



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

A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS

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

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

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

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

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

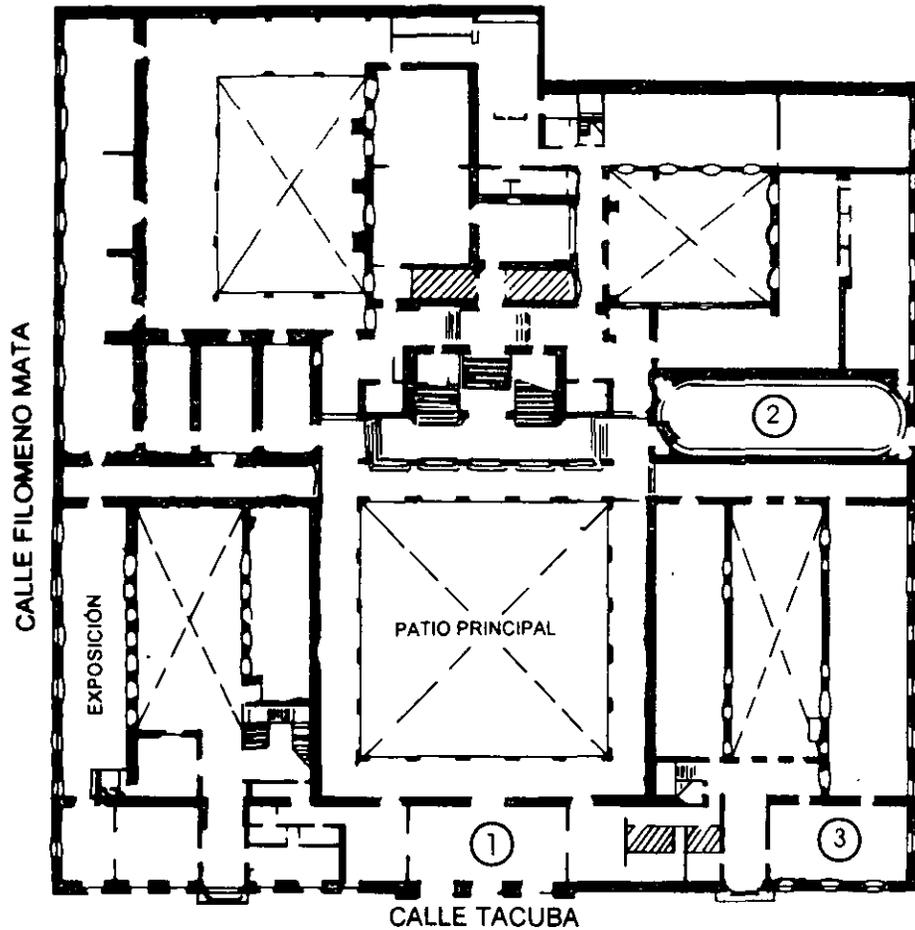
Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

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

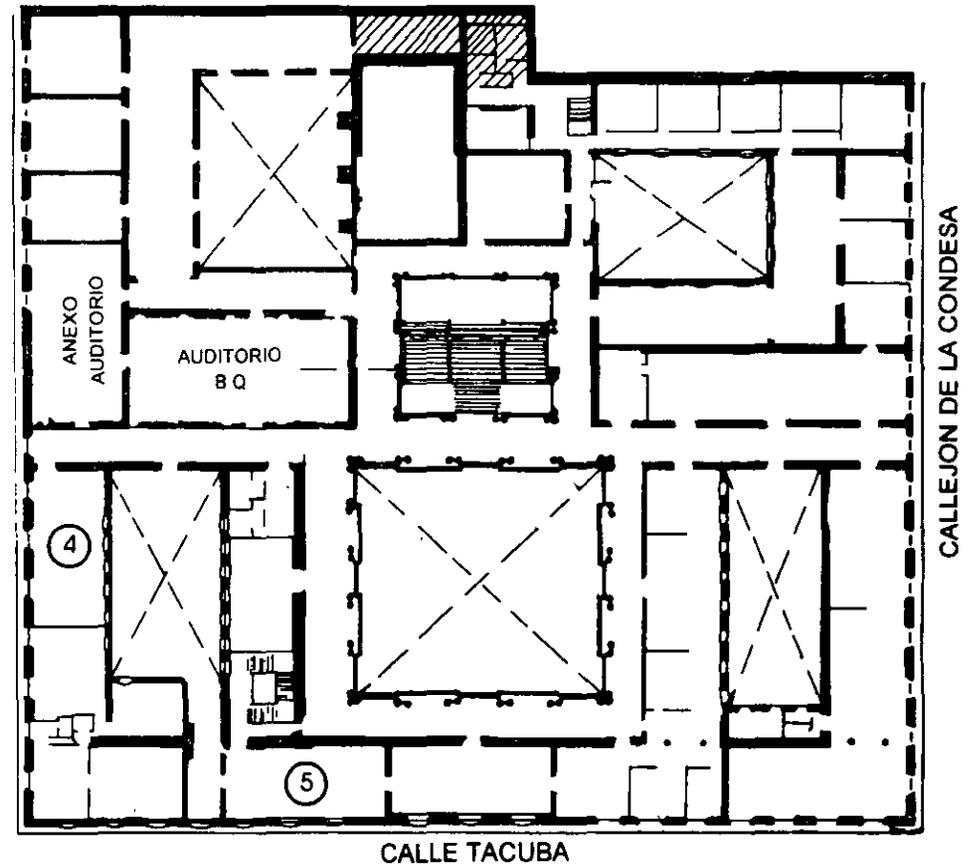
Atentamente

División de Educación Continua.

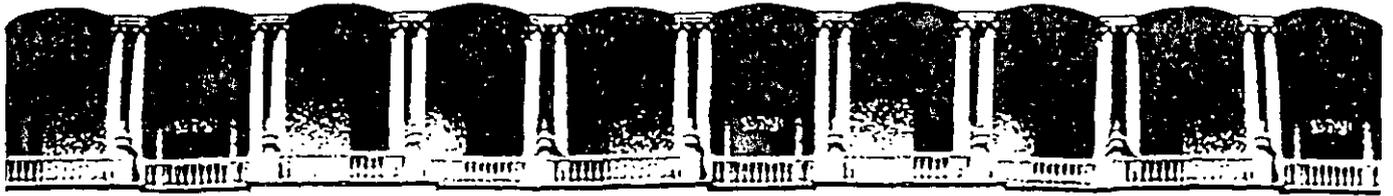
PALACIO DE MINERIA



PLANTA BAJA



MEZZANINNE



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

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

MODULO III CA 110

CASOS DE ESTUDIO, APLICACIONES PRÁCTICAS DE METODOLOGÍA DE RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

TEMA

CASOS PRÁCTICOS: EVALUACIÓN DE RIESGOS DE SALUD

**EXPOSITOR: M. EN I. MARIA ROCHA JIMÉNEZ
PALACIO DE MINERÍA
JULIO DEL 2002**

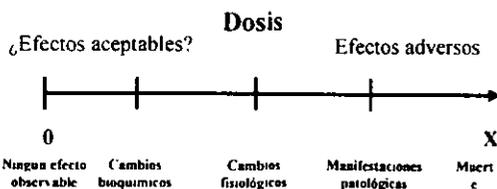
Identificación del Peligro

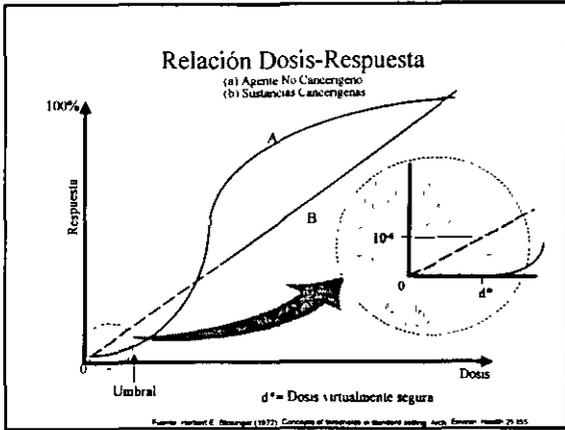
- Ubicación de la fuente de contaminación
- Determinación de la concentración de los contaminantes potencialmente tóxicos en aguas superficiales y subterráneas, suelo, sedimentos y/o aire
- Aplicación de modelos para establecer la extensión de la contaminación
- Selección de los contaminantes a considerar para su evaluación de acuerdo con su alta concentración, movilidad, persistencia y toxicidad

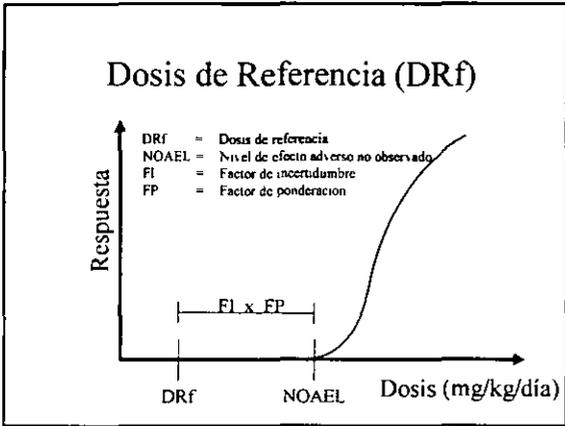
Evaluación Dosis Respuesta

- Reunir la información existente de la toxicidad de las sustancias seleccionadas en el paso anterior
- Determinar si los compuestos químicos de interés son cancerígenos o no, y con base en ello obtener los valores correspondientes de dosis de referencia y factores de pendiente de cáncer

Gradiente de Exposición y Efectos de las Sustancias Tóxicas





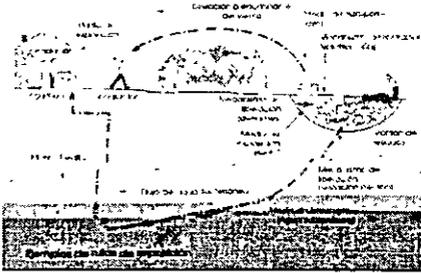


Evaluación de la Exposición

Se determinan las rutas y vías de exposición, así como las dosis estimadas que ingresan al organismo a través de estas rutas y vías.

- La ruta de exposición es el camino que sigue el contaminante desde la fuente de contaminación hasta el receptor.
- La vía de exposición es la forma o el mecanismo por el cual entra el contaminante al organismo (ingestión, inhalación o contacto dérmico).

Rutas y Vías de Exposición



Caracterización del Riesgo

Se integra la información reunida en los tres pasos anteriores para obtener un valor numérico de riesgo.

- En el caso de compuestos no cancerígenos se denomina cociente de peligrosidad (CP, o HQ por sus siglas en inglés).
- Para compuestos cancerígenos se obtiene un valor numérico de riesgo que indica la probabilidad de ocurrencia de cáncer.

Cálculo del Riesgo

- Para compuestos cancerígenos:

$$\text{Riesgo} = \text{Dosis de exposición} * \text{FPC}$$

- Para compuestos no cancerígenos

$$\text{CP (HQ)} = \text{Dosis de exposición} / \text{DRf}^*$$

FPC = factor de pendiente de cáncer (mg/kg-día) potencia cancerígena del compuesto

HQ = cociente de peligrosidad, cuando HQ>1 el riesgo es inaceptable

*DRf se expresa en mg/kg-día

Ingestión, Inhalación y Contacto Dérmico con el Suelo

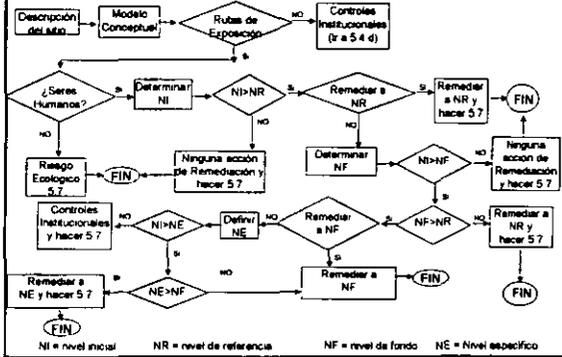
Compuestos cancerígenos

$$C = \frac{TR \times BW \times AT_c \times 365 \text{ días/año}}{EF \times ED \times \left[(SF_0 \times 10^{-6} \times (IR_s \times RAF_0 + SA \times M \times RAF_d)) + (SF_1 \times IR_{der} \times (VF + VFP)) \right]}$$

Compuestos no cancerígenos

$$C = \frac{THQ \times BW \times AT_n \times 365 \text{ días/año}}{EF \times ED \times \left[\left(10^{-6} \times \frac{IR_s \times RAF_0 + SA \times M \times RAF_d}{R(D_0)} \right) + \left(\frac{IR_{der} \times (VF + VFP)}{R(D_1)} \right) \right]}$$

Procedimiento de Evaluación de un Sitio Contaminado por Metales Pesados





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

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

MODULO III CA 110

CASOS DE ESTUDIO, APLICACIONES PRÁCTICAS DE METODOLOGÍA DE RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

TEMA

CASO TEÓRICO - PRÁCTICO

**EXPOSITOR: M. EN I. MARIA ROCHA JIMÉNEZ
PALACIO DE MINERÍA
JULIO DEL 2002**

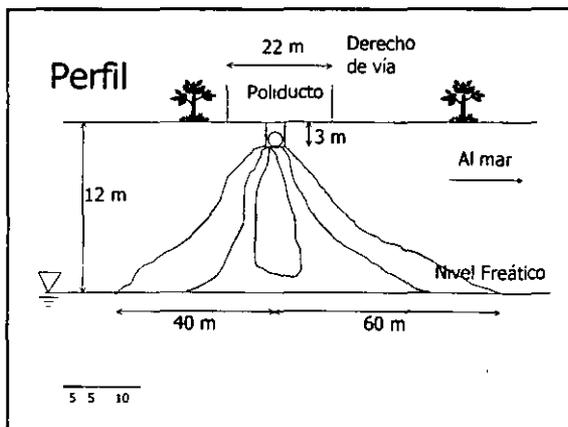
Caso Teórico Práctico

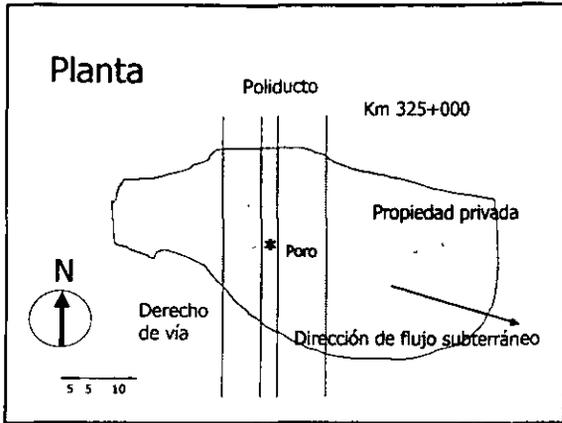


eXperTos Consultores Ambientales

Fuga en poliducto

- ◆ Volumen derramado: 20 mil barriles.
- ◆ Producto involucrado: Gasolina principalmente.
- ◆ Derecho de vía: 10 m Este, 12 m Oeste.
- ◆ Tipo de suelo: Arenoso limoso.
- ◆ Estabilidad en talud: 45°.
- ◆ Uso de suelo: espacio abierto.
- ◆ Cobertura vegetal: 80%, vigor medio, área 80%.
- ◆ Clima semidesértico: 20 mm lluvia por año, Temperatura promedio 28°C.
- ◆ Cerca de la costa de Sonora.





1. ¿Le agradó su estancia en la División de Educación Continua?

SI

NO

Si indica que "NO" diga porqué:

2 Medio a través del cual se enteró del curso.

Periódico <i>La Jornada</i>	
Folleto anual	
Folleto del curso	
Gaceta UNAM	
Revistas técnicas	
Otro medio (Indique cuál)	

3. ¿Qué cambios sugeriría al curso para mejorarlo?

4 ¿Recomendaría el curso a otra(s) persona(s) ?

SI

NO

5 ¿Que cursos sugiere que imparta la Division de Educacion Continua?

6 Otras sugerencias



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

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

MODULO III CA 110

CASOS DE ESTUDIO, APLICACIONES PRÁCTICAS DE METODOLOGÍA DE RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

TEMA

SANEAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS MEDIANTE BIOPILAS

**EXPOSITOR: DRA. ROSARIO ITURBE ARGUELLES
PALACIO DE MINERÍA
JULIO DEL 2002**



SANEAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS MEDIANTE BIOPILAS

DIPLOMADO INTERNACIONAL DE SUELOS CONTAMINADOS

**Grupo: Saneamiento de Suelos y Acuíferos
Instituto de Ingeniería, UNAM**

DRA ROSARIO ITURBE ARGUELLES

Noviembre de 2001

INTRODUCCIÓN

En México se tiene un número considerable de sitios contaminados con hidrocarburos como resultado de fugas o descargas accidentales de petróleo crudo, combustóleo, gasóleo, gasolina, diesel y turbosina, así como la disposición de recortes de perforación, lodos aceitosos y aceites lubricantes gastados, que se han producido dentro y fuera de las instalaciones productoras y almacenadoras. En muchos casos estos derrames han dañado el subsuelo y el agua subterránea y su saneamiento es complejo debido a que los contaminantes se presentan en forma de mezclas.

En general los hidrocarburos derivados del petróleo tienen menor densidad que el agua, por lo que tienden a flotar cuando están en contacto con ésta. El caso del petróleo, combustóleo y desechos petroleros, por su color y aspecto, se hacen evidentes cuando se encuentran sobre la superficie. Si son depositados en el suelo pueden lixiviarse debido a que las lluvias arrastran los compuestos solubles. La gasolina, turbosina, diesel y gasóleo fluyen fácilmente hacia el subsuelo y durante su trayectoria pueden adsorberse en el material poroso en la zona no saturada; o bien, migrar hasta el nivel freático y dispersarse según la dirección de la corriente subterránea.

Debido a que muchos de los sitios contaminados presentan características de alta permeabilidad y niveles freáticos someros es común que no solo se contamine el suelo sino también el agua subterránea.

Uno de las técnicas de biorremediación apropiada para suelos contaminados con hidrocarburos consiste en biopilas que también se conocen como bioceldas, biomontículos o pilas de composteo. Se utilizan para reducir las concentraciones de los hidrocarburos en suelos con permeabilidades altas a través de la biodegradación. La biopila se define como un proceso biológico controlado donde los contaminantes orgánicos son biodegradados y mineralizados.

El proceso consiste en extraer el suelo del sitio contaminado y formar pilas con éste y estimular la actividad microbiana, aireando y/o adicionando nutrientes y humedad.

MARCO TEÓRICO

La biodegradación de los hidrocarburos, es un proceso mediante el cual, los microorganismos reducen los compuestos químicos a compuestos más simples, es decir de menor peso molecular, por lo que se presenta como una opción muy viable para el tratamiento de los suelos contaminados con hidrocarburos.

Para que la degradación se lleve a cabo, es necesario que existan las condiciones ambientales adecuadas, así como la cantidad suficiente de microorganismos degradadores de hidrocarburos, estos por lo general, son los microorganismos autóctonos del sitio contaminado. En caso de que las condiciones ambientales y las unidades formadoras de colonias (UFC) no sean suficientes, es necesario establecerlas mediante procesos ingenieriles.

Uno de los principales problemas de la biodegradación, es que en presencia de altas concentraciones del 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: contenido de humedad, temperatura, nutrientes inorgánicos (principalmente nitrógeno y fósforo), aceptores de electrones (oxígeno, nitrato, sulfato), pH, presencia de metales pesados, tipo y cantidad de material orgánico presente (carbono)

La biodegradación de los hidrocarburos se lleva a cabo principalmente por dos grupos de microorganismos: las bacterias y los hongos. Las bacterias tienen un crecimiento muy rápido y una mayor capacidad de adaptación a los medios contaminados.

La biodegradación depende de un adecuado suministro de agua, por lo que es importante conocer la porción de agua disponible para los microorganismos. Esta puede conocerse indirectamente a través de la capacidad de campo que depende de la textura y porosidad del suelo. La biodegradación de los hidrocarburos es óptima con un contenido de humedad entre 30 y 80 por ciento de la capacidad de campo.

Los nutrientes inorgánicos principales para la biodegradación son el nitrógeno y el fósforo. El primero es necesario para la síntesis de proteínas y la pared celular, mientras que el fósforo es necesario para formar los ácidos nucleicos. El nitrógeno puede perderse rápidamente en el suelo debido a la lixiviación del amonio y nitratos y por la desnitrificación del suelo. El fósforo se encuentra frecuentemente limitado debido, a su baja solubilidad y biodisponibilidad. El fósforo orgánico en suelos se encuentra principalmente en los ácidos húmicos mientras que el fósforo inorgánico se encuentra en combinación con el Fe, Al, Ca, F.

La biorremediación 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 por ciento de poros libres en la matriz del suelo.

Los contaminantes orgánicos presentes en el suelo, son la fuente de carbono que los microorganismos requieren para la biodegradación.

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

1. Los hidrocarburos alifáticos son más fáciles de degradar que los compuestos aromáticos.
2. Los hidrocarburos alifáticos de cadena recta son más fáciles de degradar, que los que tienen radicales, ya que el radical impide la biodegradación.
3. Los hidrocarburos saturados son más fáciles de degradar que los insaturados. La presencia del doble o triple enlace dificultan la degradación.
4. Las cadenas largas de hidrocarburos son más fáciles de degradar que las cortas. Los hidrocarburos con menos de 9 carbonos son difíciles de degradar, ya que son tóxicos, el contenido óptimo de carbonos en la cadena para degradar es de 10 a 20.

Biopilas

La efectividad de la biopila depende de los siguientes factores:

1. Características del suelo.
2. Características de los contaminantes.
3. Condiciones climatológicas.

Ventajas de las biopilas

- 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 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.

- Las biopilas ofrecen un costo más competitivo con respecto a otras técnicas de saneamiento de suelos

Limitaciones

- Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) de cinco y seis anillos son difícilmente degradables en las biopilas.
- Las biopilas no son efectivas para concentraciones de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) superiores a 50 000 mg/Kg.
- La presencia de metales pesados pueden inhibir el crecimiento de microorganismos.

Criterios para la selección de la tecnología

- Establecer la extensión del suelo contaminado (volumen y datos del sitio)
- HTP < 50 000 ppm
- Bacterias heterótrofas > 1 000 CFU/g en suelo seco
- PH entre 6 y 9
- Contenido de humedad entre el 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

En la figura 1 se muestra un esquema de biopila

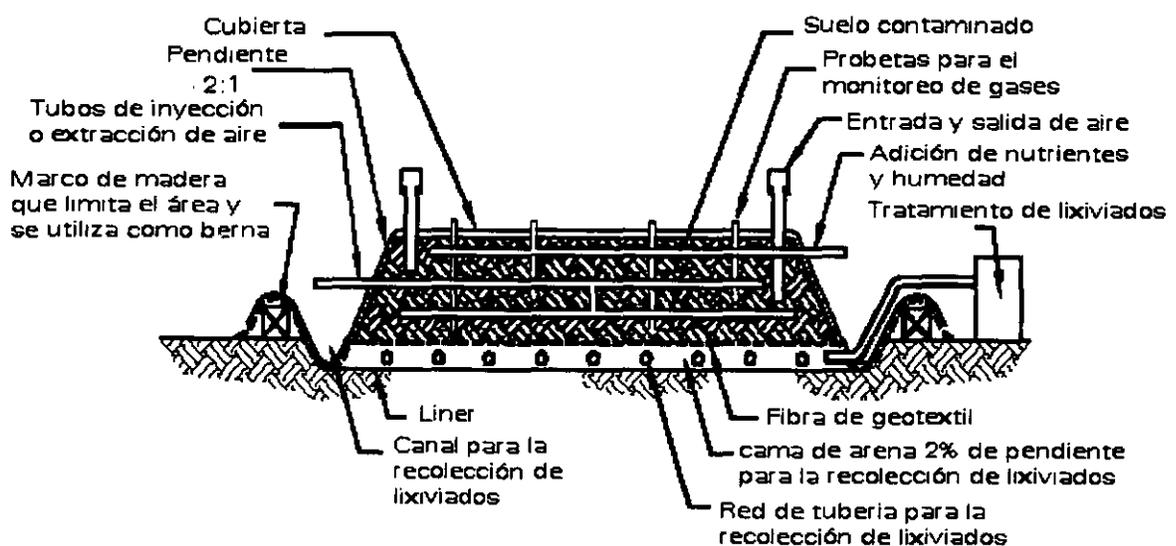


Figura 1 Esquema de la biopila

BASES TÉCNICAS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA BIOPILA

- Selección del sitio
- Preparación de la base
- Aeración
- Adición de humedad
- Adición de nutrientes
- Colección de lixiviados

Selección del sitio

El área debe contar con espacio adecuado y con los servicios que permitan la instalación de aeración y distribución de agua. Se requiere un área plana para la construcción de la biopila. El espacio debe ser suficiente para almacenar el suelo, mezclarlo y prepararlo para la biopila.

Preparación de la base

La base de la biopila tiene tres funciones:

- Proporcionar una cimentación estable para soportar la biopila así como el manejo de las operaciones requeridas
- La base proporciona una barrera contra la migración potencial del contaminante en el suelo subyacente
- La base debe contar con una pendiente de 2 a 3 por ciento para evitar el almacenamiento de lixiviados en la base de la biopila

La base de la biopila puede consistir de una capa de arcilla compactada o bien, se puede utilizar un área pavimentada como la de un estacionamiento o un patio de almacenamiento.

Aeración

La biopila debe contar con un sistema de aeración para que exista el suministro de oxígeno suficiente para que los microorganismos degraden los compuestos (Brown y Cartwright, 1990). El suministro puede ser activo o pasivo. En ambos casos se requiere la instalación de drenes, tuberías ranuradas o perforadas que se colocan a diferentes alturas a través de la biopila de manera que el aire penetre a la biopila. En el método pasivo se deja que el aire penetre naturalmente a los drenes. Los sistemas de ventilación activa

consideran sistemas de inyección y extracción de aire. Estos sistemas deben actuar de manera que el flujo de aire esté justo arriba de las condiciones de oxígeno límite a fin de prevenir exceso de volatilización de los hidrocarburos que reduzcan las emisiones de vapor hacia el exterior (Fan y Tafuri, 1994). Si los vapores son excesivos se instala un sistema de carbón activado para la eliminación de vapores. Cuando se trata de hidrocarburos pesados como los provenientes de diesel, no se requiere sistema de extracción de vapores.

Para obtener la tasa de degradación de los hidrocarburos en la biopila se requiere una prueba de respirometría, en la que se mide la cantidad de O_2 en muestras de gas del suelo. Se dejan de medir las concentraciones de oxígeno hasta que se llega al 10 por ciento. Para determinar la tasa de consumo de oxígeno, se mide el porcentaje de O_2 con el tiempo. La pendiente de la curva correspondiente es la velocidad a la que se consume el oxígeno.

Antes de iniciar la operación de la biopila, se debe estimar la tasa de biodegradación de la biopila. Una disminución en la tasa de consumo de oxígeno se interpreta como una disminución en la concentración de hidrocarburos.

Adición de agua

Los microorganismos requieren humedad para transportar los nutrientes, llevar a cabo los procesos metabólicos y mantener la estructura de la célula. Sin embargo, un exceso de humedad es indeseable debido a que el agua ocuparía gran parte de los poros del suelo, limitando la permeabilidad del aire y reduciendo la eficiencia de aeración (F.M. von Fahnestock, 1998).

Por otra parte el exceso de agua incrementa la generación de lixiviados tanto de los hidrocarburos como de los nutrientes.

El contenido de agua puede cambiar a medida que se lleva a cabo el saneamiento. El aire por lo general, penetra en la biopila a menos de 100 por ciento de la humedad relativa y tiende a remover la humedad a medida que se mueve a través de la biopila. Por otra parte, el proceso de biodegradación convierte los hidrocarburos en CO_2 y H_2O lo que incrementa nuevamente el contenido de agua. Aproximadamente se producen 700 mg de agua por cada 500 g de HTP degradados.

El requerimiento de agua depende del clima del sitio de ubicación de la biopila. En un ambiente seco y bajo contenido inicial de hidrocarburos, por lo general se requiere

agregar agua. La práctica de control de humedad se facilita cuando existe un sistema de colección y control de lixiviados. Por lo general un ajuste inicial en el contenido de agua es suficiente para eliminar la necesidad de adición de agua durante la operación. Si la biopila se cubre al terminar su construcción, se calcula que existirá una pérdida de humedad entre 1 y 2 por ciento en un período de 4 meses. Por lo general se recomienda que el suelo tenga un contenido de agua entre 70 y 90 por ciento de la capacidad de campo si únicamente se le va a regar agua durante la etapa de construcción.

Adición de nutrientes

Los organismos requieren de una fuente de carbono para producir biomasa. Los microorganismos que degradan los hidrocarburos en una biopila utilizan a estos como fuente de carbono y energía. Los contaminantes y los compuestos orgánicos naturales del suelo por lo general suministran este carbono requerido, pero existen otras sustancias que son nutrientes esenciales, como el nitrógeno, el fósforo y el potasio que pueden estar en baja proporción con respecto al carbono. USEPA recomienda que la relación C:N:P sea de 100:15:1 o bien, 100:15:0.5.

Los nutrientes se disuelven en agua y se rocían en el suelo antes o durante la construcción de la biopila o bien, en forma granular mezclada con el suelo. Asimismo es factible agregar los nutrientes durante la operación, en el sistema de adición de agua. Cuando la pila se empieza a secar una solución de nutrientes en agua se aplica en la parte superior de la pila mediante un sistema de aspersión. La solución de nutrientes percola a través de la pila; sin embargo, el fósforo por lo general no penetra más de 30 cm debido a la reacción química con el suelo.

En la tabla 1 se presenta un ejemplo de cálculo para obtener los nutrientes que deben agregarse en una biopila cuya concentración promedio de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) es de 40 000 mg/Kg.

Tabla 1. Cálculos para obtener los nutrientes necesarios en la biopila
Contenido de C en el suelo: $40\,000\text{ mg/Kg} (0.8) = 32\,000$
Relación de C:N:P = 100:15:1
Cantidad de N necesario: $32\,000 \times 0.15 = 4\,800\text{ mg/Kg}$
Cantidad de P necesario: $32\,000 \times 0.01 = 320\text{ mg/Kg}$
Suelo:
Densidad del suelo: $1\,500\text{ mg/Kg}$
Volumen de la biopila: 27 m^3
Peso total de la biopila: 40.4 ton
Total de nutrientes requeridos:
Nitrógeno: $4\,800\text{ mg/Kg} \times 40\,500\text{ Kg} = 194.4\text{ Kg}$
Fósforo: $340\text{ mg/Kg} \times 40\,500\text{ Kg} = 13.77\text{ Kg}$
Contenido de N y P en el fertilizante Nitrofósforo: (31-4-0)
Fósforo (P) = $13.77/0.04 = 344.25\text{ Kg}$
En 243 Kg de Nitrofósforo hay 75.33 Kg de N
Nitrógeno requerido: $145.8 - 75.33 = 70.47\text{ Kg}$
Contenido de N en la Urea: (46-0-0)
Urea requerida: $70.47/0.46 = 153\text{ Kg}$

Colección de lixiviados

Para un sistema permanente de biopilas se instala un sistema de colección de lixiviados, que consta de una tubería perforada en la base de la biopila en el lado hacia donde se dejó la pendiente. El tubo se conecta a una canaleta que puede ser una tubería de 4 pulgadas cortada en media caña que finalice en un cárcamo de bombeo y un tanque de almacenamiento de los lixiviados.

Para biopilas menores se puede conectar el sistema de colección de lixiviados a un sistema de extracción de vapores. Si la biopila se construye con la humedad requerida no se producen lixiviados.

APLICACIÓN A NIVEL PILOTO EN UNA REFINERÍA

En una refinería en una zona costera de México, se construyó una biopila como prueba piloto, en un área contaminada con una concentración promedio de HTP de $35\,000$

mg/Kg. La dimensión de la biopila experimental fue de 5.5 m en la base, 1.5 m de altura y una pendiente de 1.5:1.

Se seleccionó un área de 10 x 10 m, se limpió de desechos y posteriormente se colocó una capa de suelo de baja permeabilidad de aproximadamente 30 cm de espesor. Posteriormente se colocó una membrana impermeable. A la capa de suelo se le dio una pendiente del 2 % para coleccionar los lixiviados. El suelo para construir la biopila se excavó del área contaminada.

Durante la construcción se colocaron los drenes para la aireación, sobre una cama de grava, a 0.50 m y a 1.00 m de altura. Los drenes son tubos de PVC de 2 pulgadas de diámetro, con orificios de $\frac{1}{4}$ " a cada 3 cm para que se distribuya el aire.

Asimismo se calculó el contenido de agua (20 por ciento) correspondiente al 70 por ciento de la capacidad de campo y se calculó la adición de agua requerida para mantener dicha humedad. En la última capa, a 1.40 m de altura se colocaron dos drenes similares a los de aireación para adicionar agua.

Al final de la construcción la biopila se cubrió con una capa de grava para mantener una temperatura adecuada y protegerla del aire y en consecuencia de la erosión. En este caso no fue necesario cubrir la biopila con una capa de polietileno, debido a que la temperatura es suficientemente constante a lo largo del año (FIG 2).

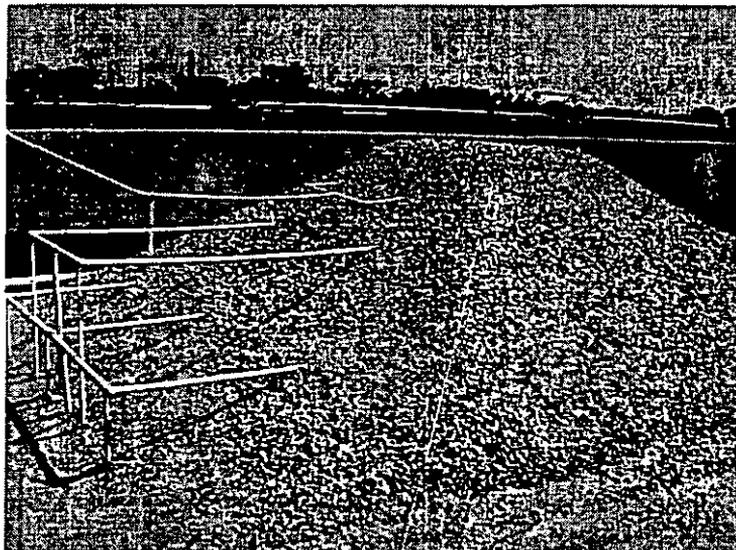


Figura 2 Biopila cubierta con una capa de grava

RESULTADOS

La figura 3 muestra las concentraciones de HTP después de 22 semanas de operación de la biopila. Los resultados indican una remoción promedio de HTP del 81 por ciento. Los HAP no se detectaron después de 22 semanas de operación.

Después de 8 semanas el nitrógeno disminuyó de 0.09 % a 0.01%, mientras que el fósforo aumentó de 2 ppm a 90 ppm. Lo anterior indica que no se requiere adicionar fósforo pero sí nitrógeno ya que el conteo bacteriano se ha mantenido aproximadamente igual, de 3×10^6 (UFC/g) a 3.4×10^6 (UFC/g) lo que implica que el consumo de nitrógeno se mantiene pero no así el de fósforo.

Inicialmente se estimó que la tasa de biodegradación fuera cercana a 160 mg/kg/día: Sin embargo, durante la operación de la biopila el promedio de la tasa de biodegradación fue de aproximadamente 70 mg/kg/día.

Se considera que los resultados muestran una excelente degradación dados los altos niveles de hidrocarburos y el tiempo en que se lograron las eficiencias mencionadas.

El costo de la biopila es de aproximadamente \$ 800.00/ m³

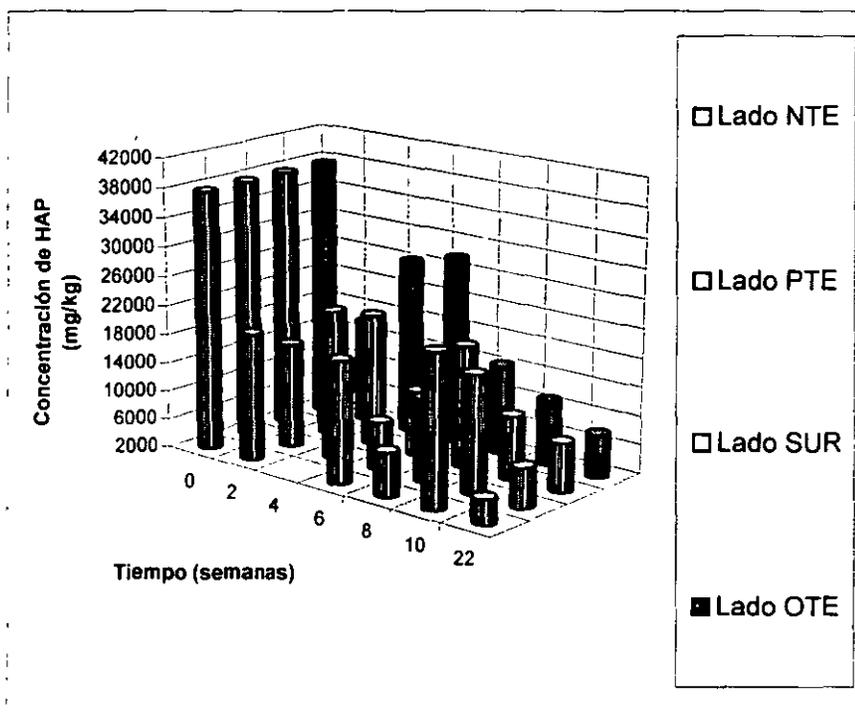


Figura 3 Remoción de hidrocarburos totales del petróleo en la biopila

CONCLUSIONES

La biopila construida con arena contaminada por hidrocarburos tuvo una buena remoción en poco tiempo.

Después de 8 semanas de operación no se requiere adicionar más fósforo pero sí se debe mantener la relación carbono:nitrógeno y en caso necesario agregar el nitrógeno requerido.

Se observa que a partir de la semana 22 se tiene en promedio el 81 por ciento de eficiencia de remoción de HTP y los cuatro lados de la biopila presentan concentraciones similares lo cual indica una degradación homogénea.

La reducción de los compuestos poliaromáticos (HAP) no sigue una tendencia lineal pero sí se observa una disminución gradual que llega a la no detección de estos compuestos después de 22 semanas de operación.

Aunque la bibliografía menciona la necesidad de cubrir la biopila con plástico, para el caso mencionado se cubrió con grava que también evita la erosión y mantiene una temperatura dentro de un nivel adecuado para los microorganismos. Lo anterior se debe a que el sitio no presenta por lo general temperaturas menores a 15 ° C. No hubo un exceso en la infiltración del agua, ya que no hay ningún líquido en el sistema de recolección de lixiviados.

La biopila es un método técnica y económicamente adecuado para sanear suelos contaminados con hidrocarburos.

REFERENCIAS

Brown, R.A. & R.T.Cartwright. 1990. Biotreat Sludges and Soils. *Hydrocarbon Processing*. 68(10): 93-97

Fahnestock, F.M., von 1998. Biopile Design, Operation and Maintenance Handbook for Trating Hydrocarbon- Contaminates Soils. Battelle Press. TD879P4B55.

Fan C.Y. & A.N. Tafuri. 1994. Engineering Application of Biooxidation Processes for Trating Petroleum Contaminated Soil. Remediation of Hazardous Wastes Contaminated Soils. New York, NY. Marcel Dekker, Inc.

Iturbe A.R., Flores S.R.M., Flores T.C., Chavez L.C. 2000. Behaviour of Spilled Hydrocarbons from a Coastal Zone in Mexico. A Case Study. Proceedings of ASME Conference. New Orleans.



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

CURSOS ABIERTOS

**DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS**

**MODULO III
CA 110**

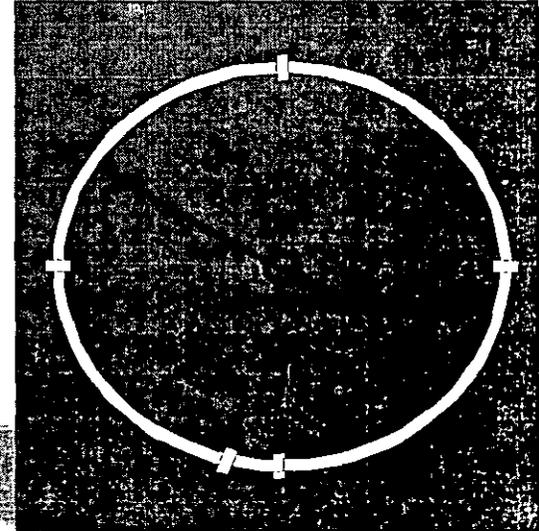
**CASOS DE ESTUDIO, APLICACIONES PRÁCTICAS DE
METODOLOGÍA DE RESTAURACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS**

TEMA

EJEMPLO MUESTREO

**EXPOSITOR: ING. CRISTINA ARÁOZ TREJO
PALACIO DE MINERÍA
JULIO DEL 2002**

Ejemplo muestreo

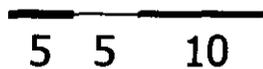
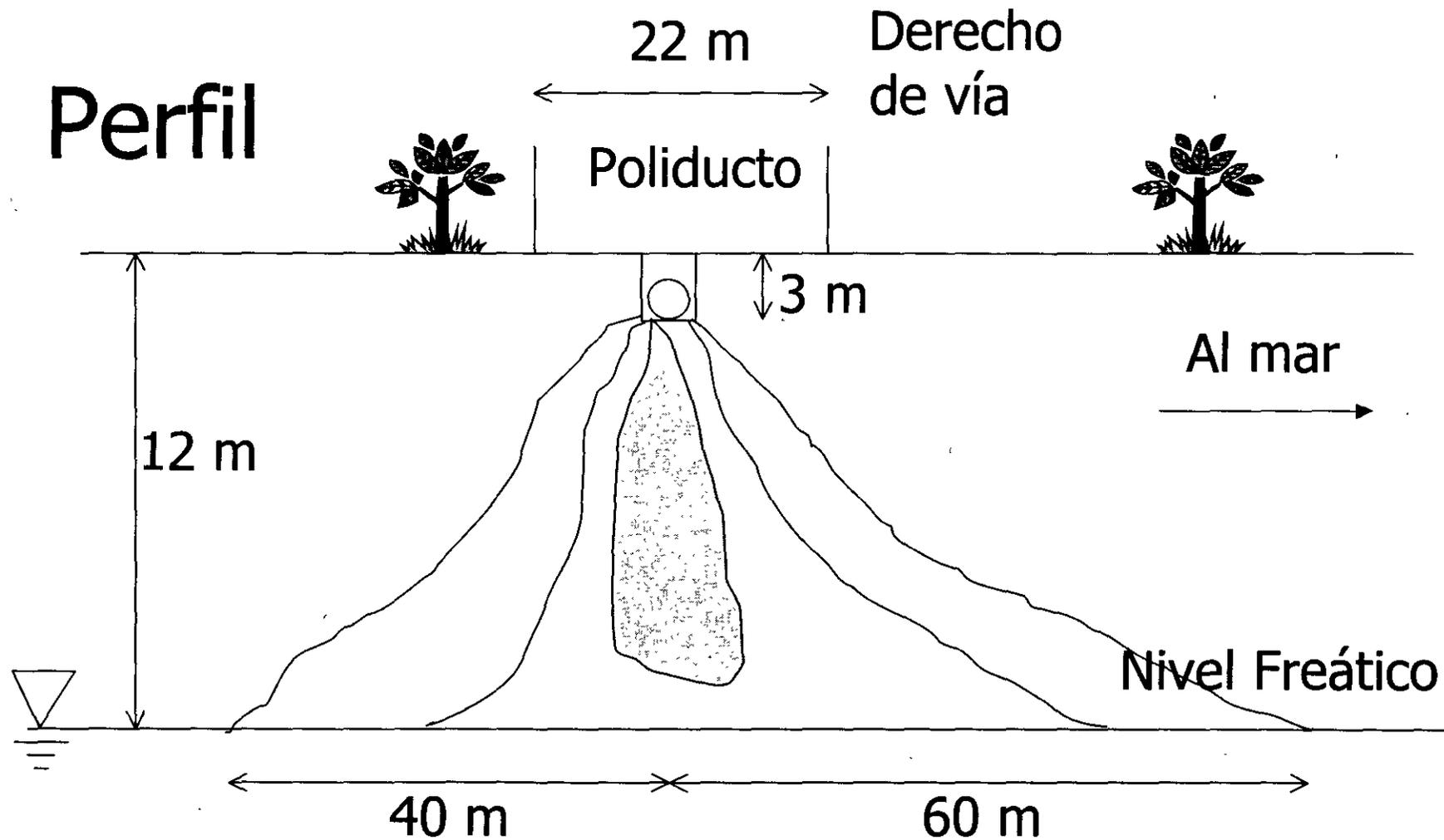


eXperTos Consultores Ambientales

Fuga en poliducto

- ◆ Volumen derramado: 20 mil barriles.
- ◆ Producto involucrado: Gasolina principalmente.
- ◆ Derecho de vía: 10 m Este, 12 m Oeste.
- ◆ Tipo de suelo: Arenoso limoso.
- ◆ Estabilidad en talud: 45°.
- ◆ Uso de suelo: espacio abierto.
- ◆ Cobertura vegetal: 80%, vigor medio, área 80%.
- ◆ Clima semidesértico: 20 mm lluvia por año, Temperatura promedio 28°C.
- ◆ Cerca de la costa de Sonora.

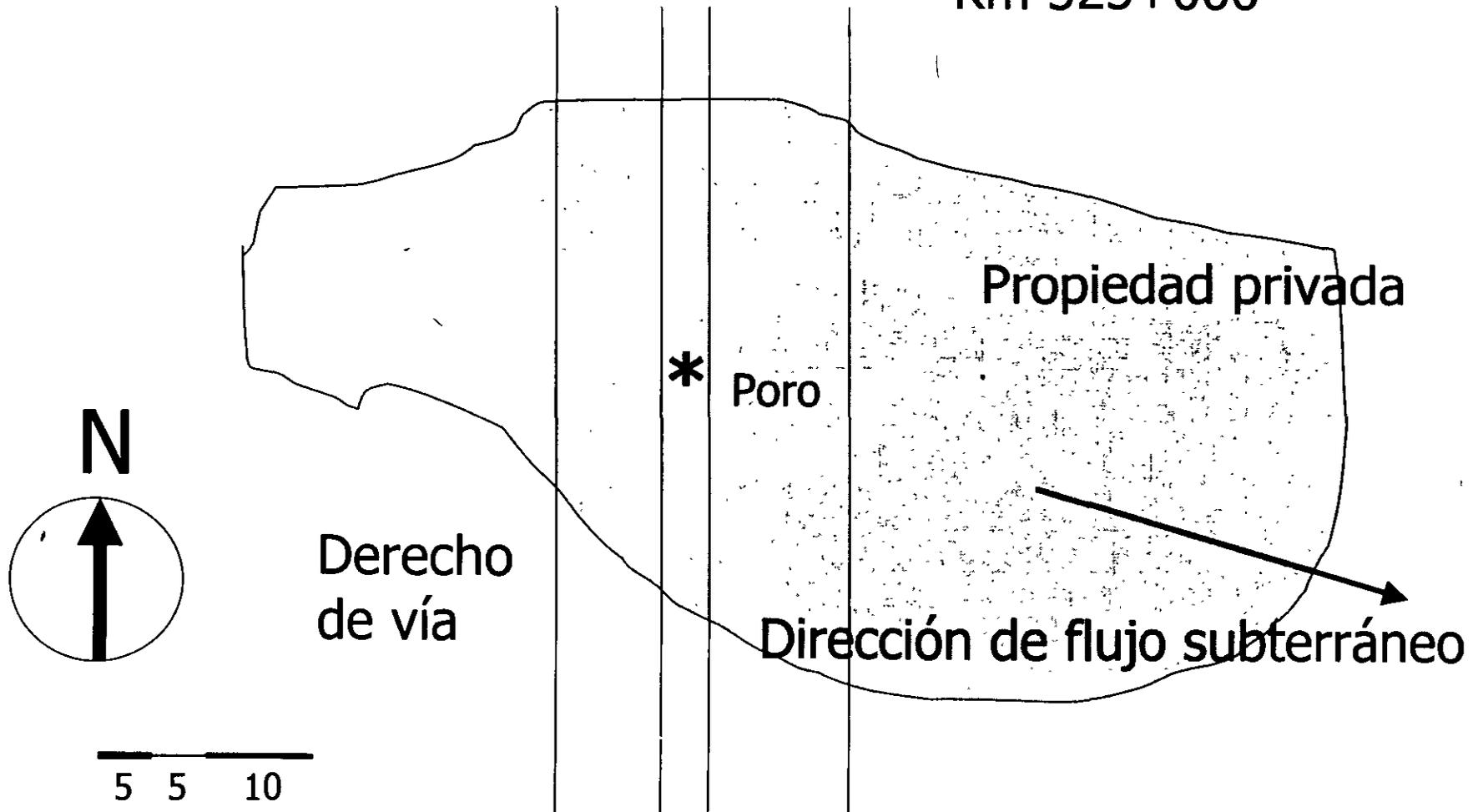
Perfil

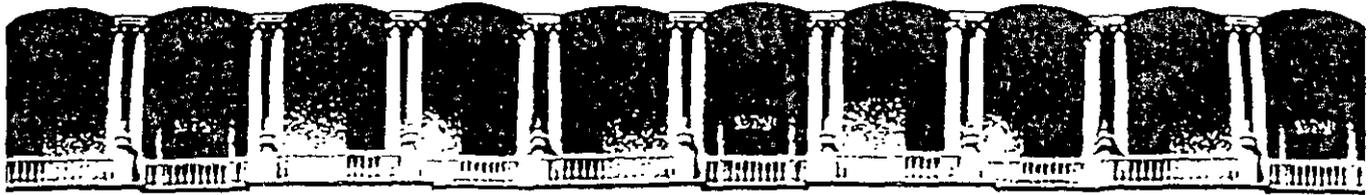


Planta

Poliducto

Km 325+000





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

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

MODULO III CA 110

CASOS DE ESTUDIO, APLICACIONES PRÁCTICAS DE METODOLOGÍA DE RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

TEMA

PRÁCTICA DE CAMPO, CLASIFICACIÓN EDAFOLÓGICA DE SUELOS

**EXPOSITOR: M. EN I. MARIA ROCHA JIMÉNEZ
PALACIO DE MINERÍA
JULIO DEL 2002**

INDICE

	Página
Prólogo	4
Introducción	5
Ubicación y factores ambientales del sitio	5
Características y espesor de los horizontes	13
Nomenclatura y designación internacional de horizontes	27
Principales tipos de mantillo en suelos forestales	30
Evaluación edafo-ecológica del sitio	32
Evaluación de la capacidad filtro y amortiguadora	44
Ejemplo de una descripción completa de perfil	48
Referencias bibliográficas	50

Prólogo

El presente manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo deriva del Capítulo 3: "Descripción e Interpretación del perfil de suelo en el campo", del libro "Bodenkundliches Praktikum" (Práctica Edafológica) de E. Schlichting y H.-P. Blume (1966), recientemente reeditado por H.-P. Blume y K. Stahr (Schlichting *et al.*, 1995). En dicho libro el Prof. Dr. Ernst Schlichting, en colaboración con su entonces alumno y ayudante científico H.-P. Blume, introdujo gran parte de sus conceptos integrales, cuyo fundamento consiste en la apreciación de las características morfológicas de los suelos en un paisaje determinado para a partir de ellas, derivar los procesos pedogenéticos ocurridos, así como reconocer las características edafo- ecológicas del sitio. A través de este procedimiento queda explícita al lector la inseparable vinculación de los aspectos genéticos y ecológicos de cada suelo y, al mismo tiempo, proporciona a biólogos, agrónomos, forestales, geógrafos y geólogos una herramienta útil para obtener en poco tiempo (2 a 3 horas por perfil), con métodos simples y de fácil aplicación, una amplia información acerca de la formación y las características ecológicas de los suelos existentes en un sitio o paisaje determinado.

La versión que aquí se presenta es el resultado de las modificaciones hechas por varios asistentes de investigación del Prof. Schlichting (Dr. V. Schweikle, Dr. H.-P. Hauße y Dr. Reinhold Jahn) y de su sucesor (Prof. Dr. Karl Stahr) a través de la aplicación del instructivo contenido en la "Descripción e Interpretación del perfil de suelo en el campo" durante las diversas prácticas que se ofrecen en el "Institut für Bodenkunde und Standortlehre" (Instituto de Edafología) de la Universidad de Hohenheim, Alemania. Siguiendo la filosofía original, se incluyeron estimaciones de campo publicadas por otros autores, por ejemplo, la estimación del contenido de materia orgánica por Renger *et al.* (1987) y la erosionabilidad del suelo por Wischmeier *et al.* (1971). Para la versión en español de uso en México, se adoptó la terminología y parámetros descriptivos usados en el Soil Survey Manual (1993), al igual que la nomenclatura de horizontes de la FAO, utilizada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) en la elaboración de los mapas edafológicos del país. También se consideró en esta versión del manual la evaluación de las características amortiguadoras con respecto a contaminantes y la capacidad filtro de los suelos; así se amplió el enfoque predominantemente agrícola y forestal del manual original a una interpretación también ambientalista, que reconoce entre las funciones del suelo no sólo la de ser soporte y abastecedor de nutrientes para la vegetación y los cultivos, sino también la de actuar como filtro para los acuíferos.

La versión en español fue revisada por el Prof. Dr. Norbert Peinemann de la Universidad Nacional del Sur, Argentina, el M.C. Jorge Gama y la Dra. Klaudia Oleschko del Instituto de Geología y por el Dr. José Luis Palacio Prieto del de Geografía de la UNAM, respectivamente, a quienes los autores agradecen observaciones importantes y correcciones de lenguaje.

1. Introducción

La descripción de perfiles de suelos en campo es la base para el levantamiento de suelos y se realiza con el fin de reconocer las unidades y asociaciones de los suelos en el paisaje. Los suelos de características iguales se agrupan en unidades cartográficas y su distribución se representa en una carta edafológica.

Las cartas edafológicas son de utilidad en las siguientes áreas:

- investigación: distribución, génesis, clasificación de suelos;
- enseñanza y capacitación: entendimiento de las funciones de los suelos en el paisaje;
- agronomía y silvicultura: el suelo como factor de producción, evaluación de tierras agrícolas y forestales, protección ambiental;
- infraestructura: arquitectura paisajista.

De manera general, también son de utilidad para:

- geólogos y geomorfológicos,
- ingenieros civiles (análisis de terrenos de construcción- mecánica y comportamiento-),
- hidrólogos (cálculos de renovación de acuíferos),
- botánicos (estudio de asociaciones de vegetación).

Este manual pretende proporcionar a estudiantes y técnicos las herramientas básicas para la descripción detallada de un perfil de suelo en el campo, así como para la evaluación rápida, con métodos de fácil aplicación, de las características ecológicas del mismo. Por características edafo- ecológicas se entienden aquellas que contribuyen a la satisfacción de las funciones que el suelo cumple en los ecosistemas, como lo son el ser soporte y habitat de vegetación, al igual que el fungir como filtro y amortiguador de contaminantes en la recarga de los acuíferos.

Como se muestra en la Figura 1, este manual instruye al usuario para que describa la localidad, reconozca los factores pedogenéticos particulares de la misma, delimite los horizontes y estratos que componen al suelo y defina sus características. A partir de esa descripción detallada del perfil del suelo, podrá denominar a cada uno de los horizontes y reconocer los procesos pedogenéticos que llevaron a su actual expresión morfológica, como también clasificar de manera preliminar al suelo de acuerdo con la clasificación de la FAO (1988). Paralelamente, podrá definir las características ecológicas, primero de cada horizonte y después del perfil completo del suelo, para, a partir de ellas, hacer la interpretación edafo- ecológica del sitio. Las interpretaciones pedogenéticas y ecológicas del sitio son el fundamento para la posterior evaluación del uso y manejo del suelo.

2. Ubicación y factores ambientales del sitio

La ubicación del perfil debe hacerse con mucho cuidado, ya que una descripción detallada de una inclusión o de un suelo atípico es de poco beneficio y significa un desperdicio de recursos. Una vez ubicado un lugar que sea típico del suelo a describir, se le verifica por medio de barrenaciones antes de proceder a la excavación del perfil.

La descripción del perfil se realiza en hojas de campo, de las cuales se muestra un ejemplo en el Anexo 1.

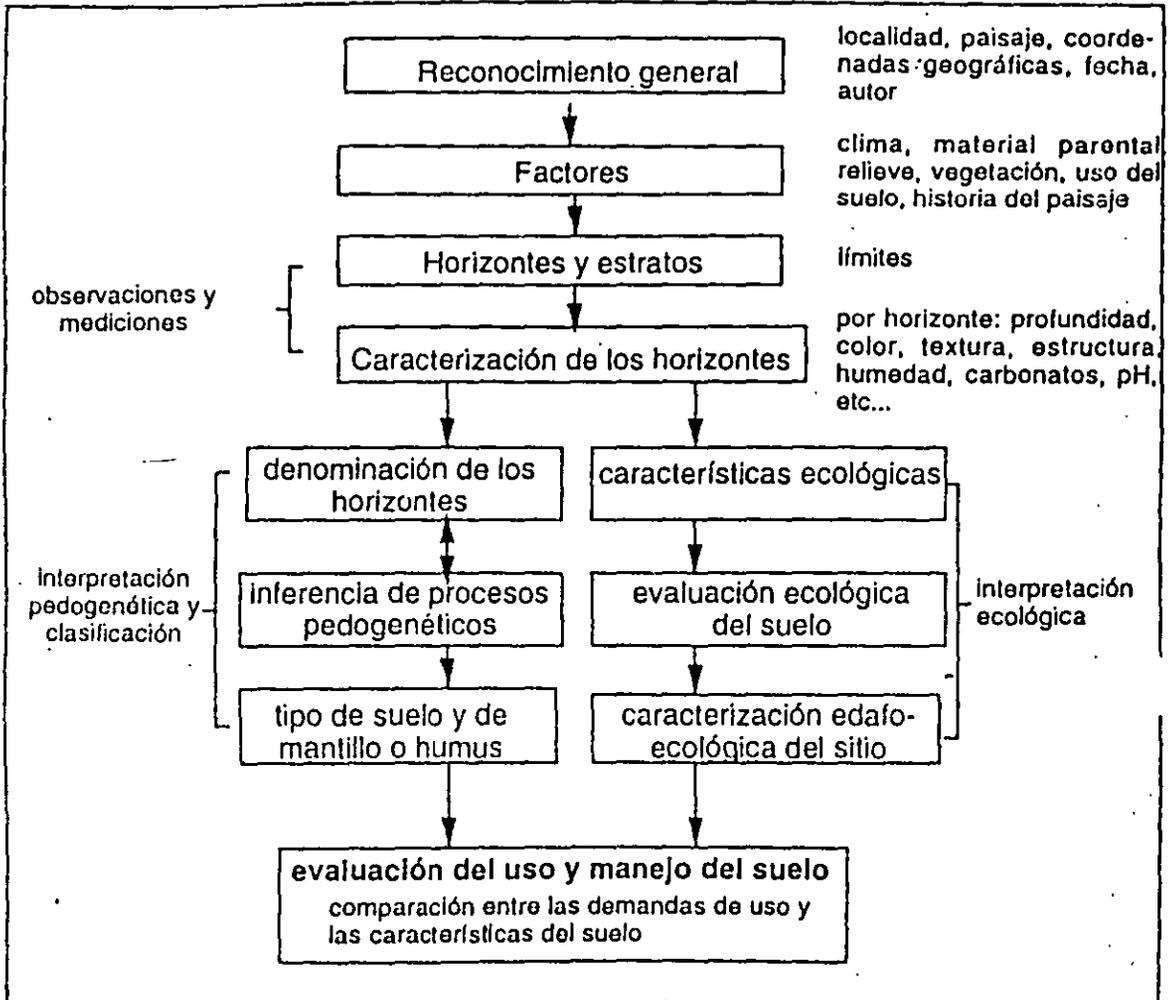


Figura 1. Diagrama de flujo del procedimiento a seguir para un levantamiento de suelos.

Localidad

Cada descripción de perfil debe comprender los siguientes datos sobre el lugar, los cuales son necesarios para su catalogación inconfundible:

- sitio: estado, municipio, descripción del abordamiento del lugar;
- número del perfil, el cual se anota en el mapa base (solo es de relevancia local, pero facilita la coordinación de descripciones y datos de laboratorio);
- número del mapa topográfico o fotografía aérea utilizada y escala de la misma;
- coordenadas del sitio;
- altitud;
- fecha;
- nombre del autor de la descripción.

Clima y estado del tiempo

La calidad ecológica de un sitio es determinada, entre otros factores, por el clima que prevalece localmente. Los conocimientos climáticos además facilitan la interpretación de los procesos pedogenéticos. En caso de referirse a datos correspondientes a estaciones meteorológicas cercanas al sitio, se deberá especificar la distancia de dicha estación al sitio, al igual que la diferencia en altitud.

El estado del tiempo influye sobre la calidad de la descripción.

Se reportan los siguientes datos:

- tipo climático;
- temperatura media anual, y máxima y mínima anuales;
- precipitación media anual;
- duración en meses de la época seca;
- duración y frecuencia de los periodos de humedad excesiva, según lo siguiente (Soil Survey Manual, 1993):

Frecuencia:		Clase
ninguna (n)	no hay posibilidad razonable para que ocurra	F0
rara (r)	1 a 5 ocasiones en 100 años	F1
ocasional (o)	5 a 50 ocasiones en 100 años	F2
frecuente (f)	más de 50 ocasiones en 100 años	F3
Duración:		
extremadamente corta	<4 horas	D1
muy corta	4 a 48 horas	D2
corta	2 a 7 días	D3
larga	7 días a 1 mes	D4
muy larga	1 mes	D5
duración anual cumulativa:		
ausente	no observada	DAC0
muy transitoria	presente < 1 mes	DAC1
transitoria	presente 1 a 3 meses	DAC2
común	presente 3 a 6 meses	DAC3
persistente	presente 6 a 12 meses	DAC4
permanente	presente continuamente	DAC5

El estado del tiempo se registra según lo indicado en la siguiente tabla (Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde, 1982):

Estado del tiempo:	Clave:
sin precipitación en los últimos 30 días	ET 1
sin precipitación en los últimos 7 días	ET 2
sin precipitación en las últimas 24 horas	ET 3
lluvioso con precipitación ligera (<25 mm/h)	ET 4
lluvia fuerte hace varios días (>25 mm/h)	ET 5
lluvia extremadamente fuerte (>75 mm/h)	ET 6
iluminación deficiente	I
neblina	N
temperatura ambiental baja (<12 C)	T
viento fuerte	V
lluvia	LL

Uso del suelo y vegetación

Referir datos sobre:

- uso del suelo (por ejemplo: agrícola, forestal)
- prácticas de manejo (por ejemplo: subsoleo, drenaje, encalado, rotaciones, riego, fertilización)
- tipo de cultivo o tipo de vegetación, cobertura y especies dominantes en caso de vegetación natural.

Tipo de vegetación (CNA, 1989):

M	manglar	SAS	selva alta subperennifolia
P	popal	SMS	selva mediana subperennifolia
T	tular	SMC	selva mediana caducifolia
P	pastizal	SBS	selva baja subperennifolia
Z	zacatonal	SBC	selva baja caducifolia
MDM	matorral desértico micrófilo	BC	bosque caducifolio
MDR	matorral desértico rosetófilo	BCE	bosque de cedro y táscate
MC	matorral crasicaule	BE	bosque de encino
MS	matorral submontano	BPE	bosque de pino-encino
C	chaparral	BP	bosque de pino
MZ	mezquital	BO	bosque de oyamel
SAP	selva alta perennifolia	Otra	(especificar)

Exposición

Determinar la exposición del perfil por medio de una brújula y referir la orientación: N, NE, E, SE, S, SO, O, NO (este dato se omite en caso de que el sitio sea plano).

Pendiente

Referir la longitud aproximada de la pendiente en metros y determinar el gradiente por medio de un clinómetro o midiendo la distancia entre las curvas de nivel en el mapa topográfico (en caso de microrelieve pronunciado este último método estará sujeto a error).

Pendiente		Relieve		Clave
[porcentaje]	[grados]	Pendiente sencilla (S)*	Pendiente compleja (C)*	
0-2	0-0.5	casi plano	casi plano	0
2-4	0.5-2	ligeramente inclinado	ligeramente ondulado	1
4-9	2-5	moderadamente inclinado	moderadamente ondulado	2
9-18	5-10	fuertemente inclinado	fuertemente ondulado	3
18-27	10-15	escarpado moderado	escarpado moderado	4
27-36	15-20	escarpado	escarpado	5
> 36	>20	muy escarpado	muy escarpado	6

* Las pendientes sencillas son aquellas en que la inclinación del terreno va en un solo sentido; las pendientes complejas son aquellas en las que la inclinación del terreno va en varios sentidos.

Forma del terreno

Para comprender la situación espacial de un perfil es necesario hacer una breve descripción de la geomorfología local y referir su posición fisiográfica, así como la forma del terreno que lo rodea. El gradiente de la pendiente, su forma y longitud, son determinantes de los procesos pedogenéticos y de modelación del terreno, lo cual se ejemplifica en la Figura 2. En la cartografía de suelos las formas del relieve son criterios importantes para la delimitación de unidades de suelo.

La posición fisiográfica puede referirse en la descripción del perfil según lo siguiente:

- 1) posición plana: planicie, llanura
- 2) posición en el punto de culminación de una elevación: meseta, cima, cresta
- 3) posición en ladera: ladera cóncava, convexa, extendida, compleja, ondulada y posición en la ladera superior, media, inferior o en el pie de ladera.
- 4) posición en fondo de valle o de resión (relieve negativo)

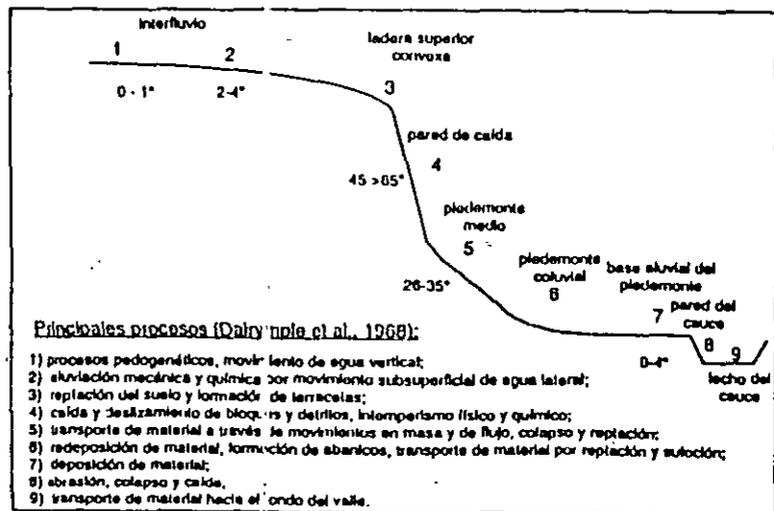


Figura 2: Ejemplo de un modelo de unidades del relieve y los principales procesos que ocurren en cada una de ellas según Dalrymple *et al.*, 1968.

También se menciona la **geoforma** en la que se encuentra el perfil:

Morfología general: sierra, montaña, volcán, cerro, lomerío, altiplanicie, planicie, meseta, valle intermontano, valle, planicie costera, isla

Geoforma local: abanico aluvial, ciénaga, cráter, duna, llanura de inundación, meandro, montículo, loma, pie de monte, pie de loma, terraza fluvial, lacustre o marina.

En caso de la presencia de un **microrelieve** (diferencias en altitud de la superficie del terreno a distancias de pocos metros) también se anotan las características del mismo, por ejemplo: cárcavas, hormigueros y termiteros, relieve "gilgai" por presencia de arcillas expandibles, etc...

Evidencias de erosión

Si se observan evidencias de erosión acelerada o deposición de materiales como resultado de procesos erosivos en el área inmediata al perfil estudiado, esto debe reportarse de acuerdo con lo siguiente:

1. Se deberá distinguir entre erosión (o deposición) hídrica o eólica.
2. En caso de erosión hídrica, deberá referirse si la erosión es laminar, en canales, en cárcavas ó en túneles.

El grado de la erosión ocurrida podrá estimarse a través de la comparación de sitios pertenecientes a la misma unidad de suelo carentes de evidencias de erosión con aquéllos que sí las presentan; se utilizan los siguientes criterios para su clasificación (Soil Survey Manual, 1993):

- Clase 1: Pérdida <25% del espesor original del horizonte A o E, o de los primeros 20 cm en caso de que los horizontes A o E tengan un espesor menor que 20 cm. En la mayor parte del área, el espesor del horizonte superficial se encuentra dentro del intervalo normal de variabilidad de sitios no erosionados y sólo algunas zonas (<20%) muestran diferencias apreciables en espesor.
- Clase 2: Pérdida de 25 a 75% del espesor original del horizonte A o E, o de los primeros 20 cm en caso de que los horizontes A o E tengan un espesor menor que 20 cm. El horizonte superficial consiste de una mezcla del horizonte A o E original y los materiales subyacentes.
- Clase 3: Pérdida >75% del espesor original del horizonte A o E, o de los primeros 20 cm en caso de que los horizontes A o E tengan un espesor menor que 20 cm. En la mayor parte del área ha quedado expuesto el material subyacente a los horizontes A o E originales o, en caso de que los horizontes A o E hayan sido de gran espesor, el horizonte superficial consiste de una mezcla del horizonte A o E original y los materiales subyacentes.
- Clase 4: Pérdida total de los horizontes A o E originales, o de los primeros 20 cm del suelo, en caso de que los horizontes A o E tengan un espesor menor que 20 cm, y afectación de parte de los horizontes subyacentes. La mayor parte del área muestra un sistema de cárcavas muy desarrolladas.

Material parental

Todos los materiales expuestos en la superficie terrestre se intemperizan en función de las condiciones climáticas prevaletes, generándose así los procesos pedogenéticos. Estos se diferenciarán en su tipogénesis en función de la morfología y composición mineralógica del material parental. Su conocimiento es de importancia para la interpretación

pedogenética del suelo, al igual que para la evaluación de la liberación de nutrimentos a largo plazo.

La información que debe incluirse en la descripción del perfil es la siguiente:

- origen del material parental: residual, coluvial, aluvial, marino, lacustre, glacial, eólico;
- tipo de rocas.

La identificación de las principales rocas a través de sus características macroscópicas se presenta en la siguiente clave (según Pape, 1971, simplificado):

Características macroscópicas	Continuar en el No.	Tipo de roca
1 a. Granular grueso, tamaño dominante > 1mm, matriz fina faltante o solo presente en el espacio poroso.	2	
b. Granular fino, sólo tamaños < 1mm, compactación media, rompe en superficies accidentadas, con el cuchillo puede destruirse la unión de los granos.	15	
c. Uniformemente compacto o vítreo, rompe en astillas o conoidalmente, a veces poroso, los poros pueden estar vacíos o rellenos de sustancia mineral de colores claros.	8	
d. Porfírico (gran porcentaje de masa basal fina con incrustaciones gruesas que generalmente no tienen contacto unas con otras. Las incrustaciones generalmente son cristales individuales, a veces idiomorfos).	11	
2 a. Totalmente cristalina, compacta, cristales de tamaños muy similares, sin componentes de origen orgánico.	3	
b. Consiste de granos y componentes gruesos, presenta rasgos de tensión mecánica o actividad de organismos, generalmente estratificada.	14	
3 a. Consiste de una sola clase de minerales.	6	
b. Se distinguen varios tipos de componentes principales.	4	
4 a. El ordenamiento de los componentes granulares no presenta dirección.	5	
b. El ordenamiento de los componentes es en bandas con tendencia claramente paralela.	12	
5 a. Claro, obviamente cuarzo, componentes principales: cuarzo, feldespato potásico; componentes secundarios: biotita, muscovita.		Granito
b. Oscuro, sin cuarzo, componentes principales: plagioclasa; componentes secundarios: olivino, augita, hornblenda.		Gabro
6 a. Puede rallarse con la uña.		Yeso
b. No puede rallarse con un cuchillo, o resulta difícil.		Cuarcita
c. Puede rasguñarse con un cuchillo, pero no con la uña.	7	
7 a. Se reconocen claramente minerales individuales, efervesce fuertemente con HCl 10%.		Mármol
b. No se reconocen minerales individuales, efervesce fuertemente con HCl 10%.		Caliza

Características macroscópicas	Continuar en el No.	Tipo de roca
c. Minerales individuales reconocibles, el polvo solo efervesce débilmente con HCl.		Dolomita
8 a. Muy porosa, color claro y ligera.		Pómez
b. Poco porosa o sin poros.	9	
9 a. Puede rallarse con el cuchillo	7	
b. No o casi no es posible rallar con el cuchillo.	10	
10 a. Color gris a negro, similar a concreciones, su superficie es globosa.		Pedral Obsidiana
b. Color negro a rojo oscuro, brillo vítreo, rompe en lajas.		Basalto
c. Muy oscura y compacta, vértices no translucientes, a veces presenta burbujas.		Basalto
11 a. Masa basal muy oscura, inclusiones de olivino o augita.		Basalto
b. Masa basal clara, generalmente un poco rojiza; inclusiones predominantemente de cuarzo.		Granodiorita
12 a. Pizarroso, generalmente de grano fino, en parte exfoliable.	13	
b. Pizarroso, compacto, granular, no exfoliable, componentes principales: cuarzo, feldespato, micas.		Gneis
13 a. Alto contenido de micas macroscópicas.		Micacita
b. Brillo acerado, textura grasosa.		Filita
c. No tiene minerales visibles, brillo opaco.		Pizarra arcillosa
14 a. Muchos componentes gruesos, angulares y redondeados, minerales idiomorfos, magmáticos reconocibles.		Toba volcánica
b. Muchos componentes gruesos (mm-cm) redondeados.		Conglomerado
c. Muchos componentes gruesos angulares (mm-cm).		Brecha
d. Tamaños de partículas muy diversos, los componentes finos son margas (15e), los componentes gruesos son fragmentos de roca (lilicos).		Margas glaciares
e. Tamaños de partículas muy diversos, los componentes finos son limos, los componentes gruesos son fragmentos de roca (lilicos).		Limonita glaciár
f. Componentes casi exclusivamente < 2 mm.	15	
15 a. Granos de diámetro predominantemente de 1 mm		Arenisca gruesa
b. Granos de diámetro predominantemente de 0.1 mm.		Arenisca fina
c. Granos predominantemente de diámetro < 0.1mm, granos individuales perceptibles.		Limonita
d. Generalmente contiene carbonatos.		Loess
e. Granos individuales no perceptibles, diámetro < 0.1 mm.		Lutita
f. Granos de tamaño < 0.1 mm, granos individuales no perceptibles, contiene carbonatos.		Marga

Profundidad del manto freático

Donde es posible se refiere la profundidad del manto freático en el momento de la descripción al igual que la profundidad media anual con una estimación de la fluctuación máxima y mínima. El nivel máximo puede inferirse en algunos suelos a partir de cambios en el color del perfil.

3. Características y espesor de los horizontes

El estado de desarrollo de cada suelo se reconoce a través de capas de diferentes características, aproximadamente paralelas a la superficie, producidas por los procesos pedogenéticos. Estas capas se llaman horizontes, la intensidad de su desarrollo y las combinaciones en las que están presentes son la base de la clasificación de los suelos.

Profundidad y espesor

Los límites de los horizontes minerales (es decir zonas con predominancia de materia mineral) se señalan en cm; la cinta métrica se coloca de manera tal que el cero quede en el límite entre el suelo mineral y el mantillo (horizontes orgánicos). De esta manera, los horizontes orgánicos tienen valores positivos, mientras que los horizontes minerales tienen valores negativos.

Paralelamente, se mencionan los espesores de cada horizonte en dm, por ejemplo:

Tipo de horizonte:	Profundidad [cm]:	Espesor [dm]:
1. Orgánico	de + 10 hasta +3	0.7
2. Orgánico	de +3 hasta 0	0.3
1. Mineral	de 0 hasta - 15	1.5
2. Mineral	de -15 hasta -35	2.0
3. Mineral	de -35 hasta -74	3.9

Textura

La composición mecánica de un suelo, es decir, la distribución de los tamaños de las partículas que lo constituyen, se denomina textura. Es una de las características más importantes de un suelo y puede inferirse en campo a través de la "prueba al tacto". Para realizarla se humedece una pequeña muestra de la fracción fina del suelo (< 2mm) tomada del horizonte a caracterizar. No debe presentar exceso de humedad en el momento de presionarla; la muestra se encuentra entonces a "capacidad de campo". Posteriormente, se observan las características de moldeado, consistencia y granulosidad de la muestra, presionándola y palpándola entre los dedos y formando esferas y rollos. La tabla que a continuación se presenta contiene una clave para la designación de la clase textural. A partir del diagrama de texturas puede determinarse el porcentaje de arena, limo y arcilla que corresponde a cada clase textural.

En general las tres fracciones principales (arena, limo, arcilla) presentan las siguientes características en la prueba de tacto:

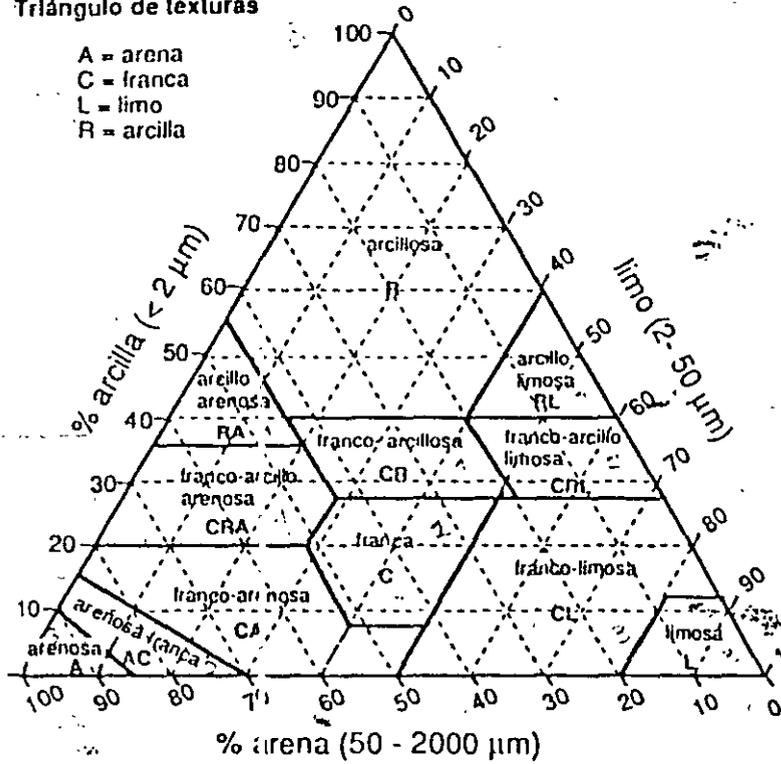
- arena: no es moldeable, no deja material fino en las palmas de las manos, los granos son claramente palpables;
- limo: poco moldeable, se siente harinoso, la superficie, al palparlo entre los dedos (índice y pulgar, es áspera, se agrieta al presionarlo.
- arcilla: es moldeable, deja material fino en las palmas de las manos, la superficie, al palparlo entre los dedos, índice y pulgar, es lisa y brillante.

No. corr.	Características	Seguir en No.	Tipo de textura	Clav
1	Intentar formar con la muestra un rollito del grosor de un lápiz:			
	a) moldeable;	4		
	b) no moldeable.	2		
2.	Palpar la consistencia entre los dedos índice y pulgar			
	a) adhesiva, se adhiere al dedo;		Franco arenosa	CA
	b) no adhesiva, no moldeable.	3		
3	Frotar la muestra entre las palmas de las manos:			
	a) consistencia muy harinosa, no se perciben granos de arena;		Limosa	L
	b) consistencia muy harinosa y se perciben granos de arena (<50% arena);		Franco limosa gruesa	CLg
	c) muy arenosa (50-85% arena), queda material fino en las líneas de la palma;		Arenosa franca	AC
	d) muy arenosa (>85% arena), no queda material fino en las líneas de la palma.		Arenosa	A
4	Intentar moldear un rollo del grosor de una aguja gruesa para tejer:			
	a) moldeable, superficie opaca, consistencia harinosa;	5		
	b) moldeable, consistencia plástica, pegajosa;	6		
	c) no moldeable, se adhiere al dedo, se perciben granos de arena (>46% de arena).		Franco arcillo arenosa	CRA
5	Evaluar la consistencia:			
	a) adhesiva, harinosa, se agrieta fácilmente al presionar;		Franco limosa fina	CLf
	b) ligeramente harinosa, casi no se agrieta, muy moldeable;		Franco-arcillo-limosa	CHL
	c) granos de arena visibles y perceptibles, se agrieta al presionar.		Franca	C
6.	Evaluar la superficie de la muestra después de friccionarla con la uña del dedo:			
	a) superficie opaca o con brillo tenue, casi no se perciben granos de arena;		Franco arcillosa	CR
	b) superficie opaca a ligeramente brillante, granos de arena perceptibles;		Arcillo arenosa	RA
	c) superficie brillante.	7		
	Evaluar la consistencia entre los dientes:			
	a) rechina;		Arcillo limosa	RL
	b) consistencia de manteguilla.		Arcillosa	R

(Schlichting y Blume, 1966, modificado)

Triángulo de texturas

- A = arena
- C = franca
- L = limo
- R = arcilla



Pedregosidad

Al estimar la textura al tacto, también se reporta el material grueso en porcentaje de volumen (Vol.%), es decir, material de tamaños mayores que 2 mm, claramente visibles en la palma de la mano al hacer la prueba al tacto. También puede estimarse en la pared del perfil a través de la comparación con tablas como las que se presentan en el Anexo 2.

Además de señalar el porcentaje en volumen, también debe mencionarse el tamaño dominante y el tipo de partículas gruesas, apoyándose en la siguiente tabla:

Tamaño l (mm)	Formas angulares		Formas redondeadas		Formas angulares y redondeadas		Piroclastos	
	Denomi- nación	Clave	Denomi- nación	Clave	Denomi- nación	Clave	Denomi- nación	Clave
2-6.3	cantos finos	Cf	gravas finas	Gf			lapilli	La
>6.3 - 20	cantos medianos	Cm	gravas medianas	Gm			bombas y bloques	BoV BV
>20-63	cantos gruesos	Cg	gravas gruesas	Gg				
>63-200					pedras	P		
> 200					bloques	B		

La pedregosidad se evalúa con base en los criterios presentados en la siguiente tabla (Soil Survey Manual, 1993, modificado):

Vol%	Caracterización	Clase
< 2	ninguna limitación para la labranza	0
2-10	es posible realizar labranza en surcos	1
10-25	la labranza de cosechas escardadas es impracticable, pero pueden cultivarse pastos mejorados, vegetación arbustiva y árboles	2
25-50	impedimento a todo uso de maquinaria, excepto la muy liviana; uso para pastoreo o silvicultura	3
50-75	impedimento total al uso de maquinaria, uso para pastos pobres y silvicultura	4
> 75	pastos naturales y silvicultura	5

(fuente: Soil Survey Manual, 1993, modificado)

Color

El tono y la intensidad de los colores de los horizontes permiten hacer inferencias en relación con algunas características edáficas y procesos pedogenéticos. El color de un horizonte está determinado principalmente por los ácidos húmicos y fúlvicos y compuestos de hierro y, en menor medida, de manganeso (óxidos, hidróxidos, sulfuros). Por lo tanto refleja el contenido de materia orgánica, al igual que la existencia de procesos de oxidación o reducción en los suelos.

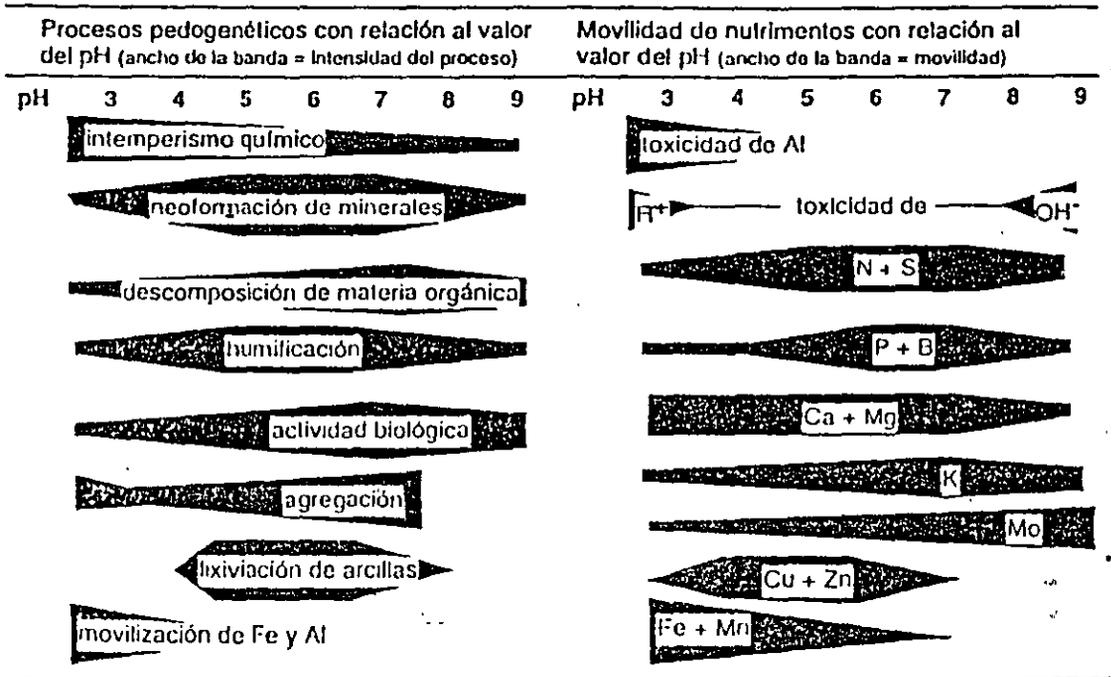
Su determinación en campo se realiza por medio de tablas de color (Standard Soil Color Charts). Para ello la muestra deberá humedecerse, para permitir la comparación de un horizonte con otro. La notación de las tablas de color es una designación sistemática con letras y números de las tres propiedades del color: matiz, pureza (de oscuro a claro) e intensidad, por ejemplo: 5YR 4/2: 5YR = matiz; 4 = pureza, 2 = intensidad.

En caso de presentar 2 o más colores en un horizonte, deberá reportarse cada color, y además deberán notificarse los respectivos porcentajes de cubrimiento. Se anotarán las siguientes características:

- Forma:**
- a) manchas o moteado
 - b) bandas
 - c) venas
 - d) nubes.
- Contraste:**
- a) tenuo: sólo se distinguen tras un examen detallado, los matices e intensidades de la matriz y del moteado son muy similares.
 - b) claro: el moteado es claramente perceptible, las diferencias entre la matriz y la mancha varían en uno o dos puntos de matiz y varias unidades en pureza o intensidad.
 - c) prominente: las motas son perceptibles obviamente. Matiz, pureza e intensidad entre matriz y manchas difieren en varias unidades.
- Abundancia:**
- a) escasas: < 2% de la superficie.
 - b) comunes: 2 a 20% de la superficie.
 - c) frecuentes: > 20 % de la superficie.
- Tamaño:**
- a) finas: < 5 mm.
 - b) medias: 5 a 15 mm.
 - c) gruesas: > 15 mm.
- Límite:**
- a) bien definido o abrupto: transición de color en menos de 1 mm.
 - b) claro: transición de color en menos de 2 mm.
 - c) diluso: transición de color en más de 2 mm.

Valor del pH o reacción del suelo

El valor del pH permite hacer inferencias con relación a la disponibilidad relativa de nutrientes y también controla importantes procesos pedogenéticos (Schroeder, 1969):



(fuente: Schroeder, 1969)

En el campo, el pH se mide generalmente con papel indicador o con un potenciómetro de campo. Para ello se le agregan a unos gramos de muestra de suelo aprox. el doble (relación suelo- solución 1:2.5) de agua destilada o de solución CaCl₂ 0.01 M. La determinación se realiza después de agitar la muestra y esperar por lo menos 15 minutos.

El valor pH se evalúa según el siguiente cuadro:

pH	3.0	4.0	5.0	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	
evaluación:	extre- mada- mente ácido	muy fuerte- mente ácido	fuerte- mente ácido	moderada- mente ácido	ligera- mente ácido	muy ligera- mente ácido	muy ligera- mente alcalino	ligera- mente alcalino	moderada- mente alcalino	fuerte- mente alcalino

Presencia de salinidad o sodicidad

La clasificación exacta de condiciones salinas, sódicas o salino-sódicas deberá efectuarse en el laboratorio. Sin embargo, es posible distinguir en el campo la presencia de sales mediante la observación del desarrollo de los cultivos, la identificación de especies herbáceas halófitas, el reconocimiento de eflorescencias de sales en la superficie o la observación de una costra superficial agrietada y de consistencia bofa.

En caso de contar con un conductímetro de campo, puede determinarse la conductividad eléctrica en el sobrenadante de una suspensión de 1 parte de suelo y 2.5 partes de agua destilada ($EC_{(1:2.5)}$). A partir de esta determinación puede estimarse la conductividad eléctrica en el extracto de saturación ($EC_{pF1.8}$) mediante la siguiente fórmula:

$$EC_{pF1.8} [dS/m] = EC_{(1:2.5)} [dS/m] \times 250 \times \text{densidad aparente} [g/cm^3] / CC [Vol\%]$$

donde $EC_{pF1.8}$: conductividad eléctrica en el extracto de saturación.

$EC_{(1:2.5)}$: conductividad eléctrica de la suspensión 1:2.5 de suelo en agua destilada.

La densidad aparente se estima según la tabla presentada en la pág. 25 y

CC equivale al contenido de humedad a capacidad de campo, mismo que se estima con ayuda de la tabla en la página 34.

De acuerdo con el desarrollo de los cultivos o a la conductividad eléctrica en el extracto de saturación pueden distinguirse las siguientes clases de salinidad:

Clase	Descripción	C.E. ¹⁾ [dS/m]	Clasificación FAO (1988)
0	Los suelos no muestran exceso de sales en forma de eflorescencias en la superficie del suelo o sobre los agregados. Prácticamente ningún cultivo muestra inhibición en su desarrollo o daños producidos por el exceso de sales.	0 - 4	
1	Suelos ligeramente afectados por salinidad o sodicidad. Los cultivos sensibles muestran inhibición en su desarrollo, mientras que los tolerantes no.	4 - 8	Fase salina
2	Suelos moderadamente afectados por salinidad o sodicidad. El desarrollo de los cultivos se inhibe y ningún cultivo crece bien.	8 - 16	
3	Suelos fuertemente afectados por salinidad o sodicidad. Sólo plantas halófitas sobreviven	>16	Propiedades sálidas

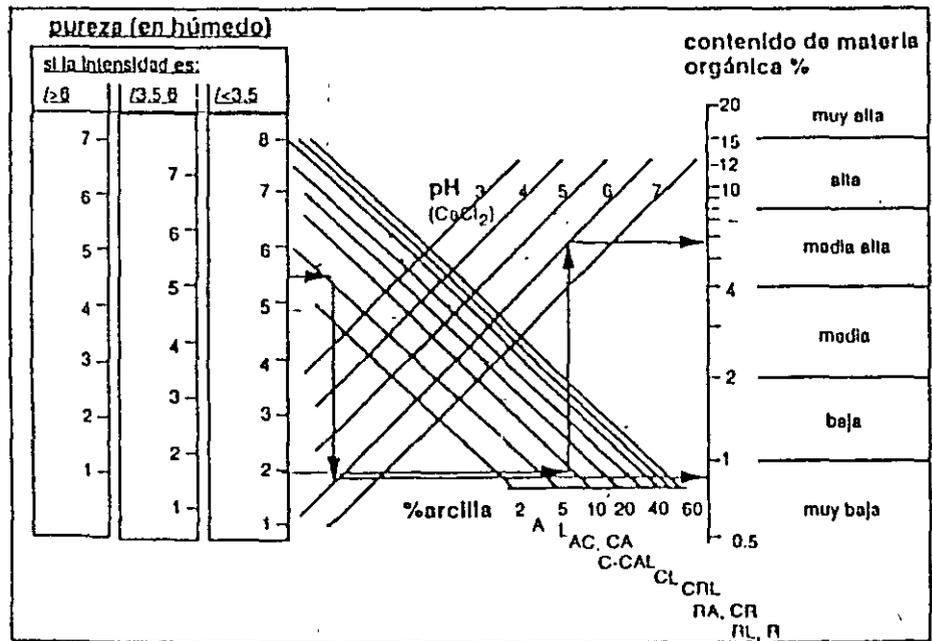
¹⁾C.E.: conductividad eléctrica en el extracto de saturación

La presencia de sodicidad (un porcentaje de sodio intercambiable mayor que 15 indica propiedades sódicas, según la clasificación FAO, 1988), puede inferirse en campo a través del valor del pH del suelo, el cual generalmente es mayor que 8.5 en caso de existir propiedades sódicas. También la presencia de una estructura débil o incluso falta de la misma, al igual que una baja conductividad hidráulica del suelo (ver pág. 37) son indicadoras en campo de la presencia de sodicidad.

Contenido de materia orgánica

El contenido de materia orgánica en horizontes superficiales puede estimarse aproximadamente considerando las siguientes variables: a) textura, b) pH y c) color (en húmedo). El color de un horizonte se origina, en gran parte, de la mezcla de sustancias húmicas (negras o pardo oscuro) y minerales de colores más claros. La acumulación de materia orgánica es mayor en condiciones ácidas que en condiciones neutras. Por lo tanto, la estimación del contenido de materia orgánica de los horizontes superficiales, puede hacerse con ayuda del siguiente nomograma, tomando en cuenta las siguientes aclaraciones:

1. No debe realizarse la estimación en horizontes subsuperficiales con bajos contenidos de materia orgánica, ya que esto llevará a resultados erróneos.
2. Si el material parental es de color oscuro (por ejemplo, basalto), la estimación llevará a una sobreestimación del contenido de materia orgánica.
3. Si el horizonte contiene cantidades significativas de pirita (FeS), también se sobrestimarán el contenido de materia orgánica. La presencia de pirita puede comprobarse al adicionar a la muestra unas gotas de ácido clorhídrico al 10%. Si se trata de pirita se percibirá un olor a huevos podridos (H₂S).



(fuente: Flaniger et al., 1987)

Los contenidos de materia orgánica se evalúan de la siguiente manera:

pH ácido → suelo (menor act.)

% M.O.	<1	2	4	8	15	30
Clave	(h)	h ^a	h	h	h	h ^h
Evaluación	muy baja	baja	media	media alta	alta	muy alta
						H
						extremadamente alta

h₁ h₂ h₃ h₄ h₅ (turba)

Contenido de carbonatos

En campo, el contenido de carbonatos se estima observando la efervescencia de la muestra al adicionar ácido clorhídrico (HCl) al 10%. La cuantificación solo es aproximada, ya que la intensidad de la reacción dependerá de varios factores, como textura, porosidad, distribución de los poros, humedad de la muestra, distribución de los carbonatos en la muestra (granos, recubrimientos, pseudomicelios) y tipo de carbonatos (calcita pura (CaCO_3), dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ o una mezcla de ambas).

En campo se le agregan unas gotas de HCl al 10% a una muestra de suelo humedecida (para no confundir la emisión de burbujas de aire con una efervescencia), y el contenido de carbonatos se estima evaluando la efervescencia de la siguiente manera (Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde, 1982):

Efervescencia	Evaluación	CaCO_3 [%]
reacción invisible e inaudible	libre de carbonatos	0
reacción audible, pero invisible	muy bajo (k')	0 a 0.5
reacción ligera, apenas visible	bajo (k)	0.5 a 2
efervescencia fuerte, pero breve	medio (k)	2 a 10
efervescencia fuerte y prolongada	alto (k)	10 a 25
	muy alto (kk)	25 a 50
	extremadamente alto (K)	>50

Humedad actual

La humedad actual representa el grado de saturación con agua (también referible como fuerza de succión) del suelo en el momento de hacer la descripción. Se puede estimar de acuerdo con la siguiente relación:

Oprimir la muestra	Formar una esfera	Humedecerla	Frotarla entre las palmas de las manos	Designación	-pF
se forma	no se pueda.....≡	se oscurece	no se aclara	muy seca	5
polvo≡		mucho≡			
no se forma	no se puede≡	se oscurece	se aclara	seca	4
polvo≡		un poco .≡	muy poco ≡		
no se forma	moldable (menos	no se	se aclara	fresca	3
polvo≡	arepas)≡	oscurece...≡≡		
adhesiva	al exprimirla brilla un	no se	se aclara	húmeda	2
.....≡	poco≡	oscurece ...≡	mucho≡		
tiene agua	fluye≡	no se	se aclara	mojada	1
libre≡		oscurece ..≡	mucho≡		

Estructura

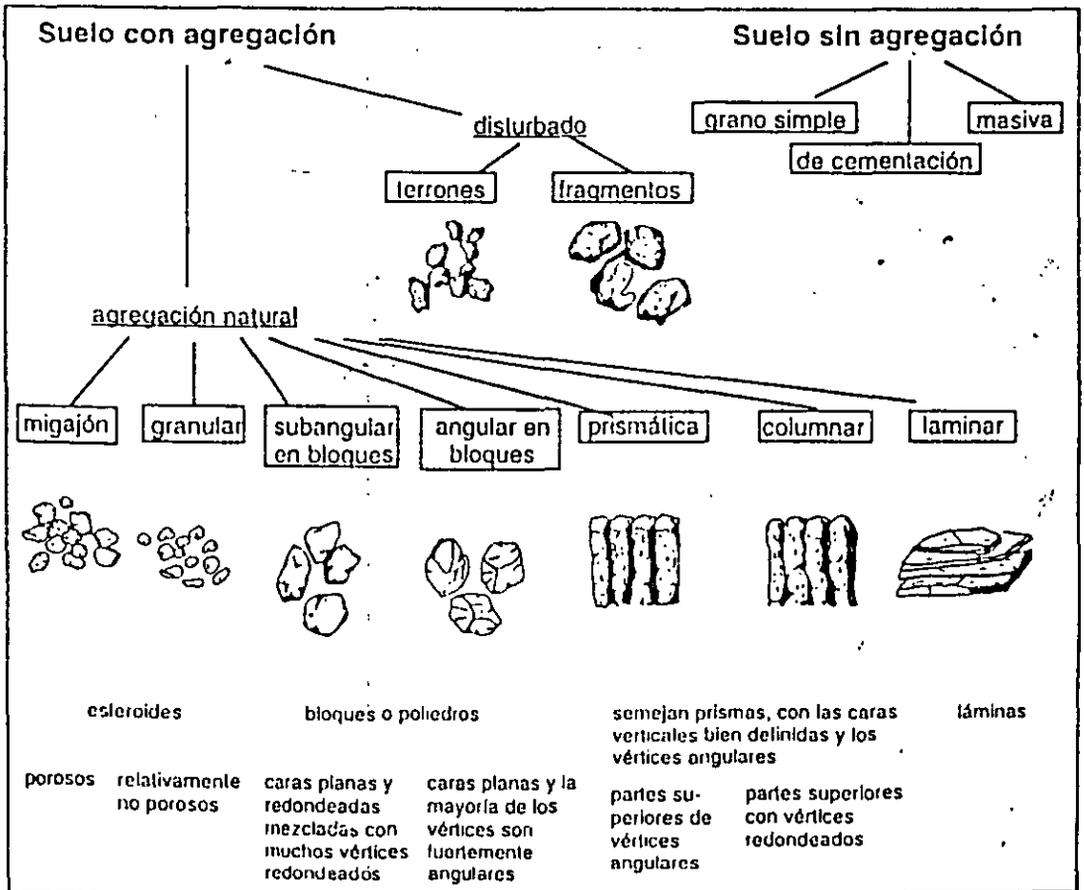
Estructura del suelo es un término que se refiere a la agregación de las partículas primarias en partículas compuestas. La estructura influye determinantemente en el balance hídrico y térmico, al igual que en la aireación de un suelo o, indirectamente, en la actividad biológica, el potencial de rendimiento y la erosionabilidad.

Un agregado natural (o ped) es producto de las interacciones de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los suelos, en contraste con un terrón, que es

producto de un disturbio (por ejemplo, labranza), o un fragmento, que se forma por la ruptura de la masa del suelo a través de superficies naturales lábiles (por ejemplo por efecto de procesos de congelamiento y deshielo). También difiere de una concreción o nódulo, debido a que estos últimos son producto de la concentración local de compuestos que cementan irreversiblemente un conjunto de granos.

En el campo sólo es posible describir la macroestructura. La microestructura se analiza en láminas delgadas a través del análisis microscópico en el laboratorio.

Al describir la estructura en campo se hace referencia a la morfología y distribución mutua (tipo) de los agregados, su tamaño (clase) y su grado de desarrollo o agregación. En el diagrama adjunto se esquematizan y describen los tipos de estructura:



Los tamaños de los agregados (en mm) se refieren según las siguientes clases también las láminas en el Anexo 3):

Clase	Laminar	Prismática	Columnar	Angular en bloques	Subangular en bloques	Granular	Migajón
				[mm]			
muy fina	<1	<10	<10	<5	<5	<1	<1
fina	1-2	10-20	10-20	5-10	5-10	1-2	1-2
media	2-5	20-50	20-50	10-20	10-20	2-5	2-5
gruesa	5-10	50-100	50-100	20-50	20-50	5-10	5-10
muy gruesa	>10	>100	>100	>50	>50	>10	>10

Los términos usados para definir el grado de la estructura son los siguientes:

- 0: **sin agregación:** no se observa agregación u ordenamiento alguno. Se dice masiva, cuando es coherente, y de grano simple, cuando no es coherente.
- 1: **débil:** peds vagamente formados, difíciles de distinguir. Cuando se disturba este material, se obtiene una mezcla de peds enteros con mucho material no agregado. Este grado puede subdividirse en muy débil y moderadamente débil.
- 2: **moderado:** peds bien formados y nítidos, pero moderadamente durables. Cuando se disturba este material, se obtienen numerosos peds enteros, algunos quebrados y poco material no agregado.
- 3: **fuerte:** peds bien formados y durables. Cuando se disturba este material, se obtienen principalmente peds enteros, pocos quebrados y ningún material no agregado. Este grado puede subdividirse en moderadamente fuerte y muy fuerte.

Rasgos pedológicos

En este rubro se describen todo tipo de rasgos observables, ya sea en las superficies de los agregados, en grietas, poros o canales, por ejemplo: cubiertas sobre agregados (revestimientos o cutanes), nódulos o concreciones, superficies de deslizamiento o fac de fricción - presión (slickensides), cementación, alforamientos de sales, evidencias de actividad biológica (por ejemplo, crotovinas, excrementos), artefactos, etc... Se recomienda hacer mención de la cantidad, grosor, tipo y localización (en el caso de revestimientos), y del tamaño y material (nódulos), siguiendo las siguientes indicaciones:

a) Revestimientos (o cutanes)

Cantidad: en manchas o zonas definidas, quebrados (en muchos pero no en todos los agregados), continuos (en todos los agregados).

Grosor: delgados, moderados, gruesos

Tipo: pura arcilla (raros), arcillas con óxidos de Fe, arcillas con materia orgánica, sesquióxidos, óxidos o hidróxidos de manganeso, sales solubles (carbonatos, sulfatos, cloruros), sílice.

Localización: en caras horizontales y verticales de agregados, formando puentes entre granos o agregados, en poros o en canales de raíces.

Ejemplo de una descripción de revestimientos: revestimientos continuos, moderadamente gruesos, probablemente de arcillas con materia orgánica, en caras verticales y horizontales de agregados.

b) Cementación

Este término se usa para describir la cementación del suelo por materiales que no sean arcillas (por ejemplo: carbonato de calcio, sílice, óxidos e hidróxidos de Fe y Al, yeso). La cementación generalmente persiste al humedecimiento, por lo menos si este no es prolongado. Se diferencian tres grados de cementación:

cementado débil: la masa cementada es frágil y dura, pero puede quebrarse con las manos.

cementado fuerte: la masa cementada es frágil y no puede quebrarse con las manos, pero sí con un martillo.

endurecido: frágil, no se suaviza con humedecimiento prolongado, es tan extremadamente duro que sólo puede quebrarse con un golpe muy fuerte con un martillo.

c) Nódulos (o concreciones)

Los nódulos son acumulaciones locales de ciertos compuestos químicos, endurecidas, que forman granos o nódulos de diferentes tamaños, formas y colores. Ejemplos: acumulaciones locales de calcita (carbonatos de calcio) y de óxidos de hierro y manganeso. La descripción deberá incluir información sobre abundancia, tamaño, dureza, forma, color y naturaleza, según las siguientes especificaciones:

abundancia:	muy pocos (< 5% vol.)	tamaño:	pequeños (< 1mm de diámetro)
	pocos (5 - 15% vol.)		grandes (> 1 mm de diámetro)
	frecuentes (15-40% vol.)	dureza:	suaves (se quiebran con la uña)
	muy frecuentes (40-80% vol.)		duros (no se quiebran)
	dominantes (> 80% vol.)	forma:	esférica, irregular, angular
color:	negro, rojo, blanco	naturaleza:	Fe-Mn, calcita, gibsita, etc.

d) Afloramientos de sales (o eflorescencias)

Se describe su tipo y su forma:

Tipo: carbonato de calcio, yeso, cloruro de sodio, etc...

Forma: películas sobre agregados, pseudomicelios, costras, venas finas, nódulos, nidos.

e) Evidencia de óxido-reducción (o hidromorfismo)

En caso de presencia de manchas o motas resultantes de condiciones alternas de reducción y oxidación se describirá su ubicación (exterior o interior de los agregados, paredes de canales de raíces o poros gruesos), su forma, contraste en color, abundancia, tamaño y límite (ver lo especificado para la descripción del color del suelo).

Procesos de reducción intensos (para la adjudicación de propiedades gleyicas o stagnicas, según la clasificación FAO, 1988); pueden reconocerse en campo al adicionar unas gotas de las siguientes sustancias sobre la cara de un agregado tomado de la cara del perfil recientemente quebrado y observar la siguiente reacción:

aparición de un color azul oscuro sólido al adicionar una solución acuosa de ferrocianuro de potasio ($K_3Fe(III)(CN)_6$) al 1%, o

aparición de un color rojo fuerte al adicionar una solución de α,α dipiridilo al 0.2% en ácido acético.

f) Presencia de superficies de deslizamiento (o facetas de fricción-presión)

Se les llama superficies de desliz o facetas de fricción-presión a las superficies brillosas de los agregados producto del alineamiento de las arcillas de la masa basal de los agregados en el proceso de expansión y contracción de las mismas, al humedecerse y desecarse el suelo.

g) Presencia de aluminio "activo"

Se denomina aluminio activo a aquél proveniente de minerales secundarios de bajo orden estructural (alofano, Imogollita) y de óxidos e hidróxidos amorfos de aluminio, todos ellos neoformaciones características de suelos desarrollados a partir de materiales volcánicos (ricos en vidrio y otros minerales fácilmente intemperizables), predominante-mente bajo climas húmedos. La presencia de aluminio activo es indicadora para la determinación de propiedades ándicas, característica de los Andisoles (FAO, 1988). Se puede evaluar cualitativamente en campo al depositar un poco de material de suelo sobre un pedazo de papel filtro y añadirle, primero, unas gotas de indicador de fenoltaleína al 1% y, después, unas gotas de fluoruro de sodio (NaF) 1 N (Fieldes y Perrott, 1966). El fluoruro tiene una gran afinidad al Al activo y reemplazará a los grupos OH asociados a éste, de manera que el pH ascenderá a valores mayores de 8.2. Si hay Al activo en cantidades importantes, la muestra se tornará de color quinda.

Estabilidad de agregados

La estabilidad de los agregados determina, por un lado, la penetrabilidad de las raíces y, por otro, la resistencia a la destrucción y, consecuentemente, a su erosionabilidad por viento o agua.

En el campo se evalúa depositando aprox. 10 agregados de diámetro entre 1 a 3 mm en una cápsula de porcelana y saturándolos con agua. Tras hacer rotar suavemente durante 30 segundos la cápsula en la palma de la mano, se evalúa el grado de descomposición de los agregados, según la siguiente relación (Schlichling y Blume, 1966):

Grado de descomposición	Evaluación
No hay descomposición o solo fragmentos grandes	Muy alta
Dominan los fragmentos grandes sobre los pequeños	Alta
Igual número de fragmentos grandes y pequeños	Mediana
Dominan los fragmentos pequeños sobre los grandes	Moderada
Sólo fragmentos pequeños y turbidez notable del agua	Baja
Descomposición total y alta turbidez del agua	Muy baja

Poros

Este rubro incluye todo tipo de poros, grietas, canales de lombrices y raíces etc. Todos ellos son de importancia para el drenaje interno y la aireación del suelo. Debe describirse su abundancia, tamaño dominante, distribución y forma, para lo cual se utiliza una lupa:

Abundancia:

pocos: 1 a 50 por dm²
 comunes: 51 a 200 por dm²
 muchos: más de 200 por dm²

Tamaño:

micro: < 0.075 mm
 muy finos: 0.075 a 1 mm
 finos: 1 a 2 mm
 medianos: 2 a 5 mm
 gruesos: > 5 mm

Distribución:

dentro de agregados: la mayoría de los poros está dentro de los agregados (inped).
 fuera de los agregados: la mayoría de los poros está entre las caras de los agregados, por ejemplo, entre las interfaces entre agregados (exped).

Forma:

vesiculares: aprox. esféricos, no elongados
 interestriciales: de formas irregulares
 tubulares: aprox. cilíndricos

Densidad aparente

La densidad aparente es un criterio importante para la evaluación del balance hídrico y de nutrientes de un suelo, y determinante con relación a la permeabilidad y profundidad fisiológica.

La densidad aparente es la medida en peso del suelo secado a 105 C por unidad de volumen (g/cm^3). Difiere de la densidad real en el sentido de que incluye al espacio poroso.

Su determinación se realiza al tomar muestras sin perturbar con pequeños cilindros de 100 mL y secarlas a 105 C en el laboratorio. En campo se puede sacar un monolito de un volumen determinado y llenar el espacio creado con agua, después de haberlo recubierto con una bolsa de plástico. El volumen se determina vaciando el agua en una probeta y midiéndola. El suelo removido se pesa en una báscula de campo y una alícuota del mismo se lleva al laboratorio para la determinación de humedad.

En caso de no contar con la posibilidad de secado de muestras, la densidad aparente sólo puede determinarse semi-cuantitativamente en la pared del perfil, según la siguiente tabla:

Característica: (válido para suelos secos)	densidad aparente [g/cm^3]			evaluación
	arenas y limos	francos	arcillosos	
El cuchillo sólo se puede introducir bajo fuerzas mayores, la muestra casi no se desmorona.	>1.9	> 1.8	>1.6	alta
El cuchillo sólo se introduce con dificultad 1 a 2 cm en el suelo, la muestra se desmorona en pocos fragmentos que sólo se pueden partir con dificultad.	1.8	1.6	1.4	mediana
El cuchillo se puede introducir en el suelo con poco esfuerzo, la muestra se desmorona en pocos fragmentos, los cuales pueden partirse en fragmentos más pequeños con la mano.	1.6	1.4	1.2	
Al presionar suavemente, el suelo se desmorona en muchos fragmentos.	1.4	1.2	1.0	baja
La muestra se desmorona totalmente al tomarla, se ven muchos poros gruesos y muy gruesos.	1.2	<1.0	-	

Notas: 1) En caso de que el contenido de materia orgánica sea mayor que 2%, la densidad aparente estimada deberá reducirse en $0.03 \text{ g}/\text{cm}^3$ por cada punto porcentual de materia orgánica.

2) En caso de presencia de aluminio activo, consistencia grasosa del suelo y tixotropía (desintegración súbita del agregado al presionarlo entre los dedos pulgar e índice), la densidad aparente deberá reducirse entre 0.2 y $0.5 \text{ g}/\text{cm}^3$, según la intensidad a la reacción al aluminio activo.

Profundidad y densidad de raíces

La profundidad de raíces se reporta en dm^2 y se incluyen todos los horizontes en los cuales se observen más de 1 raíz fina (diámetro $< 2 \text{ mm}$) por dm^2 . La intensidad de raíces se evalúa contando las raíces finas en un área representativa dentro de un horizonte de 1 dm^2 :

Raíces finas / dm^2	Clasificación
<1	nula
1-2	muy baja
3-5	baja
6-10	mediana
11-20	alta
21-50	muy alta
>50	extremadamente alta

Límite entre horizontes

Los límites de los horizontes se describen en cuanto a su claridad y de acuerdo con la topografía que presentan:

<u>claridad:</u>	abrupto ($<2 \text{ mm}$)	<u>topografía:</u>	uniforme
	claro (2-5 mm)		ondulado
	gradual (5-12 mm)		irregular
	difuso ($> 12\text{mm}$)		quebrado

- a Acumulación de materia orgánica bajo condiciones temporales de saturación de agua, pero durante períodos más cortos que los necesarios para el desarrollo de un horizonte H (por ejemplo: Aa = Anmoor).
- b Horizonte enterrado o fósil (por ejemplo: Btb).
- c Acumulación de concreciones, generalmente se usa en combinación con orto sulijo, que indique la naturaleza de las concreciones.
- e Horizonte que muestra eluviación moderada (menos que E) de arcillas, compuestos orgánicos, hierro y aluminio (por ejemplo: Ae).
- f Fermentación de la materia orgánica (por ejemplo: Of).
- g Horizonte moteado, que indica diferencias en condiciones de óxido-reducción (por ejemplo: Bg, Btg, Cg).
- h Acumulación de materia orgánica en horizontes minerales (por ejemplo: Ah, Bh). Solo se usa si el horizonte no presenta disturbios por uso de arado, pastoreo u otra actividad antrópica (por lo tanto los sulijos h y p (ver abajo) son excluyentes mutuamente).
- j Presencia de jarosita (por ejemplo, en un horizonte sulfúrico).
- k Acumulación de carbonatos de calcio.
- m Horizonte fuertemente cementado, consolidado, endurecido. Este sulijo generalmente se usa en combinación con otro que indique la naturaleza del material cementado (por ejemplo: Cmk = horizonte petrocálcico dentro de un horizonte C; Bms: horizonte plácico, es decir espódico endurecido).
- n Acumulación de sodio (por ejemplo: Btn = horizonte nátrico).
- o Alteración *in situ* muy avanzada, dominancia de la fracción de arcilla y de arena rica en cuarzo; la arcilla mineral dominante es la caolinita. Igualmente dominan los sesquióxidos de hierro y aluminio (por ejemplo, la gibsita y hematita).
- p Horizonte disturbado por arado u otras labranzas (por ejemplo, Ap).
- q Acumulación de sílice (Cmq).
- r Fuerte reducción como resultado de condiciones anóxicas prolongadas (por ejemplo, por agua freática (Cr)).
- s Acumulación de sesquióxidos (por ejemplo: Bs = horizonte espódico).
- t Acumulación de arcillas por iluviación (por ejemplo, Bt = horizonte árgico).
- u No especificado.
- v Horizonte con fuerte carácter vértico (resultado de la presencia de arcillas expandibles. Muestra facetas de fricción-presión).
- w Alteración *in situ* reflejada en mayores contenidos de arcilla, color más rojizo y presencia de estructura, en comparación con el horizonte subyacente (por ejemplo: Bw).
- x Ocurrencia de un fragipan (por ejemplo, Btx).
- y Acumulación de yeso (por ejemplo: Cy).
- z Acumulación de sales de mayor solubilidad que el yeso (Az, Ahz).

Los sulijos pueden usarse para describir horizontes diagnósticos, pero se hace énfasis en que el uso de alguna designación de horizonte en una descripción de perfil no necesariamente asume la presencia de un horizonte diagnóstico, ya que los símbolos simplemente reflejan una estimación cualitativa.

Horizontes designados con una misma combinación de letras pueden subdividirse verticalmente con sulijos numéricos, comenzando de la superficie (por ejemplo: Bt1, Bt2, Bt3).

Cuando es necesario distinguir entre discontinuidades litológicas, los números se usan como prelijos (por ejemplo, cuando el horizonte C es de material diferente que el del cual se formaron los horizontes sobreyacentes, la secuencia podría ser: A, B, 2C, 3C).

4. Nomenclatura y designación internacional de horizontes

La nomenclatura que se presenta a continuación se basa en la propuesta por FAO (1988) y se agregaron algunos sufijos propuestos por el Soil Survey Manual (1993) y otros por los autores.

Los horizontes principales se designan con letras mayúsculas:

- H Horizonte orgánico, producto de la acumulación de materia orgánica depositada en la superficie bajo condiciones de saturación de agua durante períodos largos (a menos que el sitio se encuentre drenado artificialmente); contiene más de 30% de materia orgánica, si sus contenidos de arcilla en la fracción mineral son mayores que 60%, o, 20% de materia orgánica, si la fracción mineral no contiene arcilla, o contenidos intermedios de materia orgánica en caso de contenidos de arcilla intermedios a los mencionados.
- O Horizonte orgánico, producto de la acumulación de materiales orgánicos depositados en la superficie, que no se encuentra saturado con agua por períodos mayores a pocos días por año y que contiene más de 35% de materia orgánica.
- A Horizonte mineral de superficie que muestra acumulación de materia orgánica humificada, o cuya morfología es producto de pedogénesis, pero sin las características de los horizontes E o B.
- E Horizonte mineral que muestra una acumulación de partículas de las fracciones de limo y arena ricas en minerales resistentes, es el resultado de una eluviación de arcillas, hierro y aluminio o una combinación de éstas.
- B Horizonte mineral que carece de estructura rocosa (o por lo menos no es evidente) y que se caracteriza por una o más de las siguientes propiedades:
 - a) muestra una iluviación de arcillas, hierro, aluminio o humus, sola o en combinaciones;
 - b) tiene una concentración residual de sesquióxidos con relación al material parental;
 - c) muestra una alteración de las condiciones originales del material parental con respecto a que presenta neoformación de arcillas y óxidos de Fe y Al, además de formación de estructura granular, en bloques o prismática.
- C Horizonte o capa mineral no consolidado, a expensas del cual se forman los horizontes A y B, y que carece de propiedades características de los demás horizontes principales.
- R Roca consolidada subyacente.

Los horizontes transicionales, es decir, aquéllos que muestran características propias de dos horizontes principales, se designan con la combinación de dos mayúsculas, por ejemplo, AE, AB, BE, BC, AC, donde la primera letra señala al horizonte cuyas características dominan.

Las subdivisiones de los horizontes principales se designan con letras minúsculas utilizadas como subíndices y que hacen alusión a la naturaleza esencial. Estos sufijos pueden combinarse para indicar propiedades que ocurren conjuntamente en un horizonte, pero normalmente no exceden de dos. En los horizontes transicionales no se usan sufijos característicos de una sola de las letras mayúsculas, pero sí se puede indicar en caso de que un sufijo sea característico para las dos mayúsculas (BCk, ABg).

Ejemplos de secuencias de horizontes de algunas de las principales unidades de suelo

Fluvisol eutrípico	Ah-C1-Ab-C2-C3
Fluvisol calcárico	Ap-Ck1-Ab-Ck2- C3
Gleysol eutrípico	Ah-Bg1-Bg2-Cg
Regosol dístico	Ap-C1-C2
Leptosol réndzico	Ah-mCk
Andosol mólico	Ah-Bw-Cw-C
Vertisol eutrípico	Ap-A-AC-C1-C2
Cambisol calcárico	Ah-AB-Bwk-Cw-C
Gypsisol eutrípico	Ah-AB-Bly-Cy
Feozem calcárico	Ap- Ahk1-Ahk2-C
Luvisol albico	Ap-E-Bt1-Bt2-Ct
Planosol mólico	Ah-E-Btg1-Btg2-Cg
Podzol háplico	Ah-E-Bhs-Bs-BC-C

5. Principales tipos de mantillo en suelos forestales

Las manifestaciones morfológicas típicas del humus de los suelos y su distribución en profundidad se conocen como tipos de mantillo. A través de su descripción con métodos sencillos de campo pueden hacerse importantes inferencias acerca del balance de nutrimentos en el sitio así como su dinámica. Para cada tipo de mantillo se distinguen horizontes orgánicos de material depositado en la superficie (horizontes L y O) y un horizonte mineral rico en materia orgánica (horizonte Ah).

Los diferentes tipos de mantillo se distinguen por la actividad biológica que presentan, la dinámica de la descomposición de la hojarasca, el tipo de sustancias húmicas que los componen y la secuencia, espesor y estructura de sus horizontes. Los mantillos típicos son Mull, Mor y Moder, presentándose diversas transiciones entre éstos dependiendo de las condiciones específicas en cada sitio. Modalidades distintas a las típicas se encuentran especialmente bajo condiciones semi-terrestres o en sitios con drenaje deficiente. En estos casos el horizonte Oh generalmente se encuentra más desarrollado. Bajo condiciones de saturación de agua se presentan transiciones hacia las turberas (horizontes hísticos).

Mull:

Secuencia de horizontes: L - (Of) - Ah. Los horizontes orgánicos sobre la superficie son de espesores muy pequeños o incluso están ausentes en ciertos periodos, en caso de que la descomposición biológica sea muy eficiente. Si falta el horizonte Of, el espesor del horizonte Ah es generalmente mayor de 8 cm, si está presente un horizonte Of, el horizonte Ah generalmente presenta espesores menores a 10 cm (a menudo de 5 a 7 cm). La estructura del horizonte Ah es generalmente de migajón o granular, su contenido de materia orgánica es alto y la densidad de raíces es muy alta. Generalmente se presenta una alta actividad biológica y su balance de nutrimentos se considera eutrófico con una reacción ligeramente ácida a neutra y una relación C/N menor a 18.

Mor:

Secuencia de horizontes: L - Of - Oh - Ah. Los horizontes orgánicos sobre la superficie son varios y están presentes en todo el año, su espesor varía entre 2 y 8 cm. El espesor de los horizontes orgánicos generalmente es menor que el del horizonte Ah. Los límites entre horizontes son generalmente difusos, es difícil separar claramente al horizonte Ah del horizonte orgánico sobreyacente. En el horizonte Of los restos vegetales disminuyen con la profundidad mientras que las sustancias humificadas aumentan y presenta una laminación tenue. El horizonte Oh muestra una alta densidad de raíces muy finas. La actividad de la meso y macrofauna es moderada y la descomposición de la hojarasca es lenta. El balance de nutrimentos se considera mesotrófico, la reacción es ácida y la relación C/N está entre 18 y 29.

Moder:

Secuencia de horizontes: L - Of - Oh - (Ah) ó (Ae). Los horizontes orgánicos sobre la superficie son varios y están presentes en todo el año, su espesor es generalmente mayor que el del horizonte Ah, los límites entre horizontes son claros y los horizontes son fácilmente separables. El horizonte Oh se deja partir en fragmentos angulosos y presenta laminación muy fina. Muestra una mayor densidad de raíces gruesas que mantillos de tipo mor. La meso y macrofauna está casi ausente. La descomposición de la hojarasca es muy lenta y ocurre principalmente en los horizontes superficiales. Se favorece la formación de sustancias húmicas móviles que pueden ser translocadas con el agua que se infiltra en el

perfil. El balance de nutrimentos se considera como oligotrófico, la reacción es fuertemente ácida, los contenidos de P, N y Ca son bajos y la relación C/N es mayor a 29.

En el siguiente cuadro se presenta un resumen de las principales características de los tres tipos de mantillo:

tipo de mantillo	Mull	Mor	Moder
secuencia de horizontes	L - (Oh) - Ah	L - (Of) - Oh - Ah	L - Of - Oh - (Ah)
requisitos para su formación	hojarasca de descomposición rápida	hojarasca de descomposición lenta o baja actividad de organismos que mezclen	hojarasca de descomposición lenta, alta humedad
descomposición de la hojarasca	++	+	-
mineralización	+		-
espesor de los horizontes orgánicos	muy bajo, muchas veces ausentes	2 a 8 cm, < Ah	> Ah
morfología de los horizontes O	generalmente ausentes	coherentes, límites difusos	angulosos, fragmentables, límites claros
reacción	neutra	ácida	fuertemente ácida
relación C/N	10 - 17	18 - 29	> 29
balance de nutrimentos	+		-

6. Evaluación edafo- ecológica del sitio

A continuación se presenta una serie de tablas y nomogramas a partir de los cuales pueden estimar parámetros físicos y químicos relacionados con balance hídrico, aireación y de nutrimentos de los suelos, al igual que una serie de tablas para la evaluación de su capacidad filtro y amortiguadora. La evaluación de cada parámetro se realiza de una forma general, con el fin de crear un marco de comparación para suelos desarrollados a partir de diferentes materiales parentales y en condiciones climáticas y topográficas distintas, al igual que con diferentes usos de suelo. Para fines de planeación y de evaluación de tierras para usos específicos (agrícola, forestal, etc...) la evaluación deberá hacerse bajo consideración de las demandas particulares de cada cultivo o uso del suelo.

Profundidad de desarrollo

La profundidad de desarrollo señala al espesor del suelo sobre el material parental no intemperizado. También se conoce por el nombre de solum. Los horizontes A y B forman parte del solum, mas no los horizontes R. Los horizontes Cw pueden formar parte del solum, si las raíces pueden llegar a desarrollarse en ellos, es decir, si no están compactados ni cementados y si su contenido de piedras es menor que 70%.

Profundidad fisiológica

La profundidad fisiológica señala al espesor del suelo en el que pueden penetrar y desarrollarse potencialmente las raíces. Puede abarcar como máximo al espesor de la profundidad de desarrollo, pero puede estar restringida, además del lecho rocoso, por:

- cambios abruptos de propiedades químicas de un horizonte a otro: por ejemplo, pH, presencia o ausencia de carbonatos, cambios drásticos en el contenido de nutrimentos, etc.)
- horizontes bajo condiciones de reducción;
- horizontes con capacidades de aireación y agua aprovechable muy bajas;
- horizontes compactados o cementados;
- pedregosidad de 70% o más;
- estructura desfavorable (por ejemplo: laminar, columnar y prismática, en ese orden).

La profundidad fisiológica se evalúa de la siguiente manera (Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde, 1982):

Profundidad	<20	40	80	>130	
			[cm]		
Evaluación	muy somero	somero	mediano	profundo	muy profundo

Penetrabilidad de raíces

La penetrabilidad de raíces denota las posibilidades reales que tienen las raíces de desarrollarse en un horizonte. Limitativas de la misma son pedregosidades y densidades aparentes altas, la escasez de poros gruesos y la presencia de estructura desfavorable (laminar, columnar y prismática, en ese orden). La evaluación se basa en la descripción de la densidad de raíces (ver pág. 26) según la siguiente tabla:

Evaluación	Limitaciones
Muy buena	No hay.
Buena	Pedregosidad baja y densidad aparente mediana.
Mediana	Estructura desfavorable (prismática o angular en bloques gruesa y fuerte) o pedregosidad mediana.
Deficiente	Presencia de varias limitaciones.
Ausente	Límite de la profundidad fisiológica.

pH acidos
[Sales altas]

Porosidad y retención de agua

Los suelos, como también los sedimentos y la mayoría de las rocas, contienen diferente número de poros de diámetros variados, dependiendo de su textura, densidad aparente estructura y contenido de materia orgánica. Los poros se encuentran ya sea llenos de aire o agua, según su diámetro y el balance hídrico del sitio. La retención de agua en los suelos se comporta según las leyes de capilaridad y de adsorción a superficies fijas, de manera que cuanto más estrecho sea un capilar, más alto subirá el agua dentro de él y más grande será la fuerza con la que el agua sea retenida. Para que la planta pueda tomar agua del suelo, deberá aplicar fuerzas de succión mayores a las fuerzas de retención con las que el agua se encuentra adsorbida al suelo.

Si la totalidad del espacio poroso (VPT) se encuentra saturada de agua, el suelo se encuentra a capacidad máxima de retención de agua. Los poros gruesos (de un diámetro equivalente a más de 50µm se drenan por gravedad en tiempo muy breve (mientras el suelo no se encuentre bajo influencia del manto freático) y el espacio relativo que ellos ocupan se denomina "capacidad de aireación" (CA). La cantidad de agua restante en los poros de diámetros menores a 50µm es retenida con tensiones equivalentes a pF 1.8 y se denomina capacidad de campo (CC).

El pF se refiere al logaritmo sobre base 10 de la presión medida en cm de columna de agua, donde p= potencial y F = energía libre del agua.

La cantidad de agua que el suelo puede proporcionar a las plantas se denomina agua disponible (dCC) o rango de humedad aprovechable. Esta se encuentra en poros de diámetros entre 50 y 0.2µm. El agua retenida en poros menores a 0.2 µm no puede ser absorbida por la mayoría de las plantas y se denomina "agua muerta" o punto de marchitez permanente (PMP). En estos poros el agua es retenida a pF de 4.2.

Por lo tanto:

$$VPT = CA + dCC + PMP$$

$$CC = VPT - CA \text{ o } dCC + PMP$$

$$dCC = CC - PMP$$

Distribución de poros y funciones:

Diámetro [m]	Tensión [pF]	Tipo de poros	Función	Denominación		
> 50	< 1.8	Gruesos	Drenaje rápido	Capacidad de aireación (CA)		
50-10	1.8-2.5	Medianos	Drenaje lento	Capacidad de agua disponible (dCC)	Capacidad de campo (CC)	Totalidad del espacio poroso (VPT)
10 - 0.2	2.5 - 4.2	Finos	Agua disponible para las plantas	Agua muerta (PMP)		
< 0.2	>4.2	Muy finos				

Determinación del balance hídrico y de la distribución de los poros

Los valores correspondientes a VPT, CC, dCC y CA pueden inferirse a partir de la ρ_a de cada horizonte con las tablas que se presentan a continuación (Krahmer *et al.*, 1995). Ya que el contenido de materia orgánica y la densidad aparente también influyen sobre la distribución de los poros, deben hacerse correcciones correspondientes. Los valores de corrección para contenidos altos de materia orgánica se leen en la segunda tabla.

textura ¹⁾	VPT [Vol%]			CA [Vol%]			dCC [Vol%]			CC [Vol%]		
	densidad aparente			densidad aparente			densidad aparente			densidad aparente		
	b	m	a	b	m	a	b	m	a	b	m	a
Ag	44	38		24	19		17	16		20	19	
Am	42	36		28	25		9	8		14	11	
Al	44	34		18	10		22	20		26	24	
A	46	38	34	24	22	19	16	11	11	22	16	15
AC	46	39	33	18	16	12	20	16	14	28	23	21
CA	45	38	32	11	9	7	24	20	17	34	29	25
L	49	42		8	5		28	26		41	37	
CL	50	41	36	9	7	4	27	24	21	41	34	32
C	48	40	33	8	7	5	20	15	13	40	33	28
CRA	49	41	34	4	3	3	15	12	10	45	37	31
CRL	49	42	36	7	6	4	20	16	14	42	36	32
CR	50	42	36	5	4	3	16	12	9	45	38	33
R	57	45		3	3		16	12		54	42	
RA	50	42	35	5	4	3	16	12	9	45	38	32
RL	52	43	37	4	4	3	15	11	7	48	39	34

VPT: volumen total de poros CA: capacidad de aireación dCC: capacidad de agua disponible

CC: Capacidad de campo

Densidad aparente: b: baja m: media a: alta

Textura arenosa: g: gruesa (2-0.63 mm) m: mediana (0.63-0.2 mm) f: fina (0.2-0.06 mm)

¹⁾ Claves de texturas de la pág. 15.

Factores de corrección para contenidos altos de materia orgánica (Krahmer *et al.*, 1995):

Arcilla [%]	M.o. [%]	VPT	CA [Vol%]	dCC	CC	Arcilla [%]	M.o. [%]	VPT	CA [Vol%]	dCC	CC
<5	h2	0	-1.5	+0.5	+1.5	17-35	h2	+3.0	+0.5	+0.5	+2.5
	h3	+2.5	-1	+1	+3.5		h3	+5.5	+1.5	+1.5	+4
	h4	+6.5	-1	+3	+7.5		h4	+13	+3	+4	+10
	h5	+10	0	+3.5	+10		h5	+19	+5	+7	+14
5-12	h2	+1.5	0	+0.5	+1.5	35-65	h2	+3	+0.5	+1	+2.5
	h3	+4.5	+1	+1.0	+3.5		h3	+6.5	+1.5	+2.5	+5
	h4	+10	+2	+3.0	+8		h4	+13.5	+2.5	+5.5	+11
	h5	+14.5	+2.5	+4.0	+12		h5	+19.5	+4.5	+10	+15
12-17	h2	+2	+0.5	+0.5	+1.5	>65	h2	+3.5	0	+2	+3.5
	h3	+5	+1.5	+1	+3.5		h3	+7.5	0	+5	+7.5
	h4	+11.5	+2.5	+3.5	+9		h4	+14	+1	+11	+13
	h5	+17.5	+5.5	+4.5	+12		h5	+20	+2	+16	+18

VPT: volumen total de poros CA: capacidad de aireación dCC: capacidad de agua disponible

CC: Capacidad de campo

M. o.: materia orgánica

$$\left. \begin{array}{l} h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{array} \right\} \rightarrow m.o. = 1\%$$

$$\left. \begin{array}{l} h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{array} \right\} \rightarrow m.o. = 2-4\%$$

$$\left. \begin{array}{l} h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{array} \right\} \rightarrow m.o. = 4-8\%$$

$$\left. \begin{array}{l} h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{array} \right\} \rightarrow m.o. = >8\%$$

Para la evaluación las lecturas obtenidas en porcentajes de volumen (%Vol) deben transformarse a L/m^2 de suelo. Para ello primeramente deben relacionarse al suelo fino, libre de gravas y piedras, multiplicando el valor obtenido de las tablas con el factor

$$(100 - \%Vol. \text{ piedras}) / 100$$

ya que las gravas y piedras reducen el espacio poroso. Posteriormente, los valores obtenidos para cada horizonte deberán multiplicarse con el respectivo espesor del horizonte (en dm) para obtener L/m^2 . Por lo tanto:

$$dCC [L/m^2] = dCC [Vol\%] \times (100 - \text{piedras } [Vol\%]) / 100 \times \text{espesor [dm]}$$

Evaluación del espacio poroso total (VPT)

La aptitud de un suelo de ser cultivado y labrado está relacionada directamente con su espacio poroso. La evaluación se realiza por horizontes de acuerdo con la siguiente tabla:

VPT (Vol%)	<30	40	50	60>	
Evaluación	muy bajo	bajo	mediano	alto	muy alto

Evaluación de la capacidad de aireación (CA)

Capacidades de aireación muy bajas a bajas representan serias restricciones en relación con la profundidad fisiológica de un suelo. En presencia de agua freática o agua estancada, la capacidad de aireación se convierte también en capacidad adicional de retención de agua. Capacidades de aireación altas indican lenta elevación de agua capilar, pero alto drenaje de agua pluvial. Suelos ricos en nutrimentos requieren de una alta capacidad de aireación, ya que de no tenerla, la descomposición de los residuos orgánicos será incompleta. La evaluación de la capacidad de aireación se realiza también por horizontes según la siguiente tabla:

CA (Vol%)	<3	7	12	18>	
Evaluación	muy baja	baja	mediana	alta	muy alta
Ejemplos	horizontes Cg, Bg	horizontes Cw, Bl	horizontes Bw	horizontes Ah	horizontes Ap

Evaluación de la capacidad de agua disponible (dCC)

La capacidad de agua disponible (o rango de humedad aprovechable) de un suelo representa a la cantidad de agua retenida que puede ser absorbida por las plantas. La capacidad de agua disponible se determina en el espacio radicular efectivo. Este último se define con base en la profundidad máxima de la que las raíces llegan a absorber agua en años secos (Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde, 1982). En caso de que el suelo se encuentre bajo influencia del manto freático, la capacidad de agua disponible se ve renovada constantemente. En el inciso "Evaluación del balance hídrico en suelos influenciados por mantos freáticos cercanos a la superficie" se describe como debe considerarse el aporte de agua por ascenso capilar del manto freático.

El espacio radicular efectivo se puede inferir si se considera la textura, según la siguiente tabla:

Textura ¹⁾	Espacio radicular efectivo
A	5 dm
AC	7 dm
CA	8 dm
L, CAL, C, CR, RA, RL, R	10 dm
CRL	11 dm

Nota: En caso de densidades aparentes altas, los valores disminuyen entre 1 y 2 dm.

¹⁾ Claves de textura en la pág. 15.

La evaluación de la capacidad de agua disponible en el espacio radicular efectivo se realiza mediante la siguiente tabla:

dCC (L/m ²)	<50	90	140	200<
evaluación	muy baja	baja	mediana	alta
				muy alta

Evaluación de la capacidad de campo

La capacidad de campo (CC) representa a la cantidad de agua que puede ser retenida en un suelo contra la fuerza de gravedad. En esta agua igualmente se pueden encontrar sustancias en solución, que no pueden ser absorbidas por las partículas sólidas (por ejemplo, nitratos). Por lo tanto, la capacidad de campo también representa una medida de la capacidad de retención de estas sustancias que evita que sean lixiviadas al subsuelo y contaminen a los acuíferos. La capacidad de campo también es importante para el balance térmico de los suelos. Mientras más húmedo está un suelo, necesitará más calor para subir la temperatura 1 grado, lo cual repercute en que en zonas templadas húmedas el ciclo vegetativo comience más tarde en el año, si los suelos presentan CC altas. Por el otro lado, la temperatura almacenada puede ser retenida durante mayor tiempo bajo CC altas, lo cual se refleja en menor vulnerabilidad a heladas tempranas en estos sitios durante el otoño.

La CC se determina convencionalmente hasta profundidades de 1 m y, en caso de presentarse la roca madre a profundidades menores de 1 m, en toda la profundidad de desarrollo. Se evalúa por medio de la siguiente tabla:

CC (L/m ²)	<130	260	390	520<
Evaluación	muy baja	baja	mediana	alta
				muy alta

Evaluación del balance hídrico en suelos influenciados por mantos freáticos cercanos a la superficie

En caso de que el manto freático se encuentre cercano a la superficie, el balance hídrico del suelo se verá complementado por la ascensión capilar de agua, lo cual deberá considerarse en la evaluación. Los valores correspondientes a la ascensión capilar en mm diarios se encuentran desglosados en la siguiente tabla, según la distancia del manto freático y considerando la textura del suelo (Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde, 1982):

Textura ¹⁾	Profundidad del manto freático en dm												
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	17	20
	Ascenso capilar [mm/día]												
A gruesa	>5.0	5.0	1.5	0.5	0.2	0.1	-	-	-	-	-	-	-
A media	>5.0	>5.0	>5.0	3.0	1.2	0.5	0.2	<0.1	-	-	-	-	-
A fina	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	3.0	1.5	0.7	0.3	0.2	<0.1	-	-	-
AC	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	5.0	3.5	2.0	1.5	0.8	0.3	0.1	<0.1	-
CA	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	5.0	3.0	2.0	1.0	0.5	0.2	-
CRA	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	3.0	2.0	1.0	0.7	0.4	0.2	<0.1	-	-
L, CL	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	5.0	3.5	2.0	1.0	0.5	0.2
C	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	>0.5	4.5	3.0	2.5	1.5	0.7	0.3	0.1
CAL	>5.0	>5.0	5.0	3.5	2.0	1.3	0.8	0.5	0.3	0.2	<0.1	-	-
CRL	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	4.5	3.5	2.5	2.0	1.5	0.8	0.4	0.2	<0.1
CR, RA	>5.0	5.0	2.5	1.2	0.7	0.5	0.3	0.2	0.2	<0.1	-	-	-
RL	4.0	2.0	1.1	0.7	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	<0.1

¹⁾ Claves de textura de la pág. 15

Evaluación de la conductividad hidráulica en condiciones de saturación

La conductividad hidráulica del suelo es una propiedad física que describe su capacidad para transmitir agua. Es un parámetro importante tanto para el uso agrícola de un suelo, como para la evaluación ecológica del sitio. Se puede medir cuantitativamente en términos de velocidad de paso de agua a través de una unidad de sección transversal de suelo saturado en una unidad de tiempo bajo condiciones hidráulicas y de temperatura específicas (conductividad hidráulica bajo condiciones de saturación). Sin embargo, debe considerarse que para la evaluación del comportamiento de un suelo frente a eventos pluviales, la conductividad hidráulica solo es uno de los parámetros a considerar, junto con el escurrimiento superficial y la permeabilidad bajo condiciones insaturadas, como también la infiltración (ver el siguiente inciso: "drenaje natural").

La conductividad hidráulica de un suelo en condiciones de saturación puede estimarse bajo consideración de la textura y la densidad aparente, según la siguiente tabla (Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde, 1982):

Textura ¹⁾	Densidad aparente		
	Baja	Mediana	Alta
	Conductividad hidráulica (Kf) [cm/día]		
Arena gruesa	>300	>300	100-300
Arena media	>100	>100	40-100
Arena fina	100-300	40-100	10-40
CA	40-100	10-40	1-10
AC, CRA	100-300	40-100	1-40
L, CAL, CL	40-100	10-40	<1-10
C	100-300	10-100	<1-10
CRL	40-100	10-40	<1-10
CR, RA, RL, R	40-300	10-40	<1-10

¹⁾ Claves de textura en la pág. 15

La evaluación de la conductividad hidráulica se realiza según los criterios establecidos en la siguiente tabla:

Kf [cm/día]	<1	10	40	100	300 >	
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta	Extremadamente alta

Drenaje natural

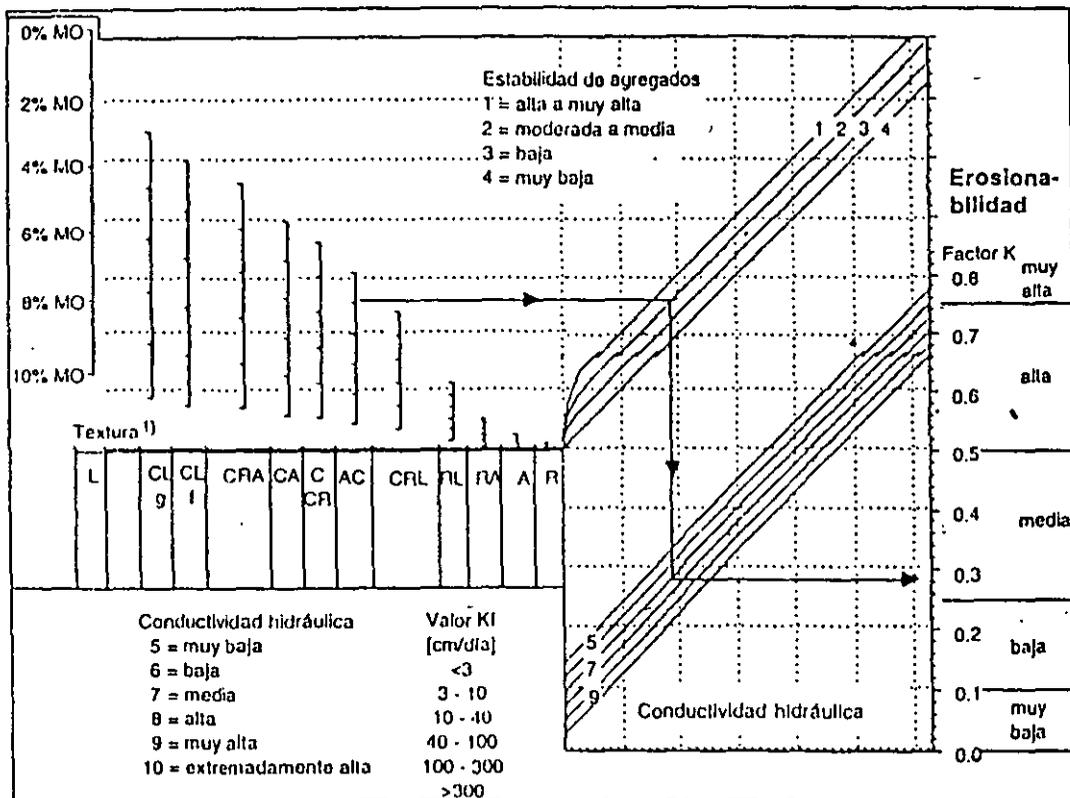
El drenaje natural se refiere a la frecuencia y duración de períodos húmedos en el sitio o localidad a estudiar. No se consideran alteraciones del régimen de humedad inducidos por el hombre, como serían el drenar o irrigar una parcela, a menos que estas acciones hayan modificado determinantemente la morfología del suelo.

Se evalúa la clase de drenaje correspondiente para el sitio de acuerdo a la siguiente tabla (Soil Survey Manual, 1993):

Drenaje excesivo	El agua se infiltra con rapidez, en raras ocasiones se encuentra agua interna libre, o sólo a gran profundidad. Los suelos generalmente son de texturas gruesas, tienen una alta conductividad hidráulica o son muy someros.
Drenaje bueno	El agua se infiltra bien, pero no con rapidez, se encuentra agua interna libre a profundidad sin especificar la duración, el agua es aprovechable para las plantas durante la mayor parte del ciclo vegetativo en regiones húmedas. La humedad no inhibe significativamente el crecimiento de las raíces durante el ciclo vegetativo. Los suelos carecen de características redoximorfias relacionadas con exceso de humedad.
Drenaje moderado	La infiltración del agua ocurre con lentitud en algunos períodos del año, se encuentra agua interna libre a profundidades medianas y su duración es de transitoria a permanente. Durante el ciclo vegetativo, el principal espacio radicular permanece mojado sólo durante lapsos cortos, suficiente para perjudicar a la mayor parte de las especies mesofíticas. Los suelos generalmente tienen una conductividad hidráulica mediana a baja en algún horizonte dentro de los primeros 100 cm del perfil o se encuentran en sitios con eventos periódicos de precipitación alta.
Drenaje deficiente	El agua se infiltra con lentitud y el suelo se encuentra periódicamente mojado a poca profundidad durante el ciclo vegetativo. Comúnmente se encuentra agua interna libre a poca profundidad durante lapsos de lo suficientemente largos para que la mayoría de las plantas mesofíticas no puedan desarrollarse, a menos que el suelo se drene artificialmente, sin embargo, el suelo no se encuentra mojado continuamente en zonas inmediatas a la profundidad del arado. La conductividad hidráulica de estos suelos generalmente es baja a muy baja o el sitio recibe precipitación de manera continua.
Drenaje muy deficiente	El agua se infiltra con lentitud y durante la mayor parte del ciclo vegetativo se encuentra agua interna libre en la superficie o a poca profundidad. El agua interna libre es persistente a permanente. Los suelos se encuentran en sitios planos o en depresiones. Pueden estar en pendientes suaves en caso de que la precipitación sea alta o continua.

Estimación de la erosionabilidad

La erosionabilidad de un suelo, el riesgo de erosión hídrica del mismo o factor "K" en la "Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo" (Wischmeier, 1971), puede estimarse si se considera la textura, el contenido de materia orgánica, la estabilidad de los agregados y la permeabilidad, con el siguiente nomograma (la erosionabilidad sólo se estima en el horizonte más superficial):



1) Claves de clases texturales de la pág. 15

(fuente: Wischmeier et al., 1971, modificado)

El factor K obtenido del nomograma se ajusta de acuerdo con la pedregosidad del horizonte superficial, multiplicándolo con un factor de ajuste de acuerdo con la siguiente tabla (National Soils Handbook USDA-SCS, 1983):

Pedregosidad [Vol%]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Factor de ajuste	0.90	0.77	0.68	0.61	0.54	0.48	0.43	0.38	0.34	0.30
Pedregosidad [Vol%]	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Factor de ajuste	0.26	0.22	0.19	0.16	0.13	0.10	0.08	0.06	0.04	0.03

La evaluación de la erosionabilidad se presenta en el margen derecho del nomograma anterior.

Evaluación del balance de nutrimentos

El abastecimiento de nutrimentos en un sitio estará determinado por la reserva de los mismos (la cual será disponible a largo plazo) y los nutrimentos disponibles inmediatamente y a corto plazo (por ejemplo, en el transcurso de un ciclo agrícola). La reserva solo puede estimarse muy aproximadamente en el campo. Ella aumenta principalmente con la presencia de minerales intemperizables. Las reservas más importantes son: calcita (Ca), dolomita (Ca, Mg), feldespatos (Ca, K), forsterita (Mg), apatita (P) y micas e illitas (K). La magnitud de la reserva está en función de los contenidos originales en la roca y las ganancias o pérdidas relativas que resultan de la formación de suelo.

La disponibilidad está en función de las propiedades químicas y biológicas actuales del suelo (pH, humedad, contenido de materia orgánica, tipo de los sitios de intercambio -orgánicos e inorgánicos-). Puede lograrse una caracterización aproximada del contenido de nutrimentos disponibles, si se considera la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de materia orgánica y el pH del suelo.

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

Los coloides del suelo, principalmente las arcillas y la materia orgánica, muestran en su superficie cargas negativas, por lo que pueden adsorberse a ellas cationes (ya sean nutrimentos o contaminantes). Estos cationes pueden ser intercambiados por cantidades equivalentes de otros cationes. La suma de todos los cationes intercambiables equivale a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y se reporta en meq/kg o mmol/kg (c = carga), antiguamente se refería en meq/100 g de suelo. La CIC depende básicamente de los tipos de arcilla y sus respectivas cantidades presentes en un suelo, como también del contenido de materia orgánica. En caso de tratarse de arcillas de carga variable, es decir dependiente de la reacción del suelo, también se deberá considerar el valor de pH. Las diferentes arcillas tienen CIC entre <100 y >1500 meq/kg. En los suelos, generalmente se encuentran mezclas de diferentes tipos de arcillas. A continuación se presenta una tabla en la cual, a partir de la textura y el tipo de arcilla dominante en un suelo, inferido según el material parental y las condiciones climáticas prevalecientes en el sitio, puede estimarse la CIC de la fase mineral del suelo. A esta debe sumarse la CIC de la fase orgánica, la cual se estima a partir de los contenidos de materia orgánica y el pH del suelo (puesto que la materia orgánica también posee carga variable). Los valores correspondientes se encuentran en la parte inferior de la siguiente tabla (Blume, 1990):

Material parental (ejemplos)	Tipo de arcilla mineral dominante (mmol/kg)						
	Mezcla	Ilita	Caolinita	Smectita	Alofano		
		granito	areniscas, superficies relicti- (Terciario)	aluviones, vulcanitas bajo climas áridos o con épocas pronunciadas de sequía	materiales volcánicos bajo climas húmedos		
ejemplos de suelos Textura ¹⁾	Fluvi- y Cambi- suelos	Cambi- y Luvi- suelos	Acrisoles, Nitisoles, Ferralisoles	Vertisoles, subgrupos ándicos		Ando- suelos	
A	20	20	6	50	pH 7.5 100	pH 6.5 80	pH 5.5 60
AC	45	45	14	115	225	180	135
CA, CAL	60	70	20	180	350	280	210
L	90	100	30	250	500	400	300
C	100	120	36	300	600	480	360
CL	120	130	40	325	750	600	450
CRL	150	160	48	400	800	640	480
CR	180	200	60	500	1000	800	600
RA	180	240	72	600	1200	960	720
RL	240	260	78	650	1300	1040	780
R	320	350	105	875	1750	1400	1050
Humus (%)							
	7.5	6.5	5.5	4.5	3.5	2.5	
1-2	+30	+24	+18	+12	+8	+5	
2-4	+70	+60	+40	+30	+20	+10	
4-8	+150	+120	+90	+60	+40	+20	
8-15	+250	+200	+150	+100	+60	+40	
15-30	+500	+400	+300	+200	+125	+75	
>30	+2000	+1600	+1200	+800	+500	+300	

1) Claves de texturas de la pág. 15

2) determinado en CaCl₂ 0.01 M

La evaluación de la capacidad de intercambio catiónico se realiza según la siguiente tabla:

CIC (meq/kg)	<50	100	200	400	800 >
Evaluación	muy baja	baja	regular	mediana	alta muy alta

Bases Intercambiables

La porción ocupada por los cationes Ca, Mg, K y Na (también llamados bases intercambiables = BI) de la CIC total (compuesta principalmente por los cationes mencionados además de H y Al) se denomina saturación de bases. El contenido de bases intercambiables en meq/kg de un suelo depende directamente de la acidez del mismo (presencia de H y Al), por lo que puede inferirse a partir de la capacidad de intercambio catiónico total (CIC) al multiplicarla con un factor determinado principalmente por el pH del suelo, pero también influido por el contenido de materia orgánica y la textura, quienes son

los principales agentes de la capacidad amortiguadora de los suelos. El factor correspondiente puede leerse en la siguiente tabla:

Textura ¹⁾	M.O.	pH ²⁾	<3	4	5	6	7>
A, AC, CA	<2%	0.15	0.20	0.40	0.70	0.85	1.00
	2-4%	0.10	0.15	0.35	0.60	0.80	1.00
	>4%	0.05	0.10	0.30	0.50	0.75	1.00
CL, C, CRL, CRA, RA	<2%	0.15	0.25	0.45	0.75	0.85	1.00
	2-4%	0.12	0.20	0.40	0.70	0.80	1.00
	>4%	0.10	0.15	0.35	0.60	0.75	1.00
CR, RL, R	<4%	0.20	0.30	0.50	0.75	0.85	1.00
	4-8%	0.15	0.25	0.45	0.70	0.80	1.00
	>8%	0.10	0.20	0.40	0.60	0.75	1.00

¹⁾ Claves de texturas de la pág. 15

²⁾ en CaCl₂ 0.01 M

*esto aquí se tiene CK de hora hno. por este
cuenta y de la hora total se suca piedras, ppm, de*

La transformación de meq/kg (unidad de masa) a eq/m² en el espacio radicular efectivo (unidad de volumen) se hace multiplicando por la densidad aparente, el factor (100 - % piedras)/100) el espesor en dm de cada horizonte y el factor 0.1 para obtener eq/m²:

$$BI [eq/m^2] = BI [meq/kg] \times d.a. [g/cm^3] \times (100 - \% \text{ piedras})/100 \times \text{espesor [dm]} \times 0.1$$

donde: DI = bases intercambiables y d.a. = densidad aparente

Ya que en los horizontes superficiales generalmente la densidad de raíces es mayor que en los horizontes profundos, las plantas por lo tanto se abastecen principalmente de los primeros, los horizontes superficiales son multiplicados por el factor 1, mientras que los subsuperficiales se multiplican por 0.5 (el factor también puede derivarse de la densidad de raíces observada en el perfil). La evaluación se realiza para el espacio radicular efectivo, por lo que se suman los valores hasta la profundidad correspondiente a este último.

La evaluación se hace según la siguiente tabla:

Bases intercambiables (eq/m ²)	<5	10	25	50	100	200>
evaluación	muy baja	baja	regular	mediana	mediana alta	muy alta
				mente alta		

Abastecimiento de nitrógeno

La reserva de nitrógeno puede estimarse a partir del contenido de materia orgánica, que es casi la única fuente de N en el suelo, y la clase de mantillo (tipos de humus) que presente el suelo, la cual implica diferencias en la relación C/N.

Para la estimación, primeramente deberá calcularse la cantidad de humus presente en un m² de suelo dentro del espacio radicular efectivo, lo cual se hace al multiplicar el contenido de materia orgánica en porcentaje por la densidad aparente (d.a. en g/cm³ = kg/dm³) por el factor corrector de piedras (100-%piedras/100) y por el espesor del horizonte en dm:

$$\text{Cantidad de humus [kg/m}^2] = \% \text{ m.o.} \times d.a. [\text{kg/dm}^3] \times (100 - \% \text{ piedras})/100 \times \text{espesor [dm]}$$

Después se calcula la reserva y la disponibilidad de nitrógeno por medio de la siguiente tabla:

tipo de mantillo 1)	N_f [kg/m ²]	N_d [g/m ²]
mull (C/N = 10:1):	= humus (kg/m ²) x 0.050	= humus (kg/m ²) x 0.25
moder (C/N = 20:1):	· x 0.025	· x 0.08
mor (C/N = 30:1):	· x 0.015	· x 0.03

1) ver pág. 30

Evaluación de la reserva de nitrógeno:

N_f (kg/m ²)	<0.25	0.50	1>
Evaluación	baja	mediana	alta
			muy alta

7. Evaluación de la capacidad filtro y amortiguadora

Los suelos poseen la capacidad de filtrar y amortiguar el efecto de sustancias contaminantes que se encuentran suspendidas o disueltas en la solución del suelo. De esta manera evita que dichas sustancias sean absorbidas por las plantas, o que tengan algún efecto negativo sobre la actividad de la biota y el desarrollo de las raíces, como también que sean translocadas a los acuíferos o cuerpos de agua cercanos. La filtración puede ser puramente mecánica en el sistema poroso de los suelos. También puede ser fisicoquímica, si las sustancias son adsorbidas sobre las superficies activas de las partículas más finas del suelo (principalmente arcilla y humus), o química si se forman precipitados insolubles en agua. La filtración fisicoquímica y química de un suelo también se conoce como capacidad de amortiguamiento. Las suspensiones pueden diferenciarse, según el tamaño de las partículas que las conforman, en: suspensiones dispersas gruesas (diámetro > 100 nm), suspensiones coloidales (diámetro 1 - 100 nm) y suspensiones moleculares o soluciones verdaderas.

La filtración de partículas suspendidas gruesas sólo puede efectuarse en poros equivalentemente gruesos, que garanticen la retención y a la vez impidan la removilización de las partículas. Suelos con una alta capacidad filtro para partículas suspendidas gruesas son, por lo tanto, aquellos que poseen una gran proporción de poros de diámetros entre 100 y 1 μ m. La estimación del porcentaje en volumen de dichos poros en un suelo puede basarse a manera de primera aproximación en la suma de su capacidad de agua disponible (dCC) y la tercera parte de su capacidad de aireación (CA) (Blume, 1990). La estimación de éstas, a partir de datos de campo, se describió en capítulos anteriores (pág. 34). La capacidad filtro se estima considerando los primeros 3 dm del suelo, ya que éstos representan el principal espacio radicular y en ellos se desarrollan la mayor parte de los organismos edáficos. Su evaluación se presenta en la siguiente tabla (Blume, 1990):

dCC + 1/3 CA [Vol%]	<15	15-20	20-25	25-30	30-40	>40
Evaluación	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta	Extremadamente alta

La capacidad amortiguadora de partículas coloidales o moléculas en solución de un suelo por adsorción sobre las superficies activas de sus partículas finas puede evaluarse de manera general, a través de la determinación de la superficie total de los mismos (ST). Esta puede determinarse en el laboratorio o bien estimarse a partir de las superficies específicas (SE) de las partículas finas (arcilla y humus) que lo componen y que se presentan en la siguiente tabla (Blume, 1990):

	Caolinita	Ilita	Smectita	Alofano	Compuestos húmicos
Superficie específica (SE) [m ² /g]	30	130	700	900	800-1000

La ST puede calcularse considerando la SE del tipo de arcilla dominante en el suelo a evaluar (el cual puede deducirse a partir del material parental, ver tabla en la pág. 40), y la estimación del contenido de arcilla (R, prueba al tacto, pág. 14) y de materia orgánica (MO, pág. 19), las cuales al multiplicarse por la densidad aparente, se relacionan con el volumen del suelo; la superficie total (ST) en [m²/cm³] se obtiene según la siguiente fórmula:

$$ST [m^2/cm^3] = ((\%R/100 \times SE (\text{arcilla dominante}) [g/m^2]) + (\% MO \cdot 900 [g/m^2])) \times d.a. [g/cm^3]$$

La evaluación general de la capacidad amortiguadora de un suelo se presenta en la siguiente tabla (Blume, 1990):

Superficie total (ST) [m ² /cm ³]	<10	10-50	50-100	100-200	200-300	>300
Evaluación	muy baja	baja	media	alta	muy alta	extremadamente alta

El volumen de poros medios y gruesos (dCC + 1/3 CA) y la superficie total permiten evaluar la capacidad filtro y amortiguadora de los suelos en forma muy general. Ya que los diversos contaminantes tienen un comportamiento específico en los suelos, distintas características edáficas son responsables de realizar el amortiguamiento de cada uno de ellos. A continuación se presenta, a manera de ejemplo, la evaluación de la capacidad de los suelos de amortiguar una contaminación por diversos metales pesados, introducidos a los suelos a través del riego con aguas negras o la aplicación de lodos residuales o compostas de basura. Las tablas de evaluación fueron tomadas de Blume y Brümmer (1987), quienes las elaboraron a partir de experimentos de laboratorio en condiciones controladas y las calibraron después con experimentos de campo en condiciones diversas.

La movilidad de los metales depende de manera determinante de la acidez del suelo. El valor de pH a partir del cual se registra un incremento notable de la movilidad es diferente para cada metal y se denomina valor pH crítico. Una vez que el suelo muestre un valor pH menor al crítico, la concentración de metales pesados en la solución del suelo dependerá de la inmovilización o retención de los mismos por adsorción sobre compuestos húmicos o arcillas minerales, formación de complejos con la materia orgánica o oclusión en sesquióxidos de hierro y aluminio. Para evaluar una posible afectación de los organismos edáficos y absorción de metales por las plantas se considera la capacidad de retención o inmovilización de metales en los primeros 30 cm del suelo, que es el espacio en el que se desarrollan la mayoría de los organismos y raíces. En ellos se determina el pH con un potenciómetro de campo o con papel indicador (ver pág. 17). Después se lee en la siguiente tabla la fuerza de enlace para cada metal correspondiente al valor de pH determinado para suelos de texturas arenosas:

Metal	pH (CaCl ₂)									
	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
	[Fuerza de enlace] ¹⁾									
Cd	0	0-1	1	1-2	2	3	3-4	4	4-5	5
Mn	0	1	1-2	2	2	3	3-4	4	4-5	5
Ni	0	1	1-2	2	3	3-4	4	4-5	5	5
Co	0	1	1-2	2	2	3	3-4	4	4-5	5
Zn	0	1	1-2	2	3	3-4	4	4-5	5	5
Al	1	1-2	2	3	4	4-5	5	5	5	5
Cu	1	1-2	2	3	4	4-5	5	5	5	5
Cr(III)	1	1-2	2	3	4	4-5	5	5	5	5
Pb	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5
Hg	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5
Fe(III)	1-2	2-3	3-4	5	5	5	5	5	5	5

¹⁾ Ponderación: 0 = ninguna; 1 = muy baja; 2 = baja; 3 = media; 4 = alta; 5 = muy alta

El efecto del contenido de materia orgánica y arcillas minerales sobre la fuerza de enlace para cada metal se considera al sumar al valor obtenido de la tabla anterior, los valores que se presentan en la siguiente tabla, de acuerdo con el contenido de materia orgánica los primeros 30 cm en el suelo a evaluar (determinado según el nomograma en la pág. 1) y al contenido de arcilla (determinando la textura a través de la prueba del tacto (pág. 14), y leyendo el contenido de arcilla aproximado en el triángulo de texturas (pág. 15)).

	Zn, Mn	Co	Ni	Cd	Al, Cu, Cr(III), Pb, Hg, Fe
Materia orgánica					
0 - 2%	0	0	0	0	0
2 - 8%	0	0 - 1	0 - 1	0 - 1	1
8 - 15%	0 - 1	0 - 1	1	1	1 - 2
>15%	0 - 1	1	1	1 - 2	2

	Cd, Ni, Co	Mn, Zn, Cu	Al, CR(III), Pb, Hg	Fe
textura¹⁾				
A	0	0	0	0
AC, CA, L	0	0	0 - 1	0 - 1
CL, C, CRL, RA	0 - 1	0 - 1	0 - 1	1
RL, CRA, CR	0 - 1	0 - 1	1	1 - 2
R	0 - 1	1	1 - 2	2

¹⁾ Claves de texturas de la pág. 15

Nota: En caso de que la materia orgánica del suelo consista predominantemente de material poco humificado (por ejemplo, turbas), los valores deberán disminuirse en un punto.

El efecto de contenidos altos de sequioxidos en los suelos sobre la fuerza de enlace de metales de un suelo puede diagnosticarse a través de la presencia de colores rojizos o café rojizos intensos, al sumar los siguientes valores a los obtenidos a partir de las de tablas pasadas, en caso de que el color del suelo muestre un matiz menor o igual a 7.5 YR y según el cociente intensidad/pureza:

Metal	Matiz [7.5 YR y Intensidad/pureza:		
	<1	1 - 1.5	>1.5
Cd, Mn, Ni, Co, Zn	0	0 - 1	1
Al, Cu	0	1	1 - 2
Cr(III), Pb, Hg	0	1 - 2	2

En caso de presentarse exceso de humedad (y respectivamente condiciones anaerobias), y materiales sulfídicos en el suelo, evidentes por colores negros y el desprendimiento de H₂S al adicionar unas gotas de ácido clorhídrico a 10 % al suelo, los metales Cd, Ni, Co, Zn, Cu, Pb y Fe probablemente se encontrarán precipitados en forma de sulfitos y estarán prácticamente inmóviles. En cambio, en caso de presencia repetida de un exceso de humedad temporal, al igual que en caso de presentarse motas en un suelo, es de esperarse una movilidad alta del Fe y Mn.

La evaluación de la fuerza de enlace de metales pesados por los suelos y, por lo tanto de su capacidad de amortiguar efectos nocivos para los organismos edáficos y la absorción de metales por los cultivos, se realiza con base en la siguiente tabla:

Fuerza de enlace	0	1	2	3	4	5
Evaluación	nula	muy baja	baja	media	alta	muy alta

Nota: la evaluación se refiere a suelos que no han sido contaminados previamente. En caso de tratarse de suelos ya contaminados, su capacidad de amortiguamiento puede ser muy inferior, por lo que deberá establecerse el contenido de metales totales y fácilmente movilizables en el laboratorio. La evaluación tampoco considera posibles efectos antagónicos y sinérgicos entre metales.

8. Ejemplo de una descripción completa de perfil

La descripción referida a continuación pretende ilustrar los métodos descritos en las páginas anteriores.

A Información acerca de la localidad

- a. Número del perfil: 12
- b. Nombre del sitio: Rancho Cuixmala
- c. Clasificación del suelo:
FAO: Cambisol Luvi-Crómico
USDA:
- d. Fecha de la descripción: 25 de julio de 1994.
- e. Autor: Patricia Balvanera
- f. Localización: a 1.5 km de la carretera Manzanillo - Puerto Vallarta, por la entrada principal al Rancho Cuixmala, Mpo. de Chamela, Jal.
Coordenadas: 36 44 S y 21 32 E.
- g. Altitud: 55 m
- h. Forma del terreno:
posición fisiográfica: ladera convexa, ligeramente inclinada, cerca de la cima
forma del terreno circundante: ondulado, lomeríos bajos de moquetas disectadas
microrelieve: ninguno
- i. Pendiente: moderadamente inclinado (5%); exposición: E.
- j. Uso del suelo o vegetación: selva baja caducifolia. Altura aprox. del dosel: 10 m. Aparentemente vegetación primaria, ya que no hay indicios de alteraciones recientes expresadas en presencia de especies secundarias.
- k. Clima: Aw₀ x'; el más cálido de los subhúmedos con sequía intraestival. Precipitación media anual: 782 mm con oscilaciones fuertes (hasta de 2 000 mm). El 80% de las lluvias se presenta en invierno. La temperatura media anual es de 25 °C y la diferencia entre verano e invierno es menor de 5 °C. La evapotranspiración potencial es de 1283 mm. (Datos provenientes de la estación meteorológica de la Estación de Biología de la UNAM a 32 km de distancia).

B Información general acerca del suelo

- a. Material parental: el suelo se desarrolló aparentemente "*in situ*" a partir de rocas graníticas metamorfozadas y saproilitizadas.
- b. Drenaje natural: clase 2 = bien drenado.
- c. Condiciones de humedad en el perfil: seco (corte de carretera con exposición E)
- d. Profundidad al manto freático: desconocida, pero probablemente mayor a 5 m, no influye al perfil.
- e. Presencia de rocas superficiales: no.
- f. Evidencia de erosión: no.
- g. Presencia de sales o soda: ninguna.
- h. Influencia humana: corte de carretera, en la vegetación no hay indicios.

C Descripción breve del perfil

Perfil profundo, bien drenado de color café-rojizo oscuro, uniforme en apariencia, especialmente si está húmedo, pedregoso (50%). Desarrollo de estructura débil, con agregados de tamaño medio a fino. Todo el perfil es friable, poroso y permeable. El examen cuidadoso permite reconocer en el horizonte B cámbico a algunos cutanes

quebrados o incipientes. La distribución de raíces es normal con mayor densidad en los primeros 40 cm.

D Descripción del perfil

Ah	0-13 cm	Color café rojizo en húmedo (7.5 YR 3/4), textura arena franca, contenido medio de materia orgánica (4%), ligeramente ácido (pH 6.0 en agua), estructura subangular en bloques, moderada, fina; pedregosidad de 10%, muchos poros intersticiales finos y medios, densidad alta de raíces, límite claro y uniforme.
Bw	13-40 cm	Color café rojizo en húmedo (7.5 YR 4/4), textura franco-arcillo-arenosa, contenido medio de materia orgánica (2%), ligeramente ácido (pH 6.0 en agua), estructura subangular en bloques, moderada, media a fina, pedregosidad de 50%, muchos poros intersticiales finos, alta densidad de raíces finas, límite claro y uniforme.
BC	40-83 cm	Color rojizo café oscuro en húmedo (5 YR 4/4), textura arcilla arenosa, ligeramente ácido (pH 6.0 en agua), estructura subangular en bloques, moderada, media a fina, con cutanes delgados y quebrados probablemente de arcillas y óxidos de hierro sobre algunos agregados y en algunos poros, pedregosidad de 75%, muchos poros finos intersticiales, densidad media de raíces finas, límite ondulado y abrupto.
Cw	>83 cm	Similar al anterior pero con pedregosidad de 90%, densidad de raíces muy baja.

E Interpretación de las características del suelo

Procesos pedogenéticos dominantes:

El material parental granítico se encuentra saprolitizado, muestra evidencias de intemperismo profundo. Los primeros dos horizontes muestran acumulación de materia orgánica, el tipo de humus es mull. El pH ligeramente ácido pone en evidencia una ligera pérdida de bases por lixiviación y el color rojizo una formación de óxidos de Fe (y probablemente de Al) *in situ*. Los horizontes B tienen texturas más finas que el Cw, producto principalmente de una formación de arcillas minerales *in situ*, pero también de una incipiente iluviación de arcillas en el horizonte BC, la cual se manifiesta en la presencia de cutanes delgados y quebrados sobre algunos agregados y en algunos poros. La clasificación como Cambisol Luvi-Crómico se basó principalmente en el color, la textura y la estructura, al igual que en la presencia de los cutanes incipientes.

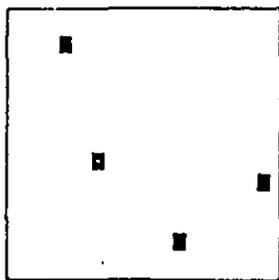
Características edafológicas del sitio:

El suelo tiene una alta conductividad hidráulica y el sitio en general presenta buenas condiciones de drenaje. La alta pedregosidad limita el desarrollo de raíces a profundidad y también restringe la cantidad de nutrimentos por m². Otro factor limitativo para el desarrollo de la vegetación es su baja capacidad de agua disponible y de retención de agua. Esto último limita su uso potencial para fines agrícolas a la época de lluvias y, dada la irregularidad de la precipitación durante la misma, condiciona el aseguramiento de buenos rendimientos a la disponibilidad de agua para riego.

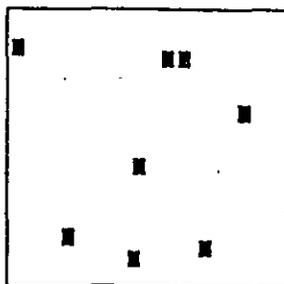
9 Referencias bibliográficas

- Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde. 1982. Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover, Alemania.
- Blume, H.-P. (Ed.). 1990. Handbuch des Bodenschutzes. ecomed verlagsgesellschaft mbH, Landsberg, Alemania.
- Blume, H.-P. and G. Brümmer. 1987. Prognose des Verhaltens von Schwermetallen in Böden mit einfachen Feldmethoden. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenk. Gesellsch.* 53: 111-117.
- CNA. 1989. Manual de clasificación, cartografía e interpretación de suelos, con base en el sistema de clasificación de suelos. Comisión Nacional del Agua, México.
- Dalrymple, J.B. and A.J. Conacher. 1968. An hypothetical nine unit landsurface model. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.* 12: 60 - 76.
- FAO. 1977. Guidelines for soil profile description. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia.
- FAO. 1988. Soil map of the world. Revised legend. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia.
- Fieldes, M. and K. W. Perrott. 1966. The nature of allophane in soils. Part 3: Rapid field and laboratory test for allophane. *New Zealand Journal of Soil Science* 9: 623-629.
- Krahmer, U., V. Hennings, U. Müller, H.-P. Schrey. 1995. Ermittlung bodenphysikalischer Kennwerte in Abhängigkeit von Bodenart, Lagerungsdichte und Humusgehalt. *Zeitschrift Pflanzenernaehr. Bodenkunde* 158 (4): 323-332.
- National Soils Handbook USDA-SCS. 1983. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D.C., USA.
- Pape, H. 1971. Leitfaden zur Gesteinsbestimmung. Enke-Verlag, Stuttgart, Alemania.
- Renger, M. 1987. Beziehung zwischen Bodonfarbe und Humusgehalt. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 55 (II): 821-826.
- Schlichting, E. y H.-P. Blume. 1966. Bodenkundliches Praktikum. Verlag Paul Parey, Hamburg & Berlin, Alemania.
- Schlichting, E., H.-P. Blume and K. Stahr (1995): Bodenkundliches Praktikum. 2a Ed. , Verlag Paul Parey, Hamburg & Berlin, Alemania.
- Schroeder, D. 1969. Bodenkunde in Stichworten, Hirt, Kiel, Alemania.
- Soil Survey Manual. 1993. Soil Survey Division Staff. United States Department of Agriculture Handbook No. 18. United States Department of Agriculture; Washington, D.C., USA.
- Wischmeier, W. H., C.B. Johnson and B.V. Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation* 6: 189-193.

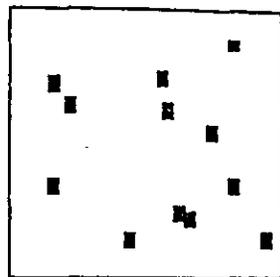
Anexo 2: Láminas comparativas para estimar el cubrimiento de área en volumen de fragmentos de roca, manchas y motas así como nódulos.



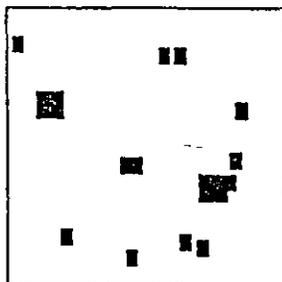
1%



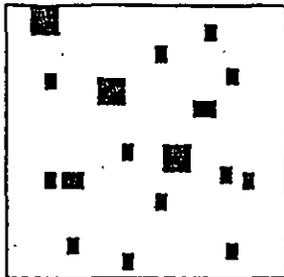
2%



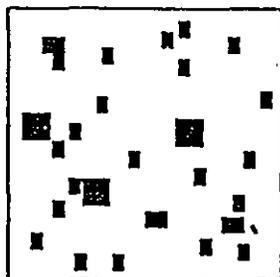
3%



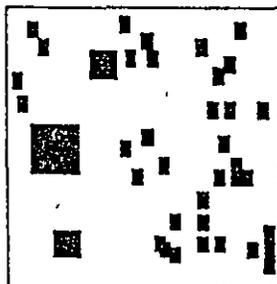
5%



7%



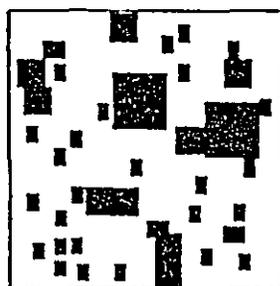
10%



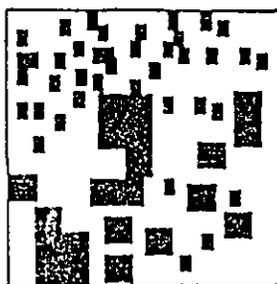
15%



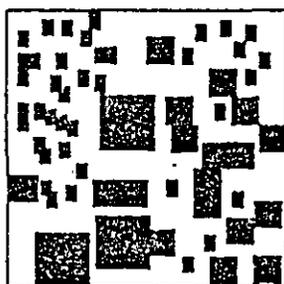
20%



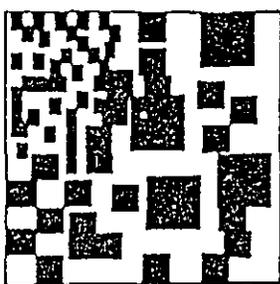
25%



30%



40%



50%

Anexo 3: Láminas comparativas para la estimación del tamaño de la estructura.
estructura angular y subangular en bloques

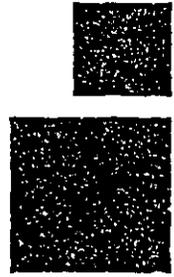
muy fina
($< 5\text{mm}$)



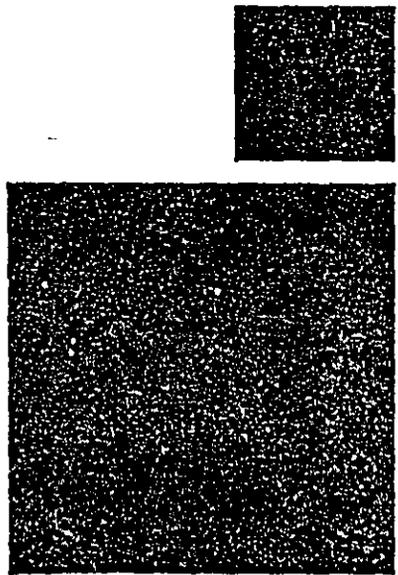
fina
5-10 mm



mediana
(10 - 20 mm)



gruesa
(20 - 50 mm)



muy gruesa
 $>50\text{ mm}$

estructura granular y migajosa

muy fina
(< 1 mm)



fina
1-2 mm



mediana
(2-5 mm)



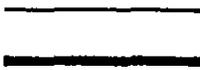
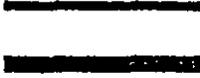
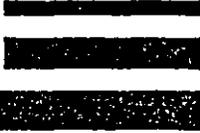
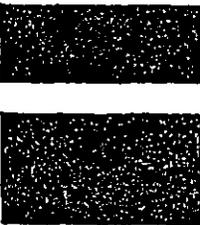
gruesa
(5-10 mm)



muy gruesa
(> 10 mm)



estructura laminar

muy fina (< 1 mm)	
fina 1-2 mm	
mediana (2-5 mm)	
gruesa (5-10 mm)	
muy gruesa (> 10 mm)	

estructura prismática y columnar

