate, J. M. 2004. Contaminación ambiental: una visión desde la química. Primera edición. Thomson. Madrid. España

Ortiz Salinas Rutilio, 1998 "Migración de hidrocarburos en suelos orgánicos cercanos a sitios de explotación petrolera en el distrito de agua dulce, Tabasco" México D.F. Facultad de ciencias.

Padilla, R. M. Y. 1989. Determinación de los Niveles de Hidrocarburos en Sedimentos Recientes del Río Calzadas en la Región del Bajo Río Coatzacoalcos, Veracruz. México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM.

Pellerin Louise (2001). Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations. University of Utah, Energy and Geoscience Institute.

PEMEX. 1988. El Petróleo. Gerencia de Información y Relaciones Públicas. México www.pemex.gob.mx.

Plaza G, Otero M, Torres N, Velásquez M, Corbalan E, Rodríguez T. Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente.2001;5: 163-167.

Porta, J.; López-Acevedo, M. y Roquero, C. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi- Prensa. Madrid. pp 807.

Quadri, T. G. 1994. Industria y Política Ambiental. El Nacional. Sábado 18 de Junio. México.

Rocha Jiménez María. 2000 "Evaluación de la contaminación, criterios y alternativas de rehabilitación en los talleres de ferrocarriles nacionales de México (FNM) en Aguascalientes, Ags., México". Facultad de Ingeniería.

Samson, R.; Greer, C.; Hawkes, T.; Desrochers, R.; Nelson, C. y St-Cyr, M. 1994. Monitoring an aboveground bioreactor at a petroleum refinery site using radiorespirometry and genes probes: effects of winter conditions and clayey soil. En: Hinchee, R. E.; Alleman, B. C.; Hoeppe, R. E.; Miller, R. N. (eds). Hydrocarbon bioremediation. Lewis. Boca. Ratón. Fla. pp 329- 333.

Sauck William A. (2001) A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. Journal of Applied Geophysics.

Saval Bohórquez Susana, (1995). Biorremediación de suelos contaminados, en Universidad Nacional Autónoma de México/Petróleos Mexicanos. Pemex: Ambiente y Energía. Los retos del futuro. México.

SEMARNAT (2010). Plan Nacional de Remediación de Sitios Contaminados. <http://www.semarnat.gob.mx>

SEMARNAT (2010a). Guía técnica para orientar en la elaboración de estudios de caracterización de sitios contaminados. <http://www.relascmex.org/pdfs/guia-caracterizacion-pdfs/02-prologo.pdf>

SEMARNAT, 2008. Proyecto del Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas.

Shevnin Vladimir, Delgado R. Omar, Fernández L. Luis, Zegarra M. Héctor, Mousatov Aleksandr y Ryjov Albert (2005). Geoelectrical characterization of an oil-contaminated site in Tabasco, México. *Geofísica Intenacional*. Vol. 44, Num. 3.

Sistema de Administración de la Seguridad, Salud y Protección Ambiental en Petróleos Mexicanos (PEMEX-SSPA). Punta del Este Uruguay, 2009.

Stewart, R.R. 1996. *Exploration Geophysics Tomography: Fundamentals*. Course Note Series. *Volumen 3. Society of Exploration Geophysics. Tulsa OK.*

Suthersan S.S. (1997). "Remediation Engineering Design Concepts". Lewis Publishers. Washington D.C ISBN 1-56670-137-6.

Urbietta Gomez Javier, (2001). La Tomografía eléctrica en los métodos de corriente continua. UNAM. Facultad de Ingeniería.

Vázquez Garranzo, Iciar, Estudio Geoquímico De Suelos y Aguas Como Base Para Evaluar la Contaminación: Relación Roca-Suelo-Agua. Madrid, 2008. Tesis, Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Farmacia Departamento de Edafología.

Volkov, S.I., Gorbunov, A.A., and Shevnin, V.A.: 2000, Electrical properties of oil-polluted grounds laboratory measurements, in *Proceedings for the EEGS-ES 2000 Annual Meeting*, Bochum, Germany.

Consultas electrónicas

Secretaría del Medio Ambiente (2003).

<http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=26&id=168>

www.inegi.gob.mx

www.conagua.gob.mx

<http://www.profepa.gob.mx>

<http://www.cenapred.unam.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/Cap3Geotecnia.pdf>

IMP, Instituto Mexicano del Petróleo, 2009. <http://www.imp.mx/petroleo/>

Agency for toxic substances & Diseases Registry (1995).

www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs69/htm/

http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts123.html

ANEXO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL SUELO

Se realizó el análisis granulométrico de las muestras tomadas con el objetivo de conocer la distribución del tamaño de las partículas del suelo. Se utilizan dos diferentes métodos: para las partículas gruesas el método mecánico o granulometría por tamizado, para las partículas finas se utiliza el hidrómetro, basado en la Ley de Stokes.

En el sitio de estudio se tomaron muestras en dos puntos a diferentes profundidades. El punto uno se localiza cerca del punto PUE1, donde se recolectó suelo a 30, 50, 80 y 120 cm de profundidad (Figuras 1, 2 y 3). El segundo punto se localiza cerca del perfil 6, aquí solo se logró muestrear a dos profundidades: 30 y 50 cm (Figura 4 y 5).

A continuación se describe el procedimiento del análisis granulométrico con los métodos correspondientes, realizados a las cinco muestras de suelo.

❖ *Granulometría por tamizado*

Procedimiento. Se dejó secar el suelo a temperatura ambiente y se homogeneizó el total de la muestra disgregando con la mano (Figura 6), tratando de evitar romper las partículas individuales.

Posteriormente se pesa cada muestra y se coloca en los tamices ordenados de mayor a menor diámetro (1 ½, 1,3/4, ½, 4, 10, 20, 40, 60, 100 y 200), agitándolos hasta lograr que pasen los finos hasta abajo. Se toma la muestra retenida en cada tamiz y se pesan para proceder a hacer los cálculos que nos permiten obtener las fracciones gruesas, medias y finas.



Figura 1 Suelo PI-30 sin tamizar



Figura 2 Suelo PI-80 sin tamizar



Figura 3 Suelo PI-120 sin tamizar



Figura 4 Suelo PII-30 sin tamizar



Figura 5 Suelo PII-50 sin tamizar



Figura 6 Disgregación del suelo para un mejor análisis

➤ **Método del Hidrómetro**

Procedimiento. Se tomó 50 gr del suelo que pasó la malla 200, posteriormente se añadió el agente dispersante (0.04 g/ml de hexametáfosfato) y se dejó reposar por 16 horas. La solución fue vertida en probetas y se le agregó agua destilada hasta completar 1000 ml.

Para iniciar las medidas con el hidrómetro, se agitó cada una de las soluciones durante dos minutos e inmediatamente se sumergió el hidrómetro en ellas; de esta forma se tomaron las medidas correspondientes del hidrómetro y la temperatura. Con estos datos se realizaron los cálculos para conocer el porcentaje de limo y arcilla de las muestras.



Figura 7 Mezclas del análisis hidrométrico

Resultados

A continuación se muestran las tablas del análisis granulométrico obtenido por los dos métodos.

Resultados con el método de tamices

SUELO I-30			
Núm. de tamiz	Peso retenido	% Retenido	% Que pasa
1 1/2	0.00	0.00	100.00
1	0.00	0.00	100.00
3/4	8.40	0.31	99.69
1/2	26.71	0.98	98.71
4	54.58	2.00	96.71
10	129.64	4.76	91.95
20	229.50	8.43	83.52
40	483.02	17.74	65.78
60	691.80	25.40	40.38
100	505.56	18.56	21.81
200	330.57	12.14	9.68
Charola	263.48	9.68	0.00
TOTAL	2723.26	34.21817968	

SUELO I -120			
Núm. de Tamiz	Peso retenido	% Retenido	% Que pasa
1 1/2	0.00	0.00	100.00
1	0.00	0.00	100.00
3/4	0.00	0.00	100.00
1/2	0.00	0.00	100.00
4	70.06	1.81	98.19
10	260.59	6.74	91.45
20	323.00	8.35	83.09
40	411.14	10.63	72.46
60	857.25	22.17	50.29
100	488.00	12.62	37.67
200	584.26	15.11	22.56
Charola	872.26	22.56	0.00
TOTAL	3866.56	27.53843209	

SUELOII - 30			
Núm. de tamiz	Peso retenido	% Retenido	% Que pasa
1 1/2	54.33	2.49	97.51
1	141.12	6.46	91.05
3/4	95.49	4.37	86.68
1/2	213.09	9.76	76.92
4	328.94	15.07	61.85
10	230.87	10.57	51.28
20	243.09	11.13	40.14
40	288.38	13.21	26.94
60	235.34	10.78	16.16
100	126.40	5.79	10.37
200	141.14	6.46	3.91
Charola	85.27	3.91	0.00
TOTAL	2183.46	73.0633948	

SUELO II -50			
Núm. de tamiz	Peso retenido	% Retenido	% Que pasa
1 1/2	413.70	8.56	91.44
1	923.55	19.12	72.32
0.75	332.56	6.88	65.44
0.50	416.24	8.62	56.82
4	612.78	12.68	44.14
10	275.25	5.70	38.44
20	260.21	5.39	33.06
40	433.12	8.96	24.09
60	408.90	8.46	15.63
100	290.17	6.01	9.62
200	242.01	5.01	4.61
Charola	222.78	4.61	0.00
TOTAL	4831.27	75.9098539	

Resultados con el método del hidrómetro

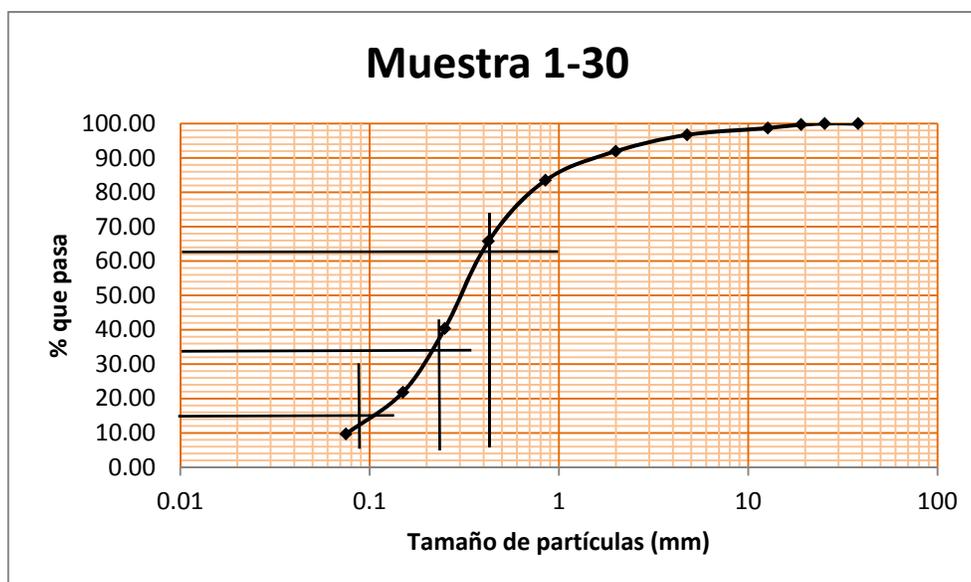
	MUESTRA DE SUELO				
	I -30	I -80	I -120	II -30	II -50
ARCILLA [%]	20.4	24.9	22.8	26.55	27
LIMO [%]	79.6	75.1	77.2	73.44	73

Análisis de los resultados

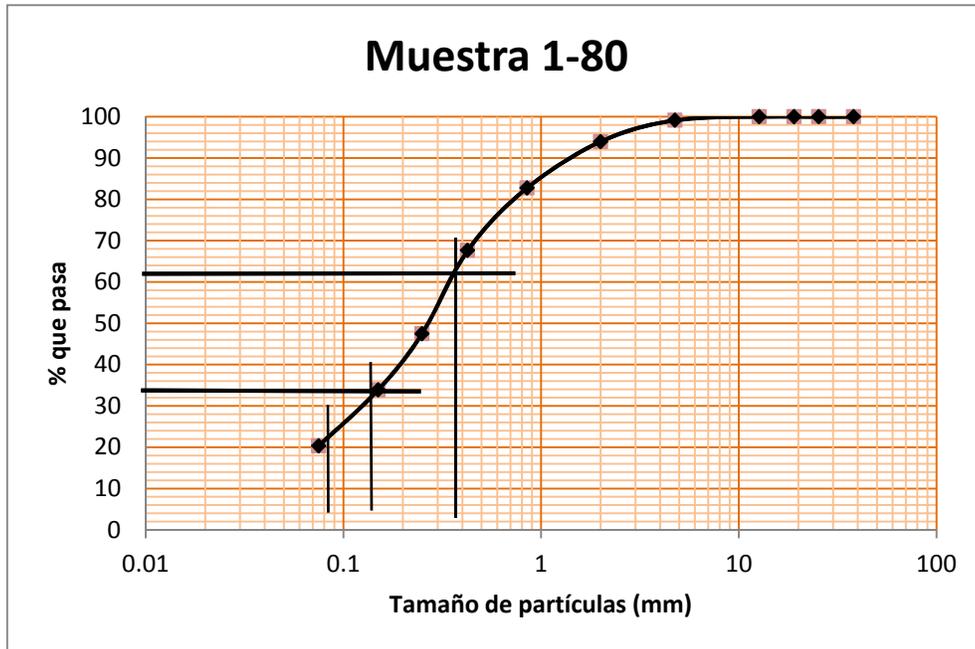
Con los datos anteriores se obtienen los resultados del análisis granulométrico del suelo, observando la predominancia de arenas y muy poco limo en general de todas las muestras (Tabla 1).

Tabla 1 Análisis de resultados de la granulometría del suelo

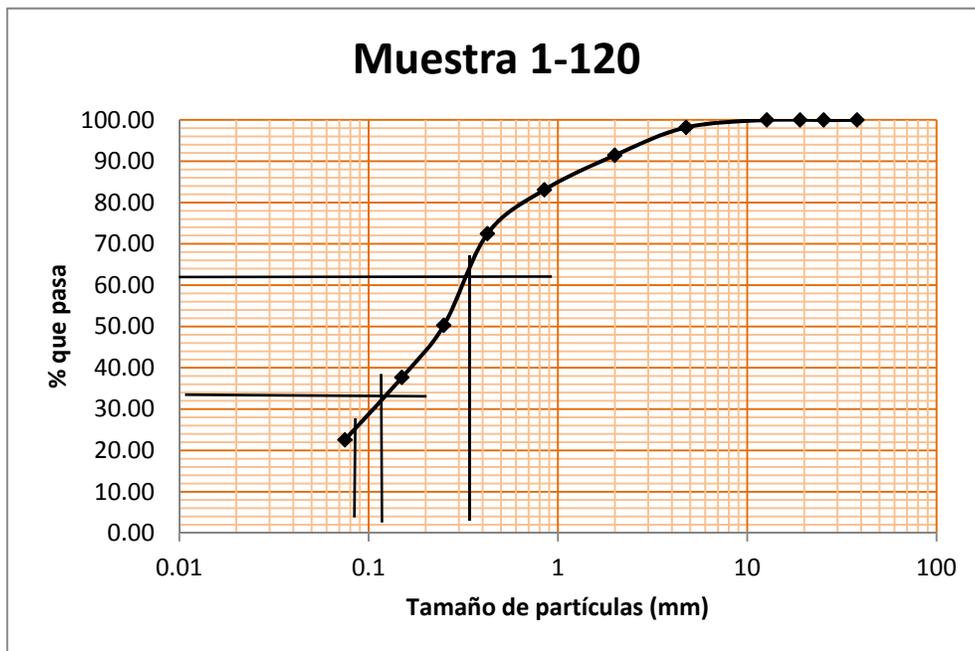
Tipo de suelo	Muestra SI-30	Muestra SI-80	Muestra SI-120	Muestra SII-30	Muestra SII-50
GRAVA [%]	No hay	No hay	No hay	23	43
ARENA [%]	89	80	77	73	52
LIMO [%]	9	15	17	3	3
ARCILLA [%]	2	5	6	1	1



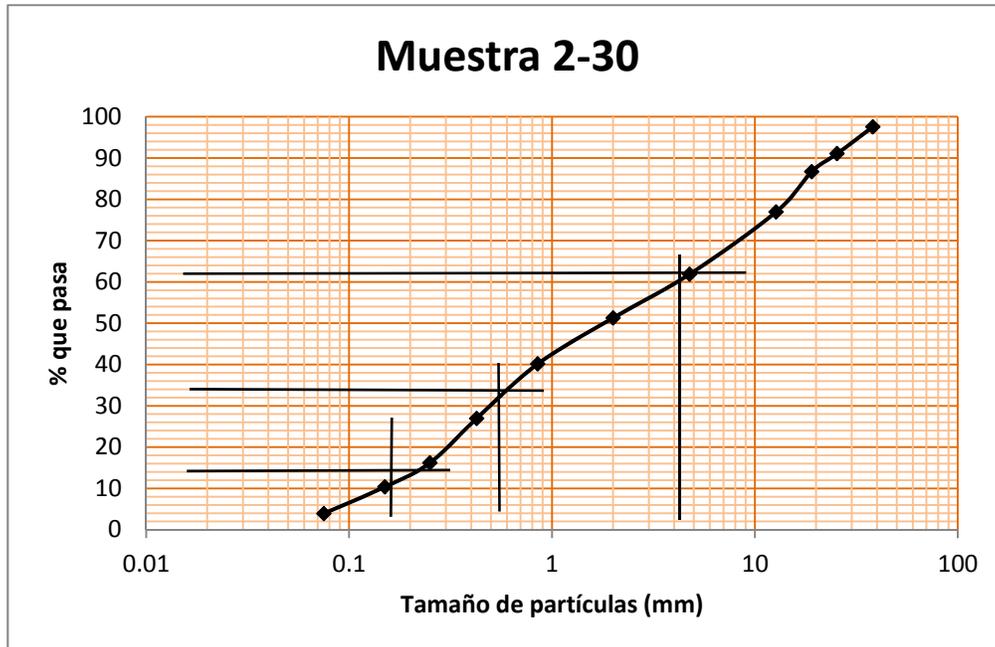
Gráfica 1 $Cu=5$, $Cc=1.37$



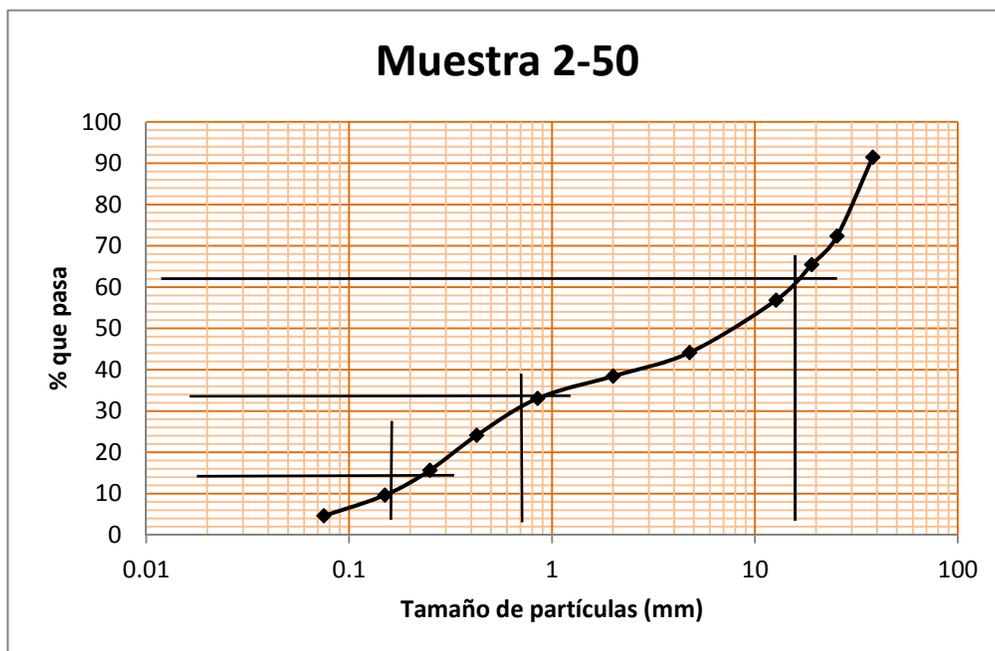
Gráfica 2 Cu=ind , Cc=ind



Gráfica 3 Cu= ind, Cc=ind



Gráfica 4 Cu=26.6, Cc=0.41



Gráfica 5 Cu= 70.6, Cc=0.26