

Manual para el muestreo y descripción de perfiles de suelo en campo con objetivos múltiples

Francisco Bautista
Ángeles Gallegos
Norma García



Manual para el muestreo y descripción de perfiles de suelo en campo con objetivos múltiples

Francisco Bautista
Ángeles Gallegos
Norma García



Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental
Universidad Nacional Autónoma de México
Morelia, 2023

Catalogación en la publicación UNAM. Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de Información

Nombres: Bautista Zúñiga, Francisco, autor. | Gallegos Tavera, María de los Ángeles, autor. | García Calderón, Norma, 1945- , autor.

Título: Manual para el muestreo y descripción de perfiles de suelo en campo con objetivos múltiples / Francisco Bautista, Ángeles Gallegos, Norma García.

Descripción: Primera edición. | Morelia : Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, 2023.

Identificadores: LIBRUNAM 2218928 (impreso) | LIBRUNAM 2218959 (libro electrónico) | ISBN: 978-607-30-8484-0 (libro electrónico).

Temas: Perfiles de suelos -- Manuales. | Suelos -- Análisis -- Manuales. | Suelos -- Aspectos ambientales -- Estudios de caso. | Muestreo (Estadística).

Clasificación: LCC S592.143.B38 2023 (impreso) | LCC S592.143 (libro electrónico) | DDC 631.40285 —dc23

Esta publicación se aprobó de conformidad con las normas editoriales del CIGA, UNAM. Todos los capítulos de este libro fueron arbitrados por pares académicos externos al CIGA.

Primera edición: diciembre 2023

D. R. © 2023, Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria s/n, Alcaldía Coyoacán,
C. P. 04510, Ciudad de México, México
www.unam.mx

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA-UNAM)
Antigua carretera a Pátzcuaro 8701, colonia Exhacienda de San José de la Huerta,
C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México
www.ciga.unam.mx

Cuidado editorial: Israel Chávez Reséndiz.
Corrección de estilo: Benito Artigas
Diseño editorial y de interiores: Eduardo González Palacios

ISBN: 978-607-30-8484-0.

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México. Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Este libro se distribuye gratuitamente en versión PDF.
Disponible en la página de publicaciones del CIGA:
<https://publicaciones.ciga.unam.mx/index.php/ec/>

Las versiones impresas son exclusivas de los autores de este libro.
Hecho en México.

Índice

Introducción	6
Francisco Bautista	
Breve introducción a herramientas de muestreo	7
Organización de este manual	8
1. Características del sitio	10
Francisco Bautista, Ángeles Gallegos	
Forma del terreno e inclinación de la pendiente	10
Uso del suelo y cubierta vegetal	15
Material parental	16
Afloramientos rocosos	17
Evidencias de erosión	21
Estado del tiempo y condiciones climáticas	22
2. Excavación de la calicata y descripción del perfil de suelo	25
Francisco Bautista, Ángeles Gallegos	
La identificación de horizontes	31
Evidencias antrópicas y geológicas	32
Naturalidad del suelo	34
3. Análisis de suelos en campo para la evaluación de las funciones ambientales	36
Francisco Bautista, Ángeles Gallegos. Norma García	
Medición del color del suelo en campo	36
Fragmentos gruesos	38
Densidad aparente	40
Estructura (forma, tamaño, grado y estabilidad de los agregados)	42
Estimación de la textura en campo	46
Medición del pH	50
Medición de la conductividad eléctrica	52
Estimación de la materia orgánica	53
Evaluación del grado de humificación del suelo	54

<i>Clasificación de los horizontes de suelos orgánicos con base en sus propiedades organolépticas</i>	54
<i>Indicadores de humificación en suelos minerales</i>	56
<i>Otros rasgos pedológicos</i>	58
<i>Revestimientos, concreciones y condiciones de óxido-reducción</i>	58
<i>Aluminio activo</i>	62
<i>Afloramiento de sales</i>	63
<i>Superficies de deslizamiento (slickensides)</i>	64
<i>Cementación</i>	65
4. Descripción de perfiles de suelo para estudios de taxonomía	69
Francisco Bautista, Ángeles Gallegos	
Horizontes superficiales	70
Horizontes subsuperficiales	70
Taxonomía de los perfiles con WRB	73
5. Estudios detallados en ambientes extremos y/o modificados y/o raros	80
Francisco Bautista	
Estudios en perfiles de suelo en ambientes extremos/raros	80
Estudios de suelo en parcelas	84
Bibliografía	86
Anexos	92
Anexo 1. Material para el trabajo de campo	92
Anexo 2. Función de pedotransferencia para la estimación de la materia orgánica de suelos de zonas volcánicas	94
Anexo 3. Formato de captura de información de campo	101
Anexo 4. Composición química de los tipos de roca	103
Índice alfabético	105
Índice de cuadros	107
Índice de figuras	108

Introducción

Los suelos desempeñan un papel fundamental para el desarrollo sostenible de la humanidad dadas las funciones que realizan (McBratney et al., 2014). Estas funciones ofrecen bienes y servicios importantes tales como la producción de alimentos, tratamiento del agua, reserva de la biodiversidad, entorno físico y cultural, archivo histórico, reserva de carbono, entre otros (Aguilar y Bautista, 2011; Bouma, 2009; CCE, 2006). Los suelos son un elemento clave de los ecosistemas terrestres, pero no todos funcionan de la misma manera, por lo que se considera que para lograr los objetivos de desarrollo sustentable será necesario conocerlos, conservarlos y manejarlos de acuerdo con su funcionamiento en particular.

Manuales de técnicas de estudio del suelo hay muchos, y estamos presentando uno más. Cada manual que hemos analizado tiene ventajas y desventajas con respecto a los demás; por ejemplo, en el *Libro de campo para describir y muestrear suelos* (Schoeneberger et al., 2012), se observa un mayor énfasis en la pedregosidad del perfil de suelo y su ilustración contiene figuras para calificar esto visualmente, lo que es una ventaja que no se encuentra en otros textos (Gallegos et al., 2021). O el *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo* (Siebe et al., 2006), con su excelente nomograma para la estimación de la materia orgánica del suelo. Este nomograma también ha sido superado por nuevas tecnologías proxy que se basan en el análisis del color. Hay otros manuales con distintos métodos para la estimación de la materia orgánica como Cortés et al., 2015; Delgado et al., 2019; García et al., 2020; García-Ruiz et al., 2022. Por último, no dejamos de mencionar la extraordinaria y completa información presentada en la *Guía para la descripción de suelos* (FAO, 2009), que más que un manual, es un libro de más de doscientas

páginas de difícil uso en campo. Es conveniente resaltar que otros manuales tienen objetivos de diagnóstico agropecuario, taxonomía, génesis de suelo, análisis espacial, entre otros.

Por nuestra parte, en este manual hacemos énfasis en las funciones ambientales del perfil del suelo, con la finalidad de lograr los objetivos de desarrollo sustentable declarados por las Naciones Unidas (Bouma, 2009).

Breve introducción a herramientas de muestreo

México es un país biodiverso por la variedad geológica, climática, geomorfológica y edáfica que presenta, aunque esta última no ha sido debidamente registrada ni valorada; por ello, en este manual se hace énfasis en el registro de los suelos en condiciones ambientales extremas (Goryachkin et al., 2019; Fragoso-Servón et al., 2020).

Asimismo, se hace hincapié en las condiciones de los suelos de México, principalmente los del sur del país de las zonas kársticas de la península de Yucatán y los suelos de origen volcánico del Eje Neovolcánico Transversal del centro del país. Este manual es una compilación de técnicas y métodos, sumado al enriquecimiento de experiencias personales y estudios actuales. En las técnicas y métodos se incluyen lo que hoy se denomina “sensores cercanos de suelo” (por su traducción del inglés: *proximal soil sensing*) (Viscarra-Rossel et al., 2010). El avance tecnológico que ha dado lugar a los sensores cercanos de suelos consiste en la medición detallada, rápida y precisa de una gran cantidad de muestras en el perfil de suelo, con lo cual es posible hacer los mapas de las propiedades de éste (Rodríguez et al., 2015). Algunos ejemplos de los sensores cercanos de suelos son los equipos para medir el color del suelo (colorímetros y aplicaciones móviles), los microscopios de campo acoplados a los teléfonos móviles o tabletas, las pistolas de Fluorescencia de Rayos X (FRX), pistolas de Radiación Infrarroja (IR), los magnetómetros de campo, así como potenciómetros y conductímetros de uso común.

Los microscopios de campo acoplados a los teléfonos móviles permiten tomar fotografías detalladas (en cuanto a tamaño y forma) de los rasgos pedológicos como concreciones, cutanes, motas, costras, etc. Aspectos que a menudo sólo se estiman y se registran después del análisis de laboratorio. Con las pistolas de FRX es posible medir la cantidad de elementos totales con un simple disparo, lo cual permite hacer los mapas de la composición del perfil de suelo en minutos (Godinho et al., 2018).

Con las pistolas de IR se pueden hacer mediciones de temperaturas de más de 1,500 °C, lo cual es relevante en microhábitats del suelo, pues permite medir temperaturas como las que hay debajo de las costras salinas en zonas áridas, las del suelo en Histosols, la del suelo durante la quema agrícola y durante los incendios (Lázaro et al., 2021).

Los magnetómetros de campo se utilizan para medir la susceptibilidad magnética de los suelos (Sánchez-Duque et al., 2020). Con ellos es posible tomar cientos de mediciones en el campo para hacer el mapa del perfil de suelo y de esta manera conocer las variaciones verticales y horizontales de la susceptibilidad magnética en dicho perfil de suelo.

El manejo de las fotografías digitales permite identificar los horizontes de manera más precisa, así como la cuantificación de los rasgos pedogenéticos que pueden registrarse en la fotografía (Zhang y Hartemink, 2019; Gallegos et al., 2021).

Organización de este manual

Este manual consta de tres partes: a) muestreo y descripción de perfiles de suelo para la evaluación de las funciones ambientales; b) descripción de perfiles de suelo para estudios de taxonomía; y c) estudios detallados en ambientes extremos, modificados y/o raros. El propósito principal de este manual es que sea utilizado como material didáctico para la docencia en diversas carreras.

La primera parte se enfoca en las propiedades de los suelos, claves para la evaluación de las funciones ambientales, tales como la

densidad aparente, pedregosidad y límite entre horizontes (Bautista et al., 2016a). Con estas propiedades básicas de los suelos se puede calcular la cantidad de tierra fina en kg m^{-2} o en t ha^{-1} del perfil completo de suelo y con ello se puede expresar cada propiedad de los suelos en unidades de superficie, considerando todos los horizontes del perfil de suelo. Tanto la densidad aparente como el porcentaje de fragmentos gruesos o pedregosidad, y los afloramientos rocosos han sido ignorados o sólo estimados en varios manuales de campo, mientras que en este manual damos relevancia a esas propiedades de los suelos.

La segunda parte se refiere a la descripción de perfiles de suelo para estudios de taxonomía. En ésta se le da importancia a la descripción de la morfología del suelo expresada en el perfil con referencia en los procesos pedogenéticos, así como los horizontes, procesos y materiales de diagnóstico reportados por la WRB (IUSS, 2015).

En la tercera parte se hace énfasis en las técnicas de estudios detallados de los suelos en ambientes extremos, modificados y/o raros. Esta última sección se dividió en dos partes: los estudios detallados de perfiles y los estudios en parcelas.

En este nuevo manual de técnicas de estudio del suelo en campo se combinan cuatro objetivos: a) la evaluación de las funciones ambientales de los suelos; b) el registro de los rasgos pedogenéticos y la caracterización de los horizontes, propiedades y materiales de diagnóstico para la correcta clasificación de suelos; c) la descripción detallada de perfiles de suelo (*proximal soil sensing*) para estudios detallados en ambientes extremos, modificados y/o raros; y d) la actualización de los conocimientos edafológicos.

Todos estos objetivos están encaminados a lograr un conocimiento mayor de los suelos con base en su morfología y en sus propiedades. De esta manera se podrán plantear usos potenciales en una perspectiva de manejo sustentable.

Francisco Bautista

Características del sitio

1

Francisco Bautista
Ángeles Gallegos

Durante el muestreo en campo deben registrarse características del sitio que son fundamentales para identificar la relación entre la formación y distribución geográfica de los suelos con su ambiente, así como algunos aspectos de su uso y manejo. Se recomienda la observación del entorno de lugar del perfil del suelo con la idea de registrar el papel del relieve, la vegetación, los afloramientos de las rocas y las formas de manejo del suelo (factores formadores del suelo), lo cual permitirá un mejor entendimiento de los procesos pedogenéticos y de la morfología del perfil. Esto particularmente es muy importante cuando se presentan suelos enterrados, paleosuelos y procesos pedogenéticos en condiciones extremas.

Forma del terreno e inclinación de la pendiente

Las formas del terreno son elementos del relieve que mediante su inclinación y orientación influyen en el desarrollo y distribución espacial de los suelos a través de procesos de erosión (pérdida y acumulación de sedimentos) y efectos en los ciclos de humedad y secado (Cajuste y Gutiérrez, 2011).

Para la identificación de la forma del terreno se recomienda utilizar el *Diccionario geomorfológico* de Lugo-Hubp (2011). En la Figura 1 se muestran las principales formas del terreno y en el Cuadro 1 se describen brevemente.

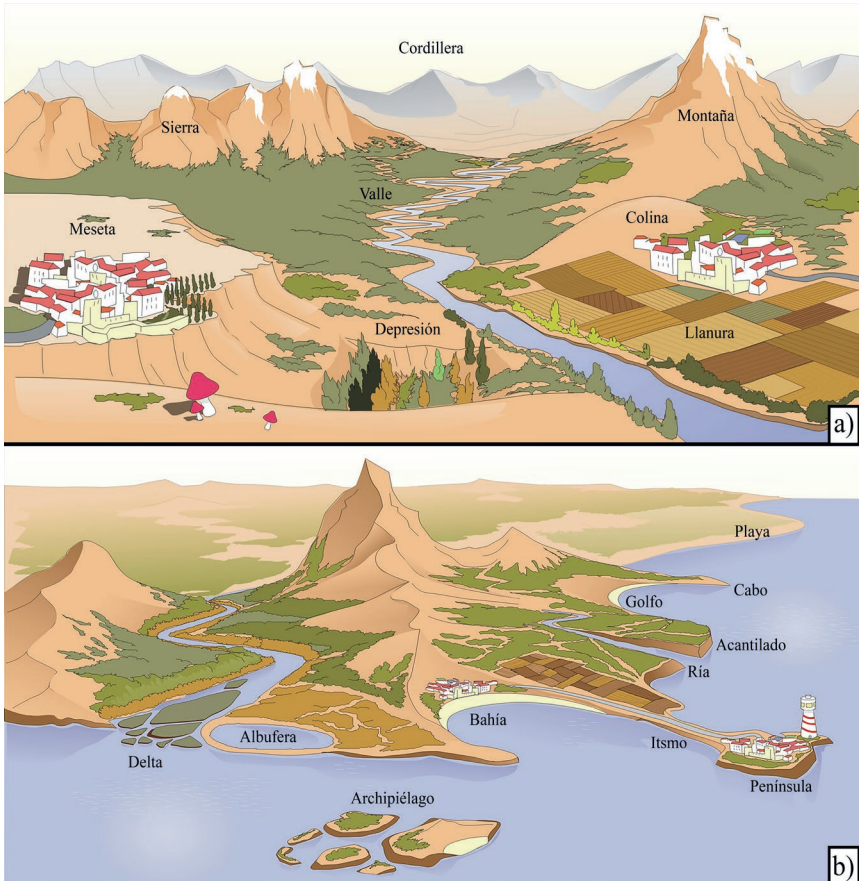


Figura 1. Ejemplos de las principales formas del terreno: a) relieve terrestre y b) relieve costero. Crédito de las imágenes a INTEF (2022). Ilustrador: José Alberto Bermúdez.

Cuadro 1. Breve descripción de las principales formas del terreno

Forma del terreno	Descripción
Montaña	Elevación natural del terreno, generalmente por encima de los 700 m.
Cordillera o sierra	También llamado “sistema montañoso”, se refiere a un continuo encadenado de montañas.
Macizo	Una montaña antigua con formas redondeadas debido a cientos de años de intensa erosión.
Meseta	Elevación del terreno con una superficie más o menos plana situada a cierta altitud. En América suele llamarse “altiplano”.
Planicie o llanura	Superficie plana o muy poco ondulada de considerables dimensiones.
Depresión	Es una zona más o menos extensa que se caracteriza por estar a una altitud inferior a las formaciones del relieve que la rodean.
Valle	Depresión habitualmente ocupada por un río de forma alargada. Puede ser un valle fluvial, cuando ha sido creado por la acción de un río y tiene forma de “V”, o un valle glaciar, en forma de “U”.
Cuenca hidrográfica	Depresión formada como resultado de la acción erosiva de un río y sus afluentes. En África se denomina “cubeta”.
Fosa tectónica	Depresión, limitada en ambos lados por fallas paralelas levantadas, entre las cuales el terreno se ha hundido.
Relieve costero	Descripción
Península	Trozo de tierra rodeada de agua por todas partes menos por una.
Istmo	Sector más o menos estrecho que une la península al continente.
Isla	Porción de tierra completamente rodeada por agua.
Archipiélago	Un conjunto de islas próximas y relacionadas entre sí.
Cabo o punta	Parte de la costa que se adentra en el mar más que el resto del litoral.

Golfo	Es una entrada de mar, habitualmente de forma redondeada.
Bahía	Es similar al golfo, pero de menores dimensiones y aún más pequeñas la ensenada y la cala.
Ría	Es una lengua de mar que ocupa el último tramo de un valle fluvial. Cuando el brazo de mar ocupa un valle glacial, forma un fiordo.
Delta	Territorio triangular formado en la desembocadura de un río por la sedimentación de los materiales transportados.
Estuario	Desembocadura de un río en mar abierto, ocupado por mareas marinas.
Albufera	Laguna litoral de agua salada, separada del mar por un cordón de arenas.

Fuente: Modificado de Lugo-Hubp, 2011.

Se recomienda registrar la posición de la pendiente de acuerdo con la Figura 2 y el gradiente mediante la utilización de un clinómetro o clisímetro (nivel de Abney). La Figura 2b muestra los suelos y rocas de planicies onduladas en zonas de karst donde en la parte baja no se encontrarán sedimentos sino suelos de otro grupo.

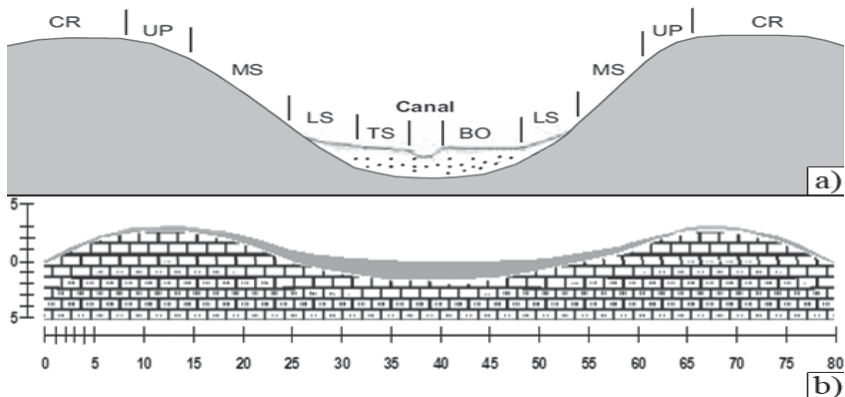


Figura 2. Posición de la pendiente en: a) montañas (FAO, 2009) BO = Base (plano); TS = Punta de pendiente o ladera; LS = Pendiente baja (pie de pendiente); MS = Pendiente media (espalda de ladera); UP = Pendiente alta (hombro); CR = Cresta (cumbre). Y b) montículos y lomeríos kársticos (Bautista et al., 2003).

El gradiente de la pendiente debe registrarse en grados con números enteros o decimales. Para convertir el valor de la pendiente expresada en porcentaje a grados sexagesimales se utiliza la siguiente ecuación:

$$PG = ATN\left(\frac{PP}{100}\right)$$

donde: PG = pendiente en grados; ATN = arcotangente o inversa de la tangente; PP = pendiente en porcentaje.

Si el cálculo se realiza con una calculadora, debe estar configurada en grados y no en radianes. Si se desea emplear una hoja de cálculo de Excel puede utilizarse la siguiente fórmula:

$$=GRADOS(ATAN(Celda/100))$$

donde: GRADOS () = función de Excel para convertir un ángulo expresado en radianes a grados; ATAN () = función de Excel para calcular la tangente inversa de un ángulo expresado en radianes; Celda = intersección de una fila y columna en una hoja de Excel.

Para convertir el valor de la pendiente expresada en grados a porcentaje se utiliza la siguiente ecuación:

$$PP = TAN(PG) * 100$$

donde: PP = pendiente en porcentaje; TAN = tangente; PG = pendiente en grados.

Si el cálculo se realiza con una calculadora, ésta debe estar configurada en radianes. Si se desea utilizar una hoja de cálculo de Excel puede utilizarse la siguiente fórmula:

$$=TAN(RADIANES(Celda)) * 100$$

Donde: TAN = función de Excel para calcular la tangente de un ángulo expresado en radianes; RADIANES = función de Excel para convertir un valor expresado en grados a radianes; Celda = intersección de una fila y columna en una hoja de Excel.

Uso del suelo y cubierta vegetal

El tipo de uso del suelo tiene una gran influencia en la tasa de formación y degradación de los suelos. El factor biológico, que incluye a la vegetación y a la fauna del suelo, posee un papel muy importante en el desarrollo de los suelos, específicamente la cubierta vegetal interviene en procesos de: a) fragmentación del material parental por el efecto de las raíces de las plantas, b) aporte de nutrimentos y c) suministro de materia orgánica (Byers et al., 1938).

El tipo de cubierta vegetal del sitio puede registrarse con base en el Cuadro 2. La información del uso del suelo puede registrarse de manera general o detallada. Para suelos con uso agrícola deben indicarse también los tipos de cultivos, pero será muy importante conocer y reportar la cubierta vegetal natural.

Cuadro 2. Tipos de vegetación

Tipos de vegetación			
Manglar	M	Selva alta subperennifolia	SAS
Popal	Po	Selva mediana subperennifolia	SMS
Tular	T	Selva mediana caducifolia	SMC
Pastizal	Pa	Selva baja subperennifolia	SBS
Zacatonal	Z	Selva baja caducifolia	SBC
Matorral desértico micrófilo	MDM	Bosque caducifolio	BC
Matorral desértico rosetófilo	MDR	Bosque de cedro y táscate	BCE
Matorral crasicaule	MC	Bosque de encino	BE
Matorral submontano	MS	Bosque de pino-encino	BPE
Chaparral	C	Bosque de pino	BP
Mezquital	MZ	Bosque de oyamel	BO
Selva alta perennifolia	SAP	Otra (especificar)	-

Fuente: Siebe et al., 2006.

Material parental

El material parental es el estado inicial de la materia sólida que forma parte de la génesis del suelo. El material parental influye en la pedogénesis otorgándole al suelo características mineralógicas, físicas y químicas específicas, tales como resistencia al intemperismo, liberación de elementos, clase textural, cantidad de tierra fina, fertilidad y toxicidad según la composición mineral de los suelos. Este material debe ser descrito de la manera más precisa posible, indicando su origen y naturaleza. Esto es particularmente importante en Leptosols (ver capítulo “Descripción de perfiles de suelo para estudios de taxonomía”). Esta propiedad puede registrarse utilizando el Cuadro 3. La Figura 3 muestra ejemplos de diferentes tipos de material parental.

Cuadro 3. Cobertura, tamaño y espaciamiento de los afloramientos rocosos

Cobertura en la superficie		Clases de tamaño (cm)			Espaciamiento (m)	
N	Ninguna	GF	Grava fina	0.2-0.6	1	> 50
MP	Muy poca	GM	Grava media	0.6-2	2	20-50
P	Poca	GG	Grava gruesa	2-6	3	5-20
C	Común	P	Piedras	6-20	4	2-5
M	Mucha	C	Cantos	20-60	5	< 2
A	Abundante	CG	Cantos grandes	60-200		
D	Dominante					

Fuente: FAO, 2009.

Se recomienda la identificación de la diversidad de rocas del sitio de estudio (especialmente en zonas de rocas metamórficas), ya que este factor puede ser el origen de la diversidad de edáfica del sitio. Los suelos desarrollados a partir de rocas metamórficas pueden presentar el mismo sitio y tiempo de formación, pero propiedades muy diferentes.

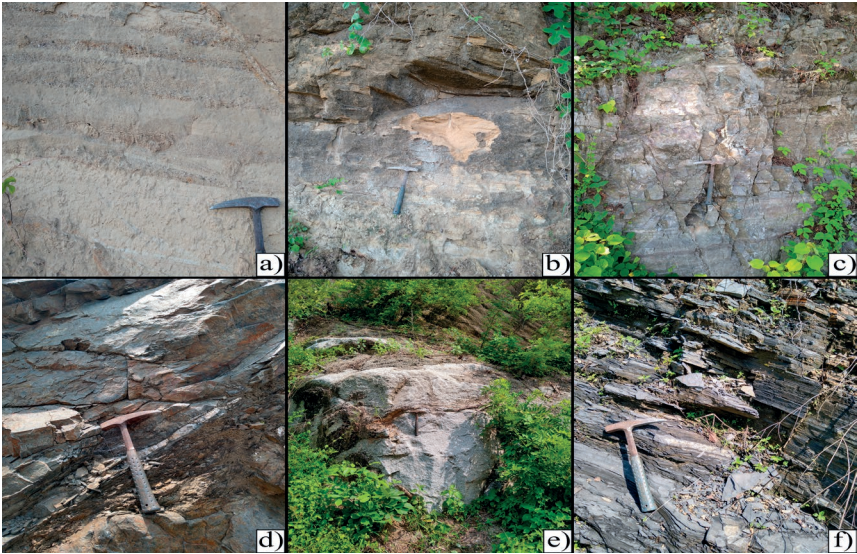


Figura 3. Diferentes tipos de material parental: a) arenisca (roca sedimentaria); b) arenisca de grano grueso (roca sedimentaria); c) roca caliza; d) esquistos verde (roca metamórfica); e) granito (roca ígnea); f) lutita-limolita (roca sedimentaria).

Afloramientos rocosos

Los afloramientos rocosos se refieren a la exposición de la roca madre en la superficie del suelo. Deben ser descritos en términos de porcentaje de cobertura en la superficie, junto con información referente a su tamaño y espaciamiento (Cuadro 3).

Porcentajes altos de afloramientos rocosos pueden representar limitaciones para las actividades agrícolas, en la Figura 4 se muestran ejemplos de suelos con limitaciones para la labranza debido a elevados porcentajes de exposición de la roca. La Figura 5 muestra las clases recomendadas para registrar el porcentaje de cobertura de afloramientos rocosos. Además, pueden utilizarse imágenes del sitio de estudio capturadas por vehículos aéreos no tripulados para realizar la cuantificación de los afloramientos rocosos (Figura 6).



Figura 4. Afloramientos rocosos

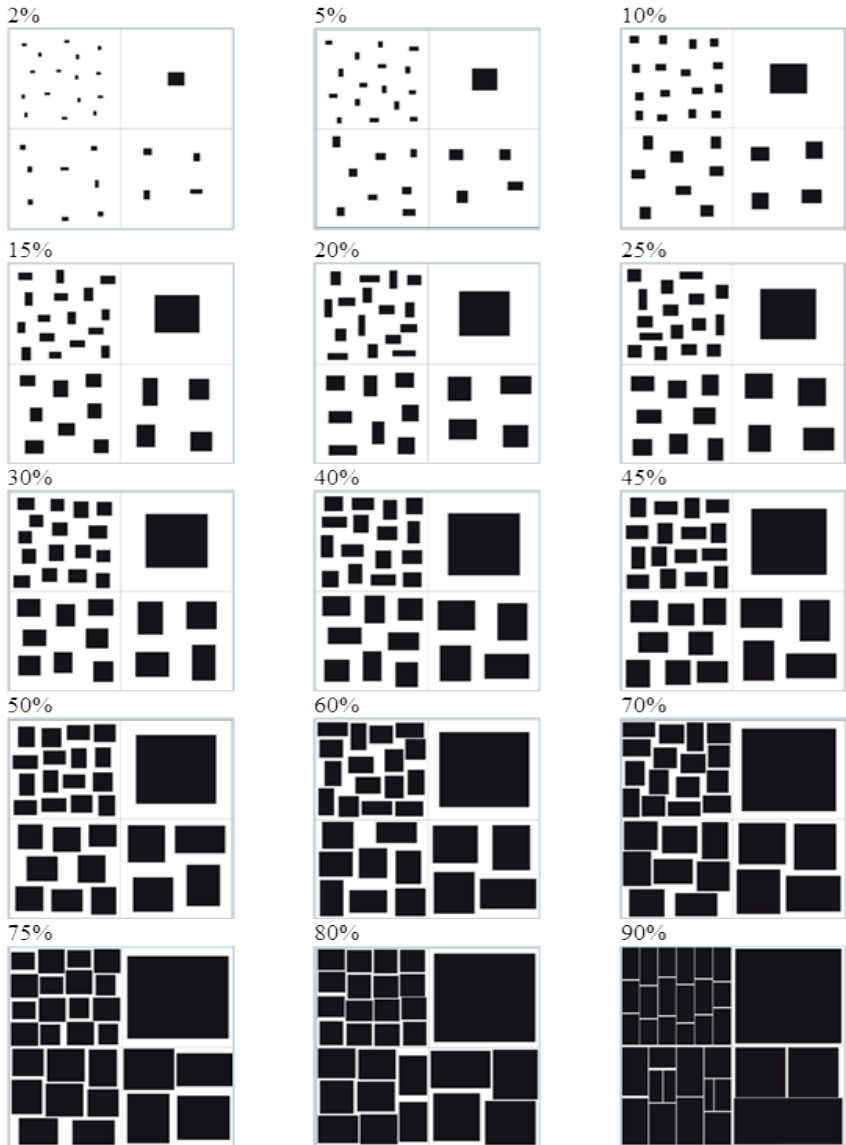


Figura 5. Cobertura en porcentaje de afloramientos rocosos (Schoeneberger et al., 2012).



Figura 6. Los vehículos aéreos no tripulados, drones, son una herramienta muy útil para cuantificar los afloramientos de roca, tan importantes en zonas de karst. Foto: Neftaly Guijón.

Evidencias de erosión

La erosión del suelo se refiere a un proceso de pérdida natural o inducida de partículas de suelo que se produce por un movimiento que lleva a las partículas desde un sitio hacia otro. También existe la erosión inducida por el hombre, que es el resultado de un manejo inadecuado de los suelos (FAO, 2009) (por ejemplo, en el cambio y/o remoción de la vegetación natural, el tipo de cultivo y la dirección de los surcos en el sentido de la pendiente).

Las evidencias de erosión pueden registrarse utilizando el Cuadro 4. Si fuera el caso y el objetivo, pueden medirse los tamaños de los surcos, cárcavas y galerías. Se recomienda hacer un registro fotográfico de los tipos de erosión o incluso, un vuelo con un vehículo aéreo no tripulado podría ser de gran ayuda para la elaboración de mapas de los tipos de erosión.

Cuadro 4. Evidencias de erosión del suelo

Sin evidencias de erosión	SE
Erosión hídrica o deposición	HoD
Erosión laminar	Lm
Erosión por surcos	S
Erosión por cárcavas	C
Erosión por galerías (túneles)	G
Deposición por agua	DA
Erosión hídrica y eólica	HyE
Movimiento en masa (derrumbes y fenómenos relacionados)	M
No conocido	NC
Erosión eólica o deposición	EoD
Deposición por el viento	DV
Erosión eólica y deposición	EyD
Movimientos de arena	MA
Deposición de sales	DS

Erosión por labranza	Lb
Erosión por la acción de organismos vivos	OV

Fuente: Modificado de FAO, 2009.

Estado del tiempo y condiciones climáticas

El clima es uno de los primeros factores formadores de los suelos reconocidos en la historia de la edafología y de la geografía de suelos (Ortiz-Solorio et al., 2011). Este factor influye en los procesos de intemperismo del material parental, en la acumulación de nutrimentos, en la percolación y drenaje del suelo, en el crecimiento de las plantas, y en la remoción, deposición y translocación de materiales (Byers et al., 1938).

Para su registro se recomienda considerar lo siguiente: a) la clasificación climática propuesta por Köppen y modificada por Enriqueta García de Miranda (2004) junto con la elaboración de gráficas de la longitud del periodo de crecimiento (Bautista et al., 2016b; FAO, 2009); así como, b) el estado del tiempo meteorológico al momento de la descripción; y, c) el estado del tiempo de días anteriores (Cuadro 5).

Se recomienda realizar el análisis de la información climatológica con el software Clic-MD (Bautista et al., 2016b), ya que con éste es posible un análisis de miles de datos en segundos: calcula la longitud del periodo de crecimiento (LPC) de manera gráfica y automatizada, como se ejemplifica en la Figura 7.

La LPC se refiere a la cantidad de meses donde la precipitación pluvial es mayor que la mitad de la evapotranspiración, lo cual se puede interpretar como el periodo continuo del año que presenta las condiciones de humedad y temperatura idóneas para la producción de cultivos. Este cálculo puede utilizarse, por ejemplo, con la finalidad de identificar los meses de lluvia continua de un sitio para el manejo de la agricultura de temporal. El cálculo de la LPC puede realizarse con el software Clic-MD utilizando los datos climáticos mensuales de las estaciones meteorológicas de la Conagua (2020).

Cuadro 5. Descriptores para el estado del tiempo en el sitio de muestreo

Estado del tiempo al momento de la descripción	
Soleado / despejado	SD
Parcialmente nublado	PN
Nublado	NU
Neblina	NE
Lluvioso	LL
Granizo	GR
Nieve	NI
Temperatura ambiente baja (< 12° C)	TB
Viento fuerte	VF
Estado del tiempo hace algunos días	
Sin lluvia en el último mes	ET1
Sin lluvia en la última semana	ET2
Sin lluvia en las últimas 24 horas	ET3
Lluvioso con precipitación ligera (< 25 mm/h)	ET4
Lluvia torrencial por algunos días o tormenta en las últimas 24 horas (>25 mm/h)	ET5
Periodo extremadamente lluvioso (< 75mm/h) o de deshielo en los últimos días	ET6

Fuente: FAO, 2009.

En el reporte del trabajo de campo se recomienda observar la congruencia entre los factores formadores del suelo. Por ejemplo, si el clima es Aw_2 la vegetación no podrá ser de matorral espinoso, o si el clima es templado frío la vegetación no será de selva mediana caducifolia. La revisión de la congruencia entre los factores formadores y los suelos registrados en la zona de estudio le dará mayor certeza a la investigación.

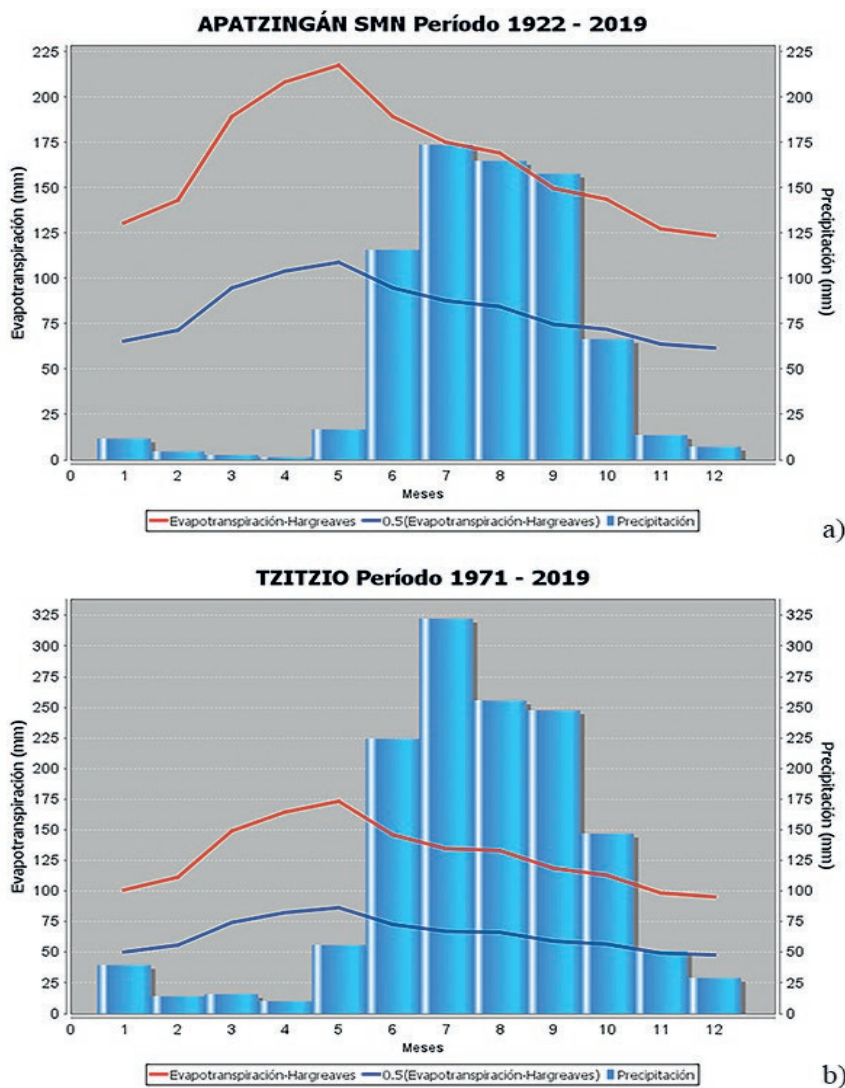


Figura 7. Ejemplos de gráficas de la longitud del periodo de crecimiento para una zona: a) cálida subhúmeda ubicada en el municipio de Apatzingán y b) una zona semicálida subhúmeda ubicada en el municipio de Tzitzio, estado de Michoacán, México.

Excavación de la calicata y descripción del perfil de suelo

2

Francisco Bautista
Ángeles Gallegos

Los material para el trabajo en campo son los siguientes: sistema de posicionamiento global (GPS), guía para la descripción de suelos, guía para la clasificación de suelos, cuaderno de notas, formulario para llenado de datos, tabla Munsell o colorímetro, palas curvas y rectas (limpias), azadón, pico, barra, barreno, martillo, espátulas, cámara fotográfica, potenciómetro de campo, conductímetro de campo, vernier, cinta métrica de 2 m de longitud (con divisiones cada 10, 5 y 1 cm), lupa, microscopio digital, electrodos de platino, magnetómetro, pistola de FRX y pistola de IR (Figura 8).

En el equipo de campo se deben llevar los siguientes reactivos: ferrocianuro de potasio al 1 %, α dipiridilo 0.2 %, fenoltaleína indicadora 1 %, fluoruro de sodio 1M, ácido clorhídrico 10 %, hidróxido de sodio 0.5M y pirofosfato de sodio 0.1M. También hay que incluir en el material de campo una piseta con agua potable, piseta con agua destilada y soluciones buffer pH 4 y pH 7.

Así mismo deben incluirse para el trabajo de campo: mapas topográfico, geológico, geomorfológico, de vegetación de la zona y de uso de la tierra con una escala adecuada que permita representar de la mejor forma esta información (al menos 1:25 000, por ejemplo) para incluir una vista de los suelos desde otra perspectiva. En el Anexo 1 se incluye un formato con el material que se considera necesario para el muestreo de suelos en campo.



Figura 8. Equipo para muestreo de suelos: a) pala curva; b) pala plana; c) azadón; d) barra; e) pico; f) barreno; g) martillo; h) cámara fotográfica; i) vernier; j) cinta métrica.

Para el estudio de la morfología del perfil es necesario realizar un hoyo o calicata en los suelos representativos del sitio de estudio. Para ello, se dibuja un rectángulo de 1.5 m de ancho por 3 m de largo sobre la superficie del suelo, tratando de que uno de los lados de 1.5 m quede expuesto al sol al término de la calicata, tanto para la toma de la fotografía como para descripción del perfil (Bautista et al., 2011) (Figura 9).

Para no ocasionar un disturbio mayor en el sitio, se tratará de sacar el suelo en capas de acuerdo con los horizontes (o lo más cercano a esto posible), para ello se llevarán lonas sobre la cuales se colocará el suelo extraído, una lona para cada capa, por lo que se deberá contar con un mínimo de seis lonas. La idea es que al término del estudio se tape la calicata comenzando por la última capa y continuando hasta la primera.

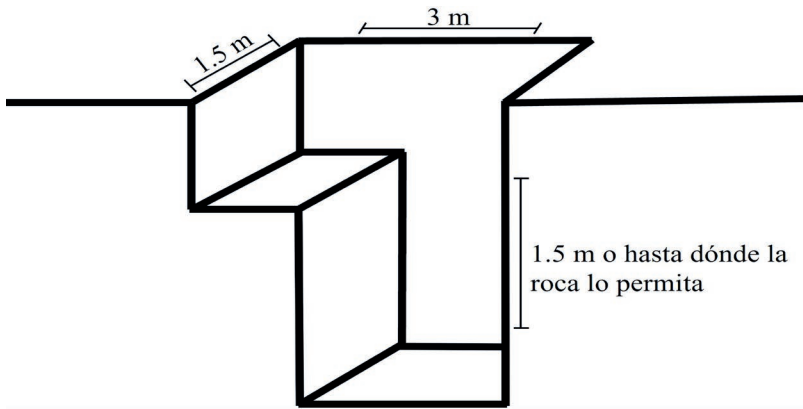


Figura 9. Calicata para la descripción de un perfil de suelo.

El objetivo de esta práctica es hacer el menor disturbio posible, es una forma de respeto a la naturaleza y a los propietarios de los predios, que incluso ya se ha convertido en ley en algunos países de Europa.

Se recomienda que la profundidad de la calicata sea de un mínimo de 1.5 m, cuando sea posible, y debe registrarse lo que hay por debajo: roca, acuífero; si es necesario, puede utilizarse una barrena. En suelos someros la calicata se debe realizar hasta donde aparezca la roca. La profundidad del suelo suele servir para la definición de los Leptosols (ver capítulo 5) y como calificador primario en varios grupos de suelo. En agronomía la profundidad efectiva suele ser relevante en la evaluación de tierras.

Una vez abierta la calicata se procede a limpiar el perfil con una brocha para borrar las huellas de las herramientas con las que se cavó. Se procede con la colocación de la cinta métrica por un costado, ya sea por derecha o por izquierda, pero nunca en el centro. Como se comentaba antes, la cinta métrica debe tener divisiones cada 1, 5 y 10 cm, y debe ser de un color contrastante con el perfil (puede ser blanca, negra o parda, principalmente).

Es importante colocar la cinta métrica en la cara del perfil para: a) realizar el registro de las profundidades de los horizontes y b) tener una referencia para las fotografías de la profundidad total de la calicata.

Se recomienda la toma de fotografías de alta calidad para hacer un manejo del color y la textura de la foto para la identificación precisa de los horizontes, así como para la cuantificación de propiedades físicas del suelo, el porcentaje de motas, el porcentaje de concreciones, el porcentaje de pedregosidad, entre otras. La Figura 10 muestra diferentes perfiles de suelo con límites entre horizontes contrastantes.

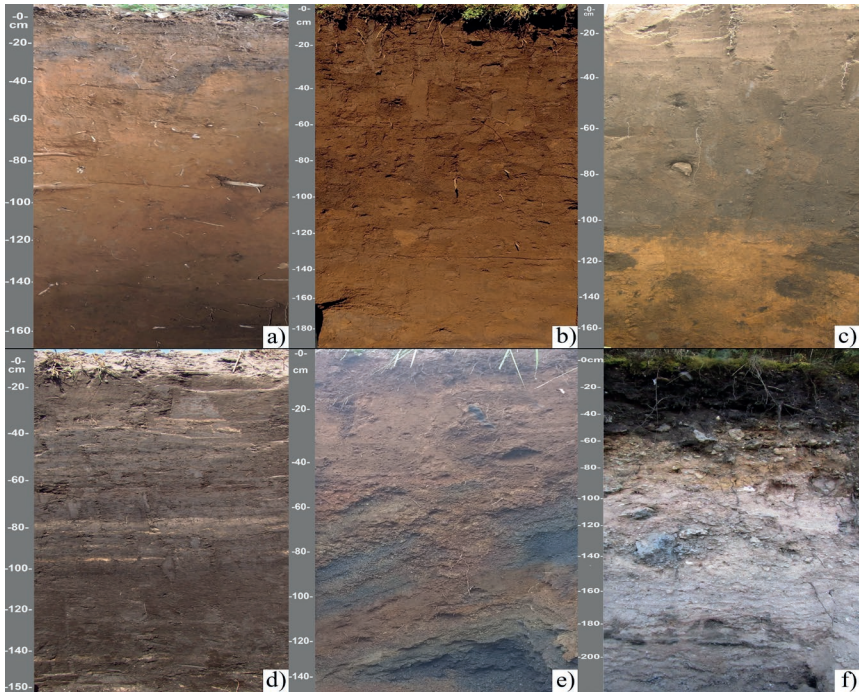


Figura 10. Perfiles de suelos con horizontes contrastantes. El perfil de suelo a) tiene hasta los 40 cm un buen contraste entre sus horizontes, sin embargo, conforme aumenta la profundidad hay menor contraste; en el perfil b) hay un bajo contraste entre sus horizontes, ya que no se pueden diferenciar fácilmente con base en cambios en el color; en el perfil c) pueden diferenciarse claramente dos horizontes gracias a un buen contraste de color, sin embargo, antes de los 100 cm el color es más uniforme; mientras tanto, los perfiles d), e) y f) presentan buenos contrastes entre los colores de sus horizontes.

La fotografía digital del perfil debe tomarse totalmente de frente, evitando inclinar la cámara; además, se tomarán acercamientos por cada horizonte, y registro de los detalles como abundancia de raíces, motas, estructura, etc. Posteriormente, las fotografías se trabajarán con un software especializado para identificar con precisión los horizontes, cuantificar la pedregosidad, motas, concreciones y otros rasgos pedológicos (Figura 11).

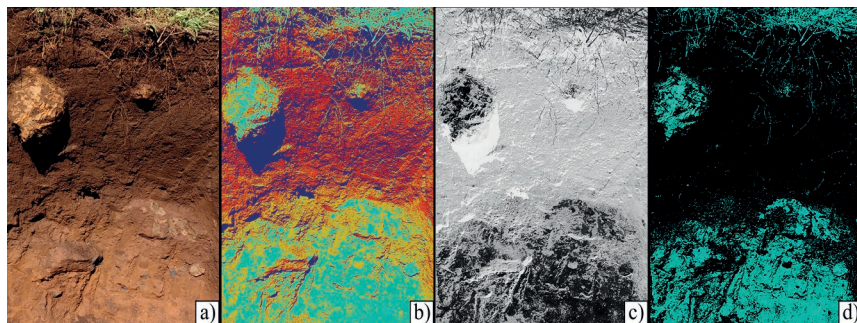


Figura 11. Ejemplo de procesamiento de la imagen digital de un perfil de suelo: a) imagen original capturada en campo; b) aplicación del algoritmo de clasificación no supervisada *k-means*; c) componente S de la conversión de la imagen original al sistema de color HSV; d) extracción de un clúster de la imagen en HSV para la delineación de los horizontes.

Para capturar las imágenes de los perfiles de suelo en campo, es recomendable realizar una limpieza de la cara del perfil con una brocha y, si hay suelo fino adherido a los fragmentos de roca, retirarlo con una navaja (Gallegos et al., 2021). Se debe posicionar la cámara fotográfica de forma perpendicular a la cara del perfil y enfocar la profundidad completa de la calicata (Ortiz et al., 2014). Además, hay que procurar una buena iluminación, preferentemente con luz solar directa (Más-Martínez et al., 2011).

Para el procesamiento de las imágenes hay que considerar lo siguiente: 1) si hay un buen contraste entre los elementos que se quieren distinguir o cuantificar, por ejemplo, entre horizontes o entre fragmentos gruesos y la matriz fina del suelo para decidir si se debe aplicar un preprocesamiento; 2) la fuente de la imagen, si la fotografía es heredada y no tiene una buena calidad es preferible no utilizarla o realizar un procesamiento supervisado; y 3) si hay sombras, rugosidades o zonas muy brillantes, se recomienda realizar un procesamiento supervisado, o la corrección manual de los resultados si es necesario (Gallegos et al., 2021).

De cada horizonte se recolectan aproximadamente 2 kg de suelo con un orden de abajo hacia arriba, considerando todo su es-

pesor. Cada muestra se deposita en bolsas de plástico y se etiqueta con la clave del perfil y la profundidad del horizonte (las herramientas se deben limpiar antes de cada uso para evitar la contaminación de las muestras). El trabajo de toma de muestras debe realizarse por al menos dos personas para aumentar la seguridad en la información y facilitar la recolección de los datos.

La identificación de horizontes

La profundidad del suelo se registra considerando los límites entre los horizontes. Estos límites proveen información de los procesos pedogénicos dominantes y en algunos casos reflejan también los impactos antropogénicos que han ocurrido en el paisaje a través del tiempo (FAO, 2009). Los límites entre horizontes deben registrarse considerando su profundidad, claridad y topografía (Cuadro 6).

Cuadro 6. Claridad de la transición y forma del límite entre los horizontes

Claridad de la transición (cm)			Forma		
Muy abrupto	< 0.5	MA	Suave	S	Superficie con poca o ninguna irregularidad
Abrupto	0.5-2	A	Ondulado	O	Cavidades menos profundas que anchas
Claro	2-5	C	Irregular	I	Cavidades más profundas que anchas
Gradual	5-15	G	Quebrado	Q	Superficie discontinua o interrumpida
Difuso	> 15	D			

Fuente: FAO, 2009; Schoeneberger et al., 2012.

La medición de la profundidad se realiza colocando una cinta métrica desde la superficie (incluyendo a la cobertura orgánica) hacia abajo, y se reporta indicando en centímetros el límite superior e inferior de cada horizonte del perfil.

La claridad se refiere a la distancia vertical del horizonte dentro del cual se ubica el límite y la topografía es la irregularidad del límite entre los horizontes (Schoeneberger et al., 2012).

Para fines de la evaluación de las funciones ambientales de los suelos se requieren horizontes transicionales. Cuando el límite entre los horizontes es gradual y difuso se recomienda tomar las muestras entre los horizontes superior e inferior para tener en cuenta la variabilidad y así poder realizar una mejor y más precisa evaluación.

Evidencias antrópicas y geológicas

Deben registrarse las evidencias de información histórica preservadas en el suelo. Algunos ejemplos de estas evidencias son: suelos fósiles, paleosuelos, horizontes enterrados, ceniza volcánica, suelos desarrollados a partir de sustratos raros, suelos que contienen artefactos de la historia y suelos sometidos a un uso histórico (Lehmann et al., 2008). En la Figura 12 se muestran dos tipos de suelos con información histórica, de tipo cultural y de tipo geológica.

Si lo que se busca es la identificación de sitios apropiados para el establecimiento de asentamientos humanos, debe considerarse la presencia de contaminantes, la humedad del ambiente y la generación de polvo en el sitio; para lo cual se evalúan características de los suelos como: la estructura, la profundidad del acuífero y la cercanía a fuentes de contaminación en el sitio (Bautista et al., 2016a) (Figura 13). Para evaluar la aptitud del suelo para el establecimiento de asentamientos humanos es necesario observar el sitio y registrar una clasificación (Cuadro 7).

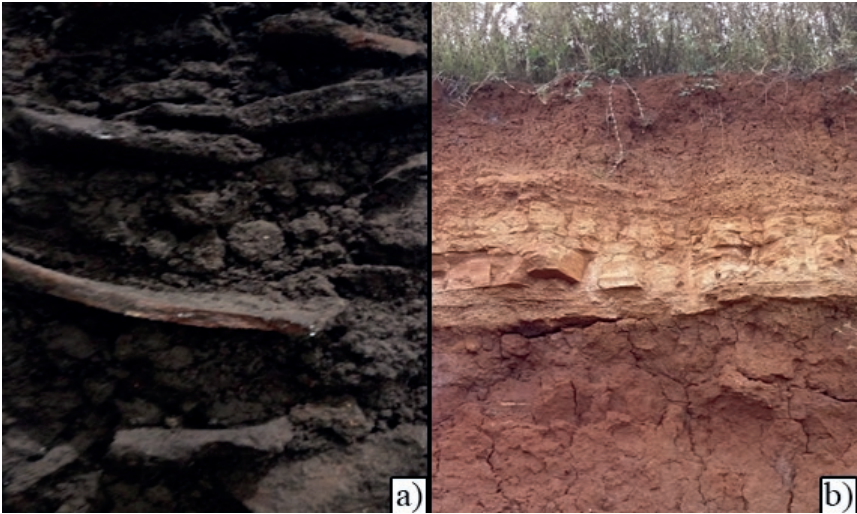


Figura 12. Ejemplos de evidencias de uso antiguo de los suelos: a) evidencias antropológicas (Terra preta de Brasil con artefactos de cerámica); b) evidencias de ambientes antiguos (suelos enterrados de Michoacán, México).



Figura 13. Ejemplo de fuentes de contaminación del suelo.

Cuadro 7. Identificación de contaminantes en el sitio

Clasificación de contaminantes basada en evidencia específica	
Sin evidencia de fuentes de contaminaciones difusas ni puntuales.	Clase 1
Con evidencia de una fuente de contaminación difusa, pero sin evidencia de una fuente de contaminación puntual.	Clase 2
Con evidencia de más de una fuente de contaminación difusa, pero sin evidencia de fuentes de contaminación puntuales.	Clase 3
Con evidencia de fuentes de contaminación puntual que no requieren de acciones de remediación.	Clase 4
Con evidencia de fuentes de contaminación puntual que requieren medidas de remediación.	Clase 5

Fuente: Lehmann et al., 2008.

Naturalidad del suelo

La naturalidad del suelo es un concepto que se utiliza para evaluar el grado de conservación o de perturbación. Esto es de gran relevancia para la identificación de zonas que conservan sus comunidades microbianas autóctonas que en un futuro podrían ser fuente de diversos productos, como “súper-antibióticos” y bacterias degradadoras de plásticos, entre otros.

Para evaluar la naturalidad del suelo es necesario expresar el tipo de uso del suelo en clases de aptitud de la siguiente manera: si el perfil de suelo fue desarrollado naturalmente, sin alteraciones antrópicas visibles y sin drenaje artificial, la aptitud es “muy alta”; en cambio, si hay un desarrollo natural del perfil con un horizonte superficial poco alterado, la aptitud es “alta”; en otros casos, por ejemplo usos agrícolas o urbanos, la aptitud es “baja”. La Figura 14 muestra una modelación de pérdida de naturalidad del perfil por degradación del horizonte superficial del suelo.



Figura 14. Ejemplo de la pérdida de la naturalidad del perfil de suelo por erosión del horizonte superficial.

Análisis de suelos en campo para la evaluación de las funciones ambientales

3

Francisco Bautista
Ángeles Gallegos
Norma García

Medición del color del suelo en campo

El color de un horizonte del suelo se forma principalmente a partir de partículas muy finas compuestas por ácidos fúlvicos y húmicos (color oscuro), óxidos de hierro (amarillo, pardo, anaranjado, rojo y negro), manganeso (negro) y por el color de su material parental (FAO, 2009). Debido a estas características, el color del suelo expresa su contenido de materia orgánica (Figura 15), tipos de minerales, procesos de óxi-do-reducción e incluso evidencias de contaminación (Figura 16).






Grupos	I	II	III	IV	V
Muestras y color					
	Blanco rosáceo	Gris	Gris pardusco	Marrón grisáceo	Gris oscuro

Figura 15. Diferentes colores de muestras de suelo y de contenido de materia orgánica (García et al., 2020).

El registro del color del suelo en campo se realiza en seco y en húmedo sin la incidencia directa de los rayos del sol mediante la comparación de un agregado recientemente quebrado con la *Carta de color de suelo Munsell* (Munsell Color Company, 2000). Esta muestra una notación sistemática con letras y números que indican el matiz, intensidad y pureza del color. El *hue* o “matiz” se refiere al color espectral dominante, ya sea rojo, amarillo, verde, azul o violeta; el *value* o “intensidad” es la claridad u oscuridad en los rangos de color de oscuro a claro; y “croma” o pureza es la fuerza del rango de color desde pálido a fuerte (FAO, 2009).

En el caso de que existan motas en el perfil de suelo, deben registrarse y medirse (por forma, tamaño y abundancia). Las fotografías digitales y la medición *in situ* de la abundancia de las motas son muy recomendables (Jiang et al., 2021).

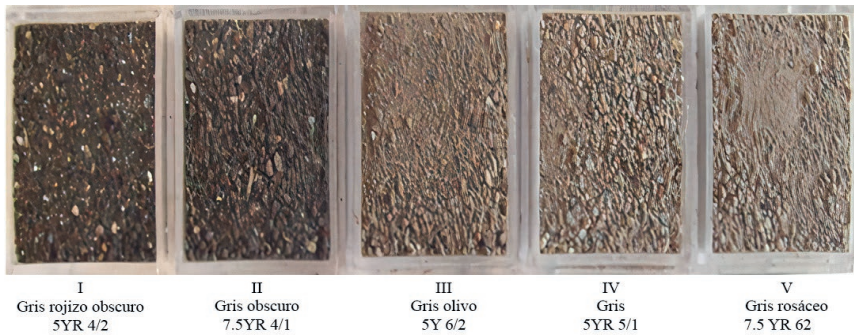


Figura 16. Ejemplo de suelos superficiales de la Ciudad de México: diferentes colores y cantidades de metales pesados (Delgado et al., 2019).

Es posible utilizar otro tipo de equipos para la medición del color del suelo que omiten la subjetividad del observador, como los colorímetros de mano y de mesa (Figura 17). A su vez, en tiempos recientes se han desarrollado aplicaciones para dispositivos móviles que pueden ser de gran utilidad para la descripción de esta propiedad, ya que consideran otro tipo de notaciones, como la RGB (Cortés et al., 2015), CIE $L^*a^*b^*$ (Vodyanitskii y Savichev, 2017) o el sistema CIE-XYZ que se basa en la transformación de los otros sistemas (Vis-

carra-Rossel et al., 2006). Un ejemplo de estas aplicaciones para dispositivos móviles es Color Grab (Loomatix, 2018).

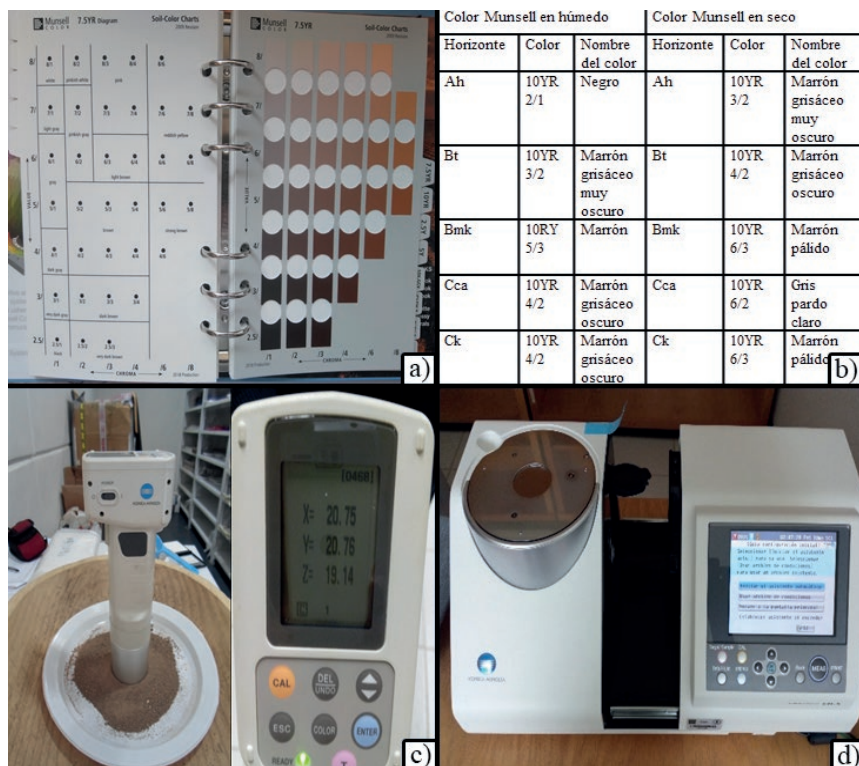


Figura 17. Medición del color en muestras sólidas de suelo utilizando diferentes instrumentos: a) tabla Munsell; b) diferencia de colores entre un suelo húmedo y seco; c) colorímetro para sólidos manual; d) colorímetro de tipo mesa.

Fragmentos gruesos

Los fragmentos gruesos del suelo se refieren al material de tamaños mayores a 2 mm que es claramente visible en el perfil. Los fragmentos gruesos reflejan el origen y estado de desarrollo del suelo e influ-

yen en su contenido de nutrimentos, en el movimiento del agua a través de este y en su uso o manejo. Por ejemplo, los altos porcentajes de fragmentos gruesos en el suelo pueden limitar su aptitud agrícola (FAO, 2009), pero también disminuyen la erosión y conservan la humedad.

Para efectos de la clasificación del suelo, los fragmentos gruesos se describen considerando su abundancia, tamaño, forma, estado de intemperismo y naturaleza. Con el software *Soil & Environment*, se registra su porcentaje, a partir de un cuadro de dialogo que muestra las imágenes de referencia de la Figura 5. Puede considerarse también su clasificación de acuerdo con el tamaño de los fragmentos (Cuadro 8). En la Figura 18 se muestran dos perfiles de suelo con porcentajes de fragmentos gruesos contrastantes.

Cuadro 8. Clasificación de los fragmentos rocosos

Clases de tamaño	Clave	(cm)
Grava fina	F	0.2-0.6
Grava media	M	0.6-2
Grava gruesa	G	2-6
Piedras	P	6-20
Cantos	C	20-60
Cantos grandes	CG	>60

Fuente: FAO, 2009.



Figura 18. Perfiles de suelo con diferentes porcentajes de fragmentos gruesos: a) perfil sin fragmentos gruesos; b) perfil con porcentaje alto de fragmentos gruesos.

Densidad aparente

La densidad aparente del suelo se define como la masa de una unidad de volumen de suelo seco que incluye tanto a los sólidos como al espacio poroso (FAO, 2009). Esta propiedad es fundamental para el cálculo de la cantidad de tierra fina en kg m^{-2} o t ha^{-1} , con lo cual se calcula el balance hídrico y de nutrimentos de los suelos, además influye en su permeabilidad y profundidad fisiológica (Siebe et al., 2006).

Los valores altos de densidad aparente indican impedimentos para el crecimiento de raíces, reducción de la infiltración del agua, aireación del suelo reducida y posibles alteraciones antrópicas, como la formación de un piso de arado.

Para estimar la densidad aparente del suelo en campo se pueden utilizar las siguientes técnicas:

- a) El método del cilindro para suelos sin estructura (Arenosols, Solonchaks), o con estructura débil (Andosols), o estructura de estabilidad media donde los agregados no sean un impedimento (Cambisols, Gypsisols, Calcisols). En la Figura 19 se muestra un cilindro en un perfil de suelo.
- b) En suelos pedregosos donde no se puede introducir el cilindro y los agregados no son estables, se recomienda el método de la probeta.
- c) En suelos con grava abundante y sin afloramientos rocosos se puede utilizar el método del hoyo cubierto con agua.
- d) En suelos con agregados muy estables, como Vertisols, Luvisols, Acrisols, y otros en los cuales se dificulta la introducción del cilindro, se recomienda la técnica de la parafina.

Recientemente se han producido unos penetrómetros pequeños (de bolsillo), con los cuales es posible medir la densidad aparente de los suelos, después de su calibración (Figura 19b).

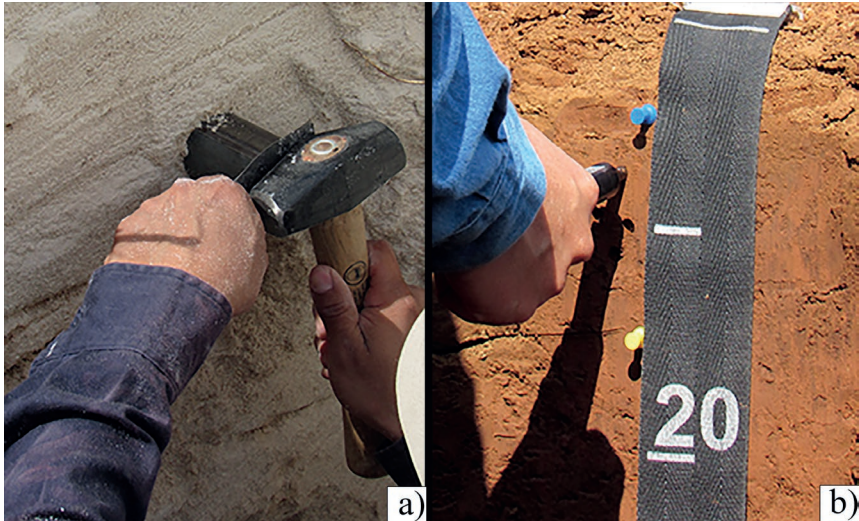


Figura 19. Dos métodos para estimar la densidad aparente del suelo en campo: a) extracción de un cilindro y b) uso de penetrómetro de bolsillo.

Estructura (forma, tamaño, grado y estabilidad de los agregados)

La estructura se refiere a la organización de las partículas del suelo en agregados o “peds” resultantes de los procesos pedogenéticos (FAO, 2009). En la Figura 20 se muestran ejemplos de diferentes tipos de estructura de los suelos.



Figura 20. Ejemplos de diferentes tipos de estructura en los suelos: a) agregado tipo cuña con caras de deslizamiento; b) agregado tipo bloques subangulares; c) arriba, un horizonte masivo sin agregación y, abajo, agregados tipos columnas; d) agregado tipo columnar; e) agregado tipo migajón; f) agregado laminar con óxidos de hierro.

La estructura influye en el balance hídrico y térmico, en la aireación, actividad biológica y en la erosión del suelo. Para la descripción de la estructura en campo es recomendable que el suelo se encuentre seco o ligeramente húmedo. Se debe tomar un terrón grande de varias partes del horizonte y a partir de la observación se determina su forma, tamaño, grado y estabilidad.

Cuando el suelo no forma agregados, la estructura puede ser de granos simples, como en los Arenosols (ver capítulo 5); masiva (coherente), como en los Solonetz (ver capítulo 5); y laminar (coherente). Cuando sí se forman agregados como producto de los materiales cementantes (carbonato de calcio, yeso, materia orgánica, hierro y silicio), los procesos de formación pueden ser: por ensamble biótico (granular y bloques subangulares); por separación de forma abiótica (bloques subangulares, bloques angulares, prismática, columnar y laminar); y por fragmentación o compactación (laminar, grumosa, migajón y terrones creados por fragmentación).

En la descripción del perfil deben tomarse fotografías de los agregados y se debe tener cuidado de no romperlos, un error de novato es romper los agregados (columnas, prismas y cuñas) y reportar sólo bloques subangulares o angulares. Para evaluar las funciones ambientales de los suelos se utiliza el software *Soil & Environment* (Bautista et al., 2016a). También se recomienda describir la estructura del suelo de acuerdo con el Cuadro 9.

Cuadro 9. Tipo, clase y tamaño de los agregados en perfiles de suelos

Tipo	Clase	Tamaño (mm)
Grano suelto		
Masiva, amorfa, coherente, pero sin un patrón de agregación		
Granular, esferoidales	Fino	2
	Medio	2-5
	Grueso	5-10

Bloques subangulares, vértices redondeados, se mide el eje más largo	Fino	10
	Medio	10-20
	Grueso	20-50
	Muy grueso	50
Bloques angulares, vértices angulares, se mide el eje más largo	Fino	10
	Medio	10-20
	Grueso	20-50
	Muy grueso	50
Laminar, se miden en espesor de la lámina	Fino	2
	Medio	2-5
	Grueso	5
Prismática, caras verticales bien definidas, bordes afilados, se miden a lo ancho	Fino	20
	Medio	20-50
	Grueso	50-100
	Muy grueso	100
Columnar, caras verticales, bordes no afilados, redondos o irregulares, se miden a lo ancho	Fino	20
	Medio	20-50
	Grueso	50-100
	Muy grueso	100
Peds cuneiformes delimitados por slickensides, en Vertisols, se miden a lo ancho	Fino	10-20
	Medio	20-50
	Grueso	50-100
	Muy grueso	100
Aterronado: terrones de gran tamaño creados por perturbaciones mecánicas	Cualquier tamaño	

Quando un horizonte presenta agregados con diferente tipo, tamaño o estabilidad debe registrarse cada uno de éstos. Se recomienda observar con lupa o microscopio de campo estos agregados, su interior, su superficie y, si es posible, tomar fotografías. En el caso de revestimientos de arcilla, una fotografía sería una clara evidencia que podría medirse con un microscopio.

En algunos casos puede haber confusión entre los agregados y la roca intemperizada. Para identificarlos puede utilizarse el color y la textura del suelo, así como el contenido de materia orgánica. Se debe buscar y comparar entre una roca verdadera, una roca intemperizada y un agregado.

Para identificar la estabilidad se depositan agregados de tamaños similares (con diámetros que van entre 3 y 10 mm) en una cápsula de porcelana; después de saturarlos con agua, se rota suavemente la cápsula durante 30 segundos (Figura 21).



Figura 21. Estimación de la estabilidad de los agregados del suelo.

Finalmente, la evaluación de la estabilidad de los agregados se realiza de la siguiente manera: 1) si no hay descomposición o sólo fragmentos grandes, corresponde a “muy alta”; 2) si dominan los fragmentos grandes sobre los pequeños, es “alta”; 3) si hay igual número de fragmentos grandes y pequeños, es “mediana”; 4) si dominan los fragmentos pequeños sobre los grandes, será “moderada”; 5) si sólo hay fragmentos pequeños y turbidez notable en el agua, es “baja”; y 6) si presenta desagregación total y alta turbidez en el agua, es “muy baja” (Siebe et al., 2006).

Estimación de la textura en campo

La textura del suelo se refiere a la proporción de los tamaños de partículas en un determinado volumen de suelo (FAO, 2009). Para medir la clase textural de los suelos en el laboratorio puede utilizarse el método AS-09 de la Semarnat (2002). A partir del método de laboratorio se obtienen porcentajes de arena, limo y arcilla, los cuales se ubican en el triángulo de texturas para identificar la clase textural. En primer lugar, se debe marcar el porcentaje de arena siguiendo la línea inclinada con dirección hacia arriba; posteriormente, se ubica el porcentaje de limo siguiendo la línea inclinada hacia abajo; por último, se marca el porcentaje de arcilla siguiendo la línea horizontal. El punto donde se crucen las tres líneas corresponderá a la clase textural de la muestra analizada (Figura 22).

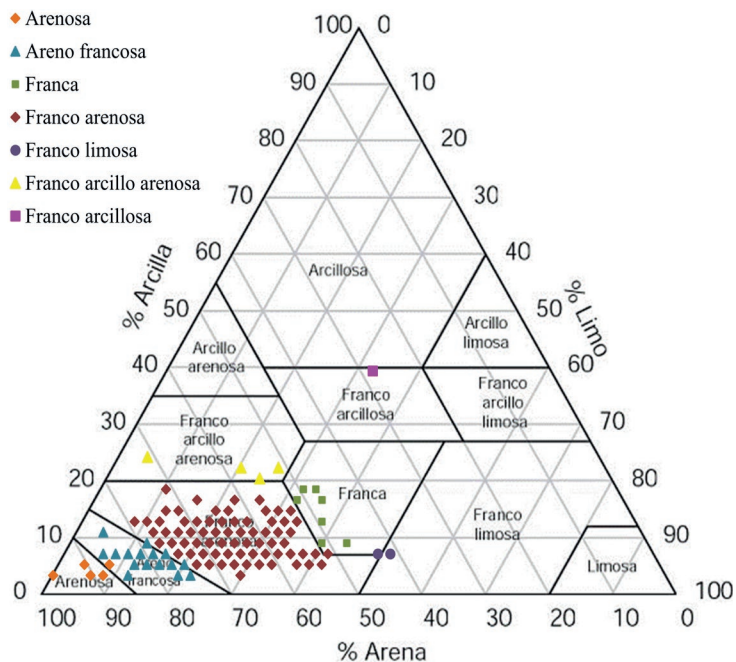


Figura 22. Ejemplos de muestras de suelos ubicadas en el triángulo de texturas con base en el porcentaje de partículas de arena, limo y arcilla.

La textura puede ser estimada en campo a través de una prueba al tacto, para lo cual se humedece una pequeña muestra de tierra fina del horizonte tratando de que al momento de presionarla no presente exceso de humedad, o que se encuentre en un estado húmedo o de capacidad de campo. Posteriormente, se debe moldear, presionar y palpar la muestra para observar sus características de plasticidad, consistencia y granulometría (Cuadro 10).

Cuadro 10. Claves para estimar las clases texturales del suelo en campo

Características del suelo	Textura	Clave
1. No es posible enrollar y formar un cordón, cilindro o chorizo de un diámetro cercano a 7 mm (como el diámetro de un lápiz):		
No ensucia, no es harinoso, no deja material fino en los dedos	Arenosa	A
No es harinoso, es granuloso con material escasamente fino entre los dedos, débilmente moldeable, ligeramente adhesivo a los dedos	Arenosa franca	AC
Similar a la opción b), pero la muestra es ligeramente harinosa	Franco Arenosa	CA
2. Es posible enrollar y formar un cordón, cilindro o chorizo de un diámetro de 3 a 7 mm (cerca de la mitad del diámetro de un lápiz) pero se rompe cuando se trata de formar un cilindro de 2 a 3 cm de diámetro, es moderadamente cohesivo y se adhiere a los dedos:		
Muy harinoso y no cohesivo		
Se sienten algunos granos	Franco limosa	CL
No se sienten granos	Limosa	L
Moderadamente cohesivo, se adhiere a los dedos, tiene una superficie áspera y desmenuzada luego de apretarla entre los dedos:		
Es muy granuloso y no pegajoso	Franco arenosa	CA
Granos moderadamente arenosos	Franca	C

No granuloso, pero distintamente harinoso y algo pegajoso	Franco limosa	CL
De superficie áspera y moderadamente brillante luego de apretarlo entre los dedos, es pegajoso y granuloso a muy granuloso	Franco arcillo arenosa	CRA
3. Es posible enrollar y formar un cordón o chorizo de más o menos 3 mm de diámetro (menos de la mitad del diámetro de un lápiz) y formar un aro de 2 a 3 cm en diámetro, cohesivo y pegajoso, rechinamiento entre los dientes, tiene una superficie moderadamente brillante luego de apretarlo entre los dedos:		
Muy granuloso	Arcillo arenosa	RA
Se ve y se sienten algunos granos, rechinamiento entre los dientes	Franco arcillosa	CR
Moderadamente plástico, superficie moderadamente brillantes	Arcillosa	R
No hay granos visibles, ni se sienten, no hay rechinamiento entre los dientes, plasticidad baja	Franco arcillo limosa	CRL
Plasticidad alta, superficie moderadamente brillante	Arcillo limosa	RA
Plasticidad alta, superficie brillante	Arcillosa	R

Fuente: FAO, 2009.

Los constituyentes del suelo pueden tener las siguientes sensaciones al tacto: a) arcilla, se adhiere a los dedos, es pegajosa, es moldeable, tiene una alta plasticidad y tiene una superficie brillante luego de apretar la muestra entre los dedos; b) limo, se adhiere a los dedos pero no es pegajoso, es débilmente moldeable, tiene una superficie áspera y rasposa luego de apretarlo entre los dedos y posee una sensación harinosa; c) arena, no se puede moldear, no se adhiere a los dedos y se siente muy granulosa (FAO, 2009) (Figura 23).



Figura 23. Ejemplos de algunas pruebas utilizadas para la estimación de textura del suelo en campo: a) muestra de suelo en la palma de la mano; b) formación de un cilindro con la muestra de suelo; c) formación de un aro con la muestra de suelo.

También se puede estimar la textura e incluso el porcentaje de las partículas con el método de extracción de la materia orgánica, en el cual se utiliza un dispersante y las partículas se decantan, por lo que pueden verse en el fondo del tubo de ensayo como se muestra en la Figura 24.

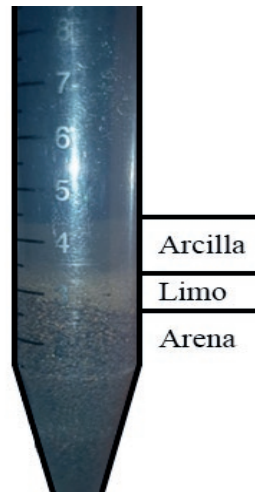


Figura 24. Estimación de la textura del suelo con el método de extracción de la materia orgánica.

Medición del pH

El pH del suelo expresa la actividad de los iones hidrógeno en la solución del suelo. Esta propiedad influye en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, en el intemperismo químico, neoformación de minerales, descomposición de la materia orgánica, humificación, actividad biológica, estructuración y lixiviación de arcillas, así como la movilización de hierro y aluminio en el suelo.

Con el uso del software *Soil & Environment*, el pH del suelo puede estimarse en campo utilizando indicadores de papel, indicadores líquidos, potenciómetros portátiles, etcétera (Figura 25).

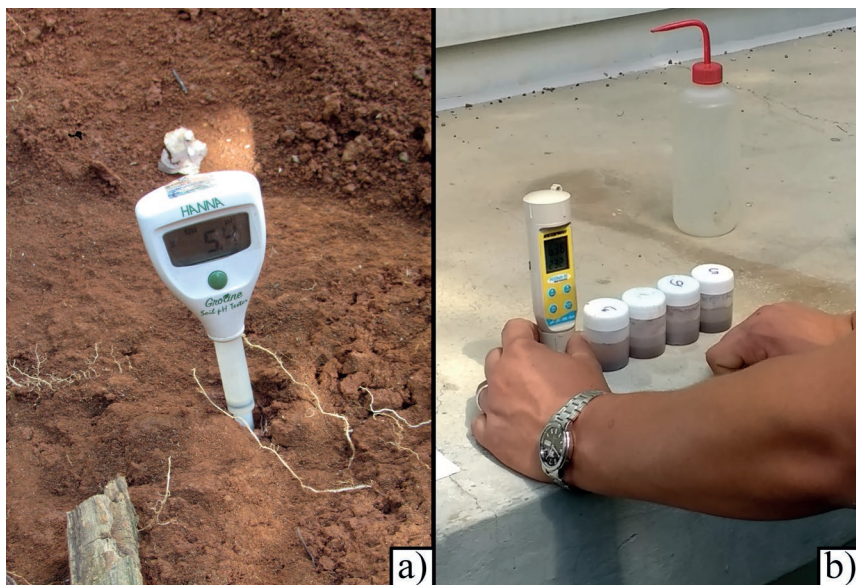


Figura 25. Potenciómetros portátiles para la medición de pH en campo: a) potenciómetro que se utiliza directamente en el suelo; b) potenciómetro que se utiliza con una disolución 2:1 de suelo y agua destilada.

Usualmente para la medición del pH en campo se realiza una suspensión de una parte de suelo por dos partes y media de solución

de cloruro de calcio o agua destilada (1:2.5). La suspensión se agita y se deja reposar por lo menos 15 minutos para después leer el valor del pH utilizando las tiras reactivas o el potenciómetro. En la Figura 26 se muestra una interpretación de los valores de pH en los suelos.

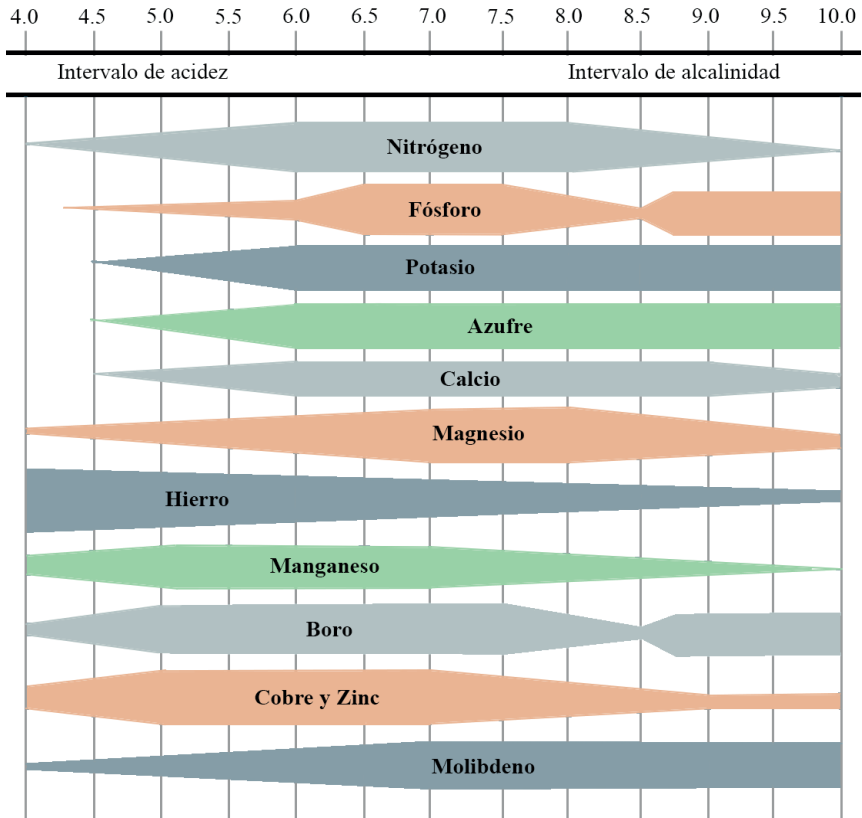


Figura 26. Interpretación de los valores de pH en el suelo con relación a la disponibilidad de nutrientes (Castellanos, 2000).

Medición de la conductividad eléctrica

Es posible estimar en campo la presencia de sales en el suelo a través de la observación del desarrollo de los cultivos, la identificación de especies herbáceas de ambientes salinos, la presencia de sales en la superficie y la observación de una costra superficial agrietada (Siebe et al., 2006). Para medir la conductividad eléctrica se utiliza un conductímetro que se introduce en una suspensión de 1:2.5 de suelo con agua destilada o directamente en el perfil si está húmedo (Figura 27). La conductividad eléctrica puede clasificarse utilizando el Cuadro 11.

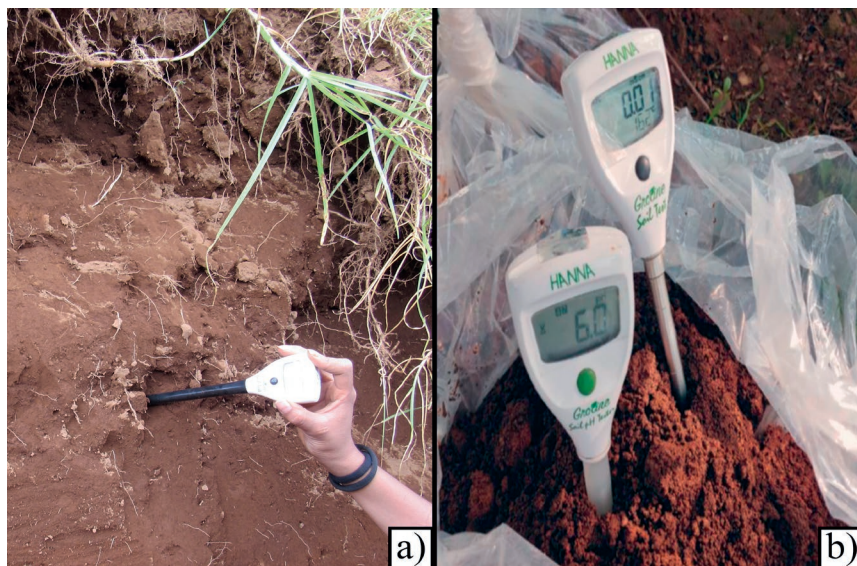


Figura 27. Ejemplos de uso del conductímetro de campo: a) directamente en el perfil de suelo; b) en la muestra colectada en una bolsa de plástico.

Cuadro 11. Clasificación del contenido de sales en el suelo a través de la conductividad eléctrica

Contenido de sal en el suelo		dS m ⁻¹
No salino	NS	<0.75
Ligeramente salino	LS	0.75-2
Moderadamente salino	MS	2-4
Fuertemente salino	FS	4-8
Muy fuertemente salino	MFS	8-15
Extremadamente salino	EXS	>15

Fuente: FAO, 2009.

Estimación de la materia orgánica

La materia orgánica (MO) es el material de origen animal o vegetal que se encuentra descompuesto, parcialmente descompuesto o sin descomposición depositado en el suelo (FAO, 2009). Es posible estimar la MO del suelo con base en: a) su color (ya que se forma a partir de la mezcla de las sustancias orgánicas, que dan un color oscuro; y de los minerales, que aportan colores más claros); b) el pH (ya que en condiciones ácidas la acumulación de materia orgánica es mayor que en condiciones neutras); y c) la textura (ya que los suelos arcillosos retienen más materia orgánica que los suelos arenosos [FAO, 2009]).

Los nomogramas que existen para la estimación de la MO deben ajustarse a las condiciones propias de cada región ya que no son de uso universal. Recientemente se ha probado que es posible estimar la MO del suelo en zonas de karst utilizando el sistema de medición del color CIE L*a*b*, con base en los parámetros de color (García et al., 2020), y realizando un análisis de regresión lineal para cada grupo obtenido (García-Ruiz et al., 2022).

$$SOM_i = X_L L_i + X_{a_i} a_i + X_{b_i} b_i + X_0$$

donde: L = brillo; a = rojez; b = amarillamiento (parámetros del sistema de color CIE $L^*a^*b^*$ que forman una matriz rectangular); y SOMi es un vector de la materia orgánica del suelo.

La estimación de la MO con dicha ecuación resultó aceptable; sin embargo, el problema es que el ejercicio debe realizarse para los suelos de cada región debido a las particularidades de la mineralogía y de los contenidos y calidad de la materia orgánica. Para realizar la estimación de la MO se recomienda utilizar técnicas de aprendizaje automático para la generación de funciones de pedotransferencia. De manera general, el procedimiento para cargar datos y aplicar el algoritmo de árboles de clasificación de regresión M5P utilizando el software WEKA (se describe en el Anexo 2).

Evaluación del grado de humificación del suelo

Las sustancias húmicas son las responsables de varios procesos de regulación en los medios edáficos, como son la sorción y desorción de nutrimentos contaminantes y en algunos casos de la queluviación y quiluviación, en donde se trasladan nutrimentos y contaminantes catiónicos hacia el interior del perfil de suelo o hacia los mantos freáticos. Los métodos que se describen a continuación permiten realizar una evaluación cualitativa del grado de humificación de suelos orgánicos y suelos minerales.

Clasificación de los horizontes de suelos orgánicos con base en sus propiedades organolépticas

Se utiliza en el campo con muestras del horizonte O con la humedad natural y para distinguir los índices de descomposición del horizonte hístico. Las clases de humificación de Von Post se describen a continuación.

- H1. Turba no humificada, cuando se oprime con la mano se libera agua incolora y transparente, los residuos de las plantas que la

- originan se puede distinguir y no contiene material amorfo.
- H2. Turba casi sin humificar: al oprimirse con la mano libera agua pardo-amarillenta, casi transparente, algunos residuos todavía pueden identificarse, no presenta material amorfo.
 - H3. Turba poco humificada: cuando se oprime libera agua turbia, pero no pasan sustancias de la turba entre los dedos, el residuo en la mano no es pulposo, algunos residuos todavía pueden identificarse, no hay material amorfo.
 - H4. Turba ligeramente humificada: cuando se oprime libera agua oscura muy turbia. El residuo es algo pulposo y sus componentes se identifican con dificultad.
 - H5. Turba moderadamente humificada: las estructuras de las plantas aún son evidentes, pero están muy oscurecidas. Cuando se oprime entre las manos algo de las sustancias turbosas pasa entre los dedos, junto con agua muy turbia. El residuo en la mano es muy pulposo o pastoso.
 - H6. Turba descompuesta humificada: está compuesta a partir de plantas cuya estructura no se distingue. Cuando se aprieta entre las manos, alrededor de un tercio de la turba se escapa entre los dedos. El residuo es muy pulposo o viscoso, antes de apretarlo se aprecia la sensación de los residuos de las plantas que la componen.
 - H7. Turba altamente descompuesta: contiene gran cantidad de material amorfo. Cuando se exprime entre las manos alrededor de un tercio de la turba se escapa entre los dedos y la solución que se libera es muy oscura y viscosa.
 - H8. Turba muy altamente descompuesta: contiene una gran cantidad de material amorfo. Cuando se aprieta entre las manos alrededor de dos tercios de la turba se escapa entre los dedos.
 - H9. Turba totalmente descompuesta: cuando se exprime entre las manos se aprecia como una pasta bastante uniforme y muy oscura.
 - H10. Turba totalmente descompuesta: cuando se exprime toda la turba escapa entre los dedos con consistencia viscosa muy oscura.

Indicadores de humificación en suelos minerales

El método que se describe a continuación permite estimar la cantidad de sustancias húmicas extraíbles de suelos minerales a partir del color y, de manera general, la clase textural con base en la cantidad de arenas, limos y arcillas que se sedimentan. Entre más oscuro sea el color de la solución, puede inferirse más cantidad de sustancias húmicas en el suelo. El método se realiza en el campo utilizando muestras de horizontes superficiales o de horizonte O de mantillo forestal y la solución de Kononova (Figura 28). El procedimiento para realizar la solución de Kononova se explica a continuación:

Reactivos y materiales:

- a) Hidróxido de sodio 0.5 M. Disolver 20 g de hidróxido de sodio (NaOH) en agua, enfriar y aforar a un litro con agua destilada y almacenar en frasco de polietileno.
- b) Pirofosfato de sodio 0.1 M. Disolver 44.6 g de $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ en agua con agitación constante a 40 °C, enfriar y aforar a un litro con agua destilada y almacenar en un frasco de polietileno. Mezclar ambas soluciones en relación 1:1.
- c) Tablas de color Munsell, tubos de ensayo de 15 ml con tapón y gradilla.

Nota: Se recomienda mezclar sólo la cantidad que se utilizaría durante una semana, colocar en un recipiente de Nalgene.

Procedimiento:

- 1) En un tubo de ensayo de 10 o 15 ml colocar una parte de suelo y agregar nueve partes de solución Kononova para realizar el extracto del carbono orgánico extraíble en la solución Kononova en relación 1:10, tapar el tubo.
- 2) Agitar fuertemente durante un minuto o lo necesario para dispersar el suelo.

- 3) Reposar media hora o lo necesario para observar la separación de la fase líquida, identificar el color del extracto por comparación con las tablas Munsell.
- 4) Decantar el extracto en otro tubo de ensayo y agregar HCl 1:1 al extracto hasta pH 1.5, esto corresponde al inicio de la formación de un precipitado. Agitar y reposar media hora.
- 5) Comparar la proporción del precipitado y valorar el color por comparación con las tablas Munsell en el precipitado y en la solución.

Nota: el carbono orgánico extraíble en la solución proviene de las sustancias húmicas activas en el suelo, constituidas por entidades coloidales: ácidos húmicos de elevado peso molecular, aromáticas y ácidos fúlvicos coloides de menor peso molecular, flexibles. El precipitado obtenido en el medio ácido son las denominadas “macromoléculas de ácidos húmicos” (AH) y la solución son las “macromoléculas de ácidos fúlvicos” (AF).

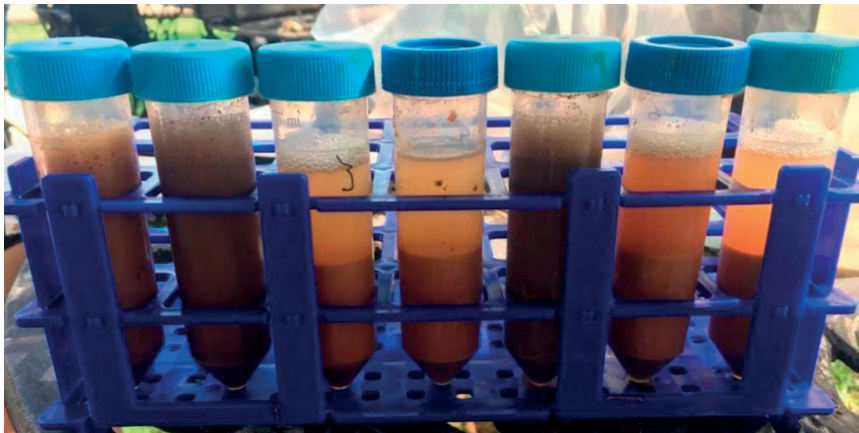


Figura 28. Uso de la solución de Kononova para la estimación de la cantidad de sustancias húmicas extraíbles del suelo.

Esta prueba permite comparar las proporciones de arena, limo, arcilla y materia orgánica humificada entre muestras de un mismo perfil, en ella se observa claramente cómo unas disminuyen y otras aumentan.

Otros rasgos pedológicos

Los rasgos pedológicos se refieren a las peculiaridades observables en las superficies de los agregados: grietas, nódulos, concreciones, poros y canales del suelo. Su registro en campo se realiza considerando su cantidad, tamaño, forma, tipo, localización y material. A continuación se describen los rasgos pedológicos que deben registrarse. Se recomienda tomar muestras de estos y otros rasgos pedológicos para analizarlos químicamente por separado de la matriz del suelo (Jiang et al., 2021).

Revestimientos, concreciones y condiciones de óxido-reducción

Los revestimientos describen los rasgos de iluviación de arcilla o de otra composición en el suelo y de concentraciones asociadas con superficies, como rasgos hidromórficos no redox, presentados como manchas en la matriz del suelo, los cuales son denominados “barnices hipodérmicos micromorfológicos”. La abundancia, naturaleza y localización de este rasgo puede describirse utilizando una lupa o el microscopio de mano (Cuadro 12).

Cuadro 12. Descripción de los revestimientos del suelo

Abundancia (%)			Naturaleza		Localización	
Ninguno	0	N	Arcilla	A	Caras de agregados	CA
Muy poco	0-2	MP	Sesquióxidos	S	Caras verticales	CV
Poco	2-5	P	Humus	H	Caras horizontales	CH
Común	5-15	C	Arcilla y sesquióxidos	AS	Fragmentos gruesos	FG
Mucho	15-40	M	Arcilla y humus	AH	Lamelas	L

Abundante	40-80	A	Carbonato de calcio	CC	Poros	P
Dominante	>80	D	Gibsita	G	Entre granos de arena	GA
			Barnices hipodérmicos	BH	Sin localización	SL
			Jarosita	J		
			Manganeso	M		
			Sílice	S		
			Revestimientos de arena	RA		
			Revestimientos de limo	RL		

Fuente: FAO, 2009.

Para registrar el contraste de los revestimientos debe considerarse el color de su superficie de la siguiente manera:

- 1) Si la superficie del barniz muestra poco contraste en color y uniformidad comparada con la superficie adyacente, los granos finos de arena son evidentes en el cután, y las lamelas tienen un espesor menor a 2 mm, el contraste es débil (F).
- 2) Si la superficie del revestimiento es más uniforme o diferente en color en relación con la superficie adyacente, los granos finos de arena son encubiertos por el revestimiento, pero sus contornos son visibles y las lamelas tienen un espesor de entre 2 y 5 mm, el contraste es distinto (D).
- 3) Si la superficie de los revestimientos contrasta fuertemente en uniformidad y color con las superficies adyacentes, los contornos de los granos de arena no son visibles y las lamelas tienen un espesor mayor de 5 mm, el contraste es prominente (P) (FAO, 2009).

La forma de los revestimientos puede ser: continua (C), continua irregular no uniforme heterogénea (CI), discontinua irregular (DI),

dendroide (DE), discontinua circular (DC) u otra (O) (FAO, 2009). Un ejemplo de descripción de revestimientos es: “Pocos revestimientos continuos con contraste distinto, probablemente de arcillas en caras verticales y horizontales de los agregados”.

Las concreciones son acumulaciones locales de compuestos químicos endurecidos que forman nódulos de diferentes tamaños, formas y colores. Su descripción incluye abundancia, tamaño, dureza, forma, color y naturaleza (Cuadro 13). Un ejemplo de descripción de concreciones es: “pocas concreciones blancas pequeñas y duras, probablemente formadas por calcita”.

Cuadro 13. Descripción de concreciones del suelo

Abundancia (%)		
Muy pocas	< 5	MP
Pocas	5-15	P
Frecuentes	15-40	F
Muy frecuentes	40-80	MF
Dominantes	> 80	D
Tamaño (mm)		
Pequeñas	< 1	P
Grandes	> 1	G
Dureza		
Pequeñas	Se quiebran con la uña	P
Grandes	No se quiebran	G
Color		
	Negras, rojas, blancas	
Naturaleza		
	Fe-Mn, calcita, gibsita, etc.	

Fuente: Siebe et al., 2006.

Las evidencias de óxido-reducción se identifican a partir de la presencia de motas (manchas de diferentes colores intercaladas con el color dominante de la matriz del suelo) que resultan de la alternancia entre condiciones de reducción (mojado) y oxidación (secado) en el suelo. El registro de la forma, abundancia, tamaño y límite de las motas puede realizarse utilizando el Cuadro 14.

El contraste de los moteados puede describirse de la siguiente manera: si los moteados son evidentes sólo con observación detallada y los colores en la matriz del suelo y moteados tienen una relación similar de matiz, croma y *value*, el contraste es “débil” (F); si los moteados son fácilmente distinguibles y hay una diferencia clara entre el matiz, croma y *value* de los moteados, con respecto a la matriz del suelo (el matiz varía por más de 2.5 unidades o varias unidades en croma y *value*), el contraste es “distinto” (D); si los moteados son claros y son uno de los rasgos más prominentes del horizonte, y el matiz, croma y *value* son varias unidades diferentes, el contraste de los moteados es “prominente” (P) (FAO, 2009).

Cuadro 14. Descripción de moteados para la identificación de condiciones de óxido-reducción

Forma		Abundancia (%)			Tamaño (mm)			Límite (mm)		
Moteado	M	Ninguno	0	N	Muy fino	< 2	MF	Agudo	> 0.5	A
Venas	V	Muy pocos	0-2	MP	Fino	2-6	F	Claro	0.5-2	C
Bandas	B	Pocos	2-5	P	Medio	6-20	M	Difuso	> 2	D
Nubes	N	Común	5-15	C	Gruoso	> 20	G			
		Muchos	15-40	M						
		Abundante	> 40	A						

Fuente: FAO, 2009.

El límite entre los moteados y la matriz del suelo se refiere al grosor de la zona dentro de la cual el color de transición puede localizarse sin estar sobre las motas ni tampoco en la matriz. El color de los moteados se registra utilizando la tabla Munsell (Munsell Color Company, 2000). Las condiciones reductoras en el suelo están expresadas por colores neutros o de azulados a verduzcos (matices Munsell 2.5Y, 5Y, 5G, 5B). El patrón de color puede cambiar debido a condiciones de aireación presentes en el suelo durante minutos o días.

Es posible identificar evidencias de óxido-reducción en campo con una prueba para identificar la presencia de iones Fe^{2+} . Esta prueba se realiza adicionando a la superficie recién expuesta del suelo unas

gotas de solución acuosa de ferrocianuro de potasio $K_3Fe(III)(CN)_6$ al 1%, con lo cual observaremos una reacción de color azul oscuro sólido; o adicionando unas gotas de solución de alfa dipiridilo al 0.2 % en ácido acético, con lo que se observará un color rojo intenso. Un ejemplo de descripción de moteados por condiciones de óxido-reducción es: “Pocas motas finas con color Munsell 2.5 y 8/3 (pardo pálido) y límite difuso”.

Aluminio activo

Se denomina “aluminio activo” a aquel que proviene de minerales secundarios de bajo orden estructural, como el alófono o la imogolita, y de óxidos e hidróxidos amorfos de aluminio; todos ellos son neoformaciones características de suelos desarrollados a partir de materiales volcánicos ricos en vidrio y otros minerales fácilmente intemperizables.

La presencia de aluminio activo en el suelo es indicadora de horizontes ándicos. Se puede evaluar cualitativamente en campo depositando un poco de material de suelo sobre una placa de porcelana y añadiéndole dos gotas de fenolftaleína al 1 % (se mueve un poco la disolución para disgregar el suelo) y posteriormente cuatro gotas de fluoruro de sodio NaF 1N, si la muestra se torna de color rosa mexicano o guinda indica una reacción positiva (Figura 29). También puede realizarse la prueba mediante la medición del pH de una suspensión de 1 g de suelo en 50 ml de fluoruro de sodio NaF 1N ajustado a pH 7.5 luego de dos minutos. Si el pH es mayor de 9.5, es una indicación positiva.

El fluoruro de sodio tiene gran afinidad al aluminio activo y reemplazará los grupos OH, de manera que si hay aluminio activo en cantidades importantes el pH aumenta a valores mayores de 8.2. La prueba de campo es de utilidad para la mayoría de los horizontes con propiedades ándicas, excepto para aquellos que son ricos en materia orgánica.

Se debe considerar que la reacción ocurre también en horizontes espódicos, en algunos suelos arcillosos ácidos que son ricos en minerales de aluminio intercalado y en suelos con carbonatos libres (ver capítulo 5). Antes de aplicar en la prueba de NaF, es importante observar el pH del suelo (la prueba no es apropiada para suelos alcalinos) y la presencia de carbonatos libres (usando la prueba de campo HCl) (FAO, 2009).

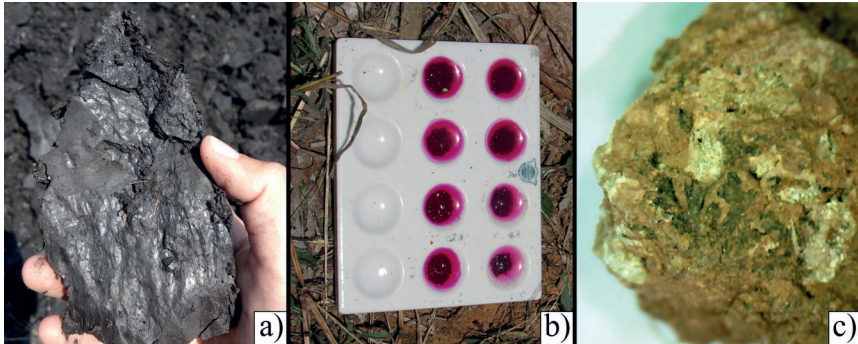


Figura 29. Ejemplos de rasgos pedológicos observables en el perfil de suelo: a) caras de deslizamiento o *slickensides*; b) presencia de aluminio activo; c) revestimientos de arcilla iluvial.

Afloramiento de sales

La presencia de sales en la superficie del suelo puede describirse considerando su cobertura, espesor, apariencia y tipo de sal. El Cuadro 15 muestra las claves para la descripción de la cobertura, espesor y forma del afloramiento de sales.

Un ejemplo de descripción de afloramiento de sales es: “Dominante presencia de sales en forma de costras con espesor grueso (1.5 cm)”.

Cuadro 15. Descripción del afloramiento de sales en el suelo

Cobertura (%)			Espesor (cm)			Forma	
Ninguna	0-2	0	Ninguno		N	Películas sobre agregados	PSA
Baja	2-15	1	Delgado	< 0.2	D	Pseudomicelios	PM
Moderada	15-40	2	Medio	0.2-0.5	M	Costras	CO
Alta	40-80	3	Grueso	0.5-2	G	Venas finas	VF
Dominante	> 80	4	Muy grueso	> 2	MG	Nódulos	NO
						Nidos	NI

Fuente: FAO, 2009.

Superficies de deslizamiento (slickensides)

Se refiere a las superficies brillosas y pulidas producidas por el alineamiento de las arcillas de la masa basal de los agregados durante el proceso de expansión y contracción del suelo al humedecerse y desecarse (Figura 30).

Las superficies de deslizamiento pueden registrarse considerando su abundancia, continuidad y distinción (Cuadro 16). En el caso de las superficies de deslizamiento, no se requiere especificar su localización, ya que por definición estas se localizan en las caras de los agregados. Un ejemplo de la descripción de superficies de deslizamiento es: “Claras y abundantes superficies de deslizamiento continuas en las caras de los agregados”.

Cuadro 16. Descripción de superficies de deslizamiento en el suelo

Abundancia (%)		
Muy pocas	< 5 %	MP
Pocas	5-25 %	P
Comunes	25-50 %	C
Muchas	50-90 %	M
Abundantes	100 %	A
Continuidad		
Continuas	Superficie completamente cubierta	C
Discontinuas	Superficie parcialmente cubierta	D
Irregulares	Superficie cubierta en una parte aislada	I
Distinción		
Débil	Visible sólo con aumento y poco contraste	D
Clara	Visible sin aumento con contraste significativo	C
Prominente	Notablemente visible con fuerte contraste visual	P

Fuente: Schoeneberger et al., 2012.

Cementación

La cementación se usa para describir el material compacto del suelo que tiene una consistencia endurecida incluso en estado de humedad. En este tipo de material, la cementación persiste al humedecimiento después de una hora de inmersión. La naturaleza y el grado de las cementaciones del suelo puede describirse de acuerdo con el Cuadro 17.

La estructura de la capa cementada es “laminar” (P) si posee este tipo de estructura con una orientación horizontal o subhorizontal; si la capa tiene poros grandes con dimensiones similares que pueden ser llenados con material no cementado, su tipo de estructura es “vesicular” (V); si la capa está formada mayormente a partir de nódulos cementados con forma de esfera, su estructura es “pisolítica”; o, si la capa está construida mayormente de nódulos cementados o concreciones de forma irregular, la estructura es “nodular” (D) (FAO, 2009).

Cuadro 17. Descripción de la cementación del suelo

Naturaleza (agente cementante)			
Carbonatos	C	Hierro-materia orgánica	HMO
Sílice	S	Yeso	Y
Carbonatos-sílice	CS	Arcilla	A
Hierro	H	Arcilla-sesquióxidos	AS
Hierro-manganeso (sesquióxidos)	HM	No conocida	NC
Grado			
No cementada y no compactada	NC	No se observa cementación	
Débilmente cementada	DC	La masa cementada es dura, pero puede ser rota con las manos	
Moderadamente cementada	MC	La masa cementada no puede ser rota con las manos y es discontinua	
Cementada	C	La masa cementada no puede ser rota con las manos y es continua	

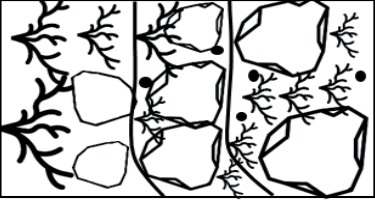
Endurecida	E	Más de 90 % de la masa cementada no puede ser destruida por el peso del cuerpo humano*
------------	---	--

*peso estándar de 75 kg.

Fuente: FAO, 2009.

La continuidad de la cementación de la capa del suelo puede clasificarse de la siguiente manera: si la capa está cementada en menos de 50 % y muestra una apariencia irregular, su clasificación es “quebrada” (B); si está cementada entre 50-90 % y muestra una apariencia regular, es “discontinua” (D); y, si está cementada en más de 90 % y es interrumpida en algunos lugares por grietas o fisuras, es “continua” (C). Un ejemplo de descripción de la cementación es: “Capa cementada continua de estructura laminar probablemente formada por la acumulación de sílice”.

En el Anexo 3 se incluye un formato con la información del sitio y del perfil de suelo que se reporta para el uso del software *Soil & Environment*. La Figura 30 muestra un ejemplo del llenado del formato.

1. DESCRIPCIÓN DEL SITIO				ID Suelo:	Fecha:	Observaciones:	
Sitio:				Cherán-002	25/Sept/2018		
Jarakten / Tanaco, Cherán, Michoacán				Latitud:	Longitud:		
Autor:				2184911.75	807927.56		
Ángeles Gallegos				Pendiente (°):	Posición:		
Uso de suelo:				40	BO	Motas de carbón vegetal	
Sin uso ni manejo				Material parental:	Afloramientos rocosos (%): 15		
Clima y estado del tiempo: SD ET3				Nivel de agua subterránea (m): Se desconoce	Prof. enraizamiento (cm): 142		
Evidencias de erosión: N				Evidencias de uso histórico: Sin evidencia	Contaminantes: Sin evidencia		

2. DESCRIPCIÓN DEL SUELO EN CAMPO

#	Profundidad (cm)	Límite del horizonte	Color			Vol. Frag. (%)	M.O (%)	C.O (%)	D.A (g cm ⁻³)	pH	C.E dS m ⁻¹	Raíces		Poros		
			Clas.	Topo.	Seco							Hum.	Col. S. F. T.	Cant. Eval.	Ab. Dist. Tam. For.	
1	0	D	10YR 4/3	10YR 2/2		40	4.5	2.6	1.2	0.7	5	0.084	M 21-50	M	M	In/ t.
2	40	D	10YR 6/6	10YR 3/6		70	1.8	1.0	1.4	0.8	4	0.027	M 21-50	M	M	In/ t.
3	79	D	10YR 6/6	10YR 2/1		50	3.4	1.9	1.2	0.9	4	0.119	M 21-50	A	A	In/ t.

Sup. = límite superior; Inf. = límite inferior; Clar. = claridad; Topo. = topografía; Col. S. = color secundario; F. = forma; C. = Contraste; Vol. Frag. = volumen de fragmentos; M.O = materia orgánica; C.O = carbono orgánico; D.A = densidad aparente; C.E = conductividad eléctrica; Cant. = cantidad; Eval. = evaluación; Ab. = abundancia; Dist. = distribución; Tam. = tamaño; For. = forma; % P -> S = porcentaje de estructura primaria y secundaria.

Figura 30. Ejemplo de llenado de formato de campo para la descripción de un perfil de suelo (página 1).

#	Estructura						Clase textural		Horizonte	
	Primaria	Secundaria	% P->S	Rompe en	Tamaño	Estabilidad	Grado			
1	Migajosa				CO	Muy alta	ST	CL	C	Ah
2	Migajosa				CO, ME	Alta	ST	CL	CL	Bw
3	Migajosa				CO	Alta	ST	CL	CL	C

Rasgos pedológicos																						
#	Revestimientos		Cementación		Concreciones			Aforamiento sales			Óxido reducción				Sup. Desliz.	Al activo						
	Cant.	Gr. Tipo Loc.			Ab.	Color	Tam.	Dur.	For.	Nat.	Tipo	Forma	Ub.	For.			Color	Ab.	Tam.	Límite	Reac.	
1																					P/F	
2																						P/F
3																						P/F

Cant = cantidad; Gr. = grosor; Loc. = localización; Ab. = abundancia; Tam. = tamaño; Dur. = dureza; For. = forma; Nat. = naturaleza; Ub. = ubicación; Reac. = reacción física de la muestra; Sup. Desliz. = superficies de deslizamiento; Al activo = aluminio activo.

Figura 30. Ejemplo de llenado de formato de campo para la descripción de un perfil de suelo (página 2).

Descripción de perfiles de suelo para estudios de taxonomía

4

Francisco Bautista
Ángeles Gallegos

Para los estudios de taxonomía de suelos es necesario medir y estimar las propiedades de los suelos como se recomienda en este capítulo. Además, será necesario tener en mente los criterios para la identificación de horizontes, propiedades y materiales de diagnóstico según la IUSS (2015). Primero hay que designar los nombres de los horizontes y para esto los podemos dividir en superficiales y subsuperficiales. En una primera aproximación se designan los horizontes maestros o mayores, es decir: A, B, C, R o D. Cabe mencionar que los horizontes superficiales y subsuperficiales que se describen a continuación pueden o no desarrollarse en el perfil de suelo.

A continuación se describe de forma general la nomenclatura para la designación de los horizontes del suelo, si se requiere mayor detalle se puede consultar la *Guía para la descripción de suelos* de la FAO (2009).

Horizontes superficiales

El horizonte H se localiza en los suelos orgánicos, es la capa dominada por material orgánico no descompuesto o parcialmente descompuesto. Todos los horizontes H están saturados con agua por largos periodos de tiempo o lo estuvieron alguna vez. Estos son horizontes típicos de turberas.

El horizonte O es la capa orgánica de los suelos minerales, es predominante el material orgánico formado a partir de desechos intactos o parcialmente descompuestos que se han acumulado sobre la superficie del suelo, como las hojas, ramas, musgos o líquenes. Estos horizontes presentan > 30 % de MO con > 50 % de arcilla, o > 20 % de MO si no hay arcilla. Además, el porcentaje de fibras identificables es de suma importancia O_a con < 17 % fibras identificables; O_e entre 17 y 40 %; y O_i con > 40 % fibras identificables.

El horizonte A se refiere a la capa de suelo mineral formada en la superficie del suelo o debajo de un horizonte O. Este horizonte puede presentar una acumulación de materia orgánica humificada mezclada con la fracción mineral y/o propiedades resultantes de la perturbación humana. El horizonte A es más oscuro que los subyacentes por el contenido de materia orgánica que lo compone. La materia orgánica procede de restos vegetales y animales que se han incorporado al suelo por la actividad biológica (no por translocación).

Horizontes subsuperficiales

El horizonte E (eluvial) es mineral y su característica principal es la pérdida de arcilla silicatada, hierro, aluminio, o su combinación. En esta capa se encuentra una concentración de arena y limo, la mayor parte de su estructura rocosa original ha sido desintegrada, y se localiza bajo un horizonte A u O con menor porcentaje de materia orgánica, color más claro o sobre un horizonte B (más oscuro, menor pureza, textura más fina).

El horizonte B es la capa del suelo formada debajo de un horizonte A, E, H u O, presenta características totalmente diferentes de la

roca original, los rasgos dominantes son: a) desintegración de toda o la mayoría de la estructura rocosa original; b) materiales de iluviación (arcillas, materia orgánica, sesquióxidos, etc.); c) evidencia de remoción de carbonatos, carbonatos secundarios, yeso; d) estructura en bloques, prismática, columnar o cuñas; e) formación de arcilla; f) liberación de óxidos; y g) acumulación de carbonatos, yeso o sales más solubles. Hay muchos tipos diferentes de horizontes B.

El horizonte C es mineral, con fragmentos gruesos, material no consolidado y no posee propiedades de los horizontes H, O, A, E o B. El sustrato base (la capa R) consiste en el lecho de roca dura que subyace en el suelo; la capa D se refiere a los sedimentos que están compuestos por materiales orgánicos e inorgánicos y que han sido depositados en cuerpos de agua; y la capa W se refiere a capas de agua que sumergen los suelos, ya sea de forma permanente o cíclica dentro de un periodo de tiempo de 24 horas.

A menudo es más fácil identificar los horizontes de transición AB y BA que los horizontes AC o CA, porque en los dos primeros se presentan rasgos que a simple vista permiten tomar la decisión de cual va primero, sin embargo, en el caso de AC o CA se dificulta la decisión debido a que la roca puede estar intemperizada, como sucede en los estados de Oaxaca, Chiapas y Guerrero, por lo que se recomienda lo siguiente: a) tomar un poco de material, secarlo y pasarlo por un tamiz malla 10 (2 mm de diámetro); b) tomar la decisión, si dominan los fragmentos gruesos (grava) es CA, si domina la tierra fina es AC.

Para discernir si un horizonte es C o R se toman las siguientes consideraciones: es horizonte C cuando dominan los fragmentos gruesos aislados; es horizonte R cuando es roca continua, aun cuando pueda fragmentarse por presión por estar intemperizada. Se recomienda tomar muestras de fragmentos gruesos o romper una piedra para registrar el tipo de roca, por ejemplo, caliza, granito, arenisca, lutita, basalto, etcétera.

A los horizontes genéticos maestros se les debe asignar una o más letras minúsculas, que se denominan distinciones subordinadas, de acuerdo con sus características que son el resultado de los pro-

cesos pedogenéticos (Cuadro 18). Se recomienda que estas letras minúsculas se les asignen a los horizontes maestros al final de la descripción del perfil o hasta que se tengan los análisis de laboratorio.

Cuadro 18. Distinciones subordinadas de los horizontes mayores

Sufijo	Descripción corta	Horizontes
a	Material orgánico altamente descompuesto	H y O
b	Horizonte genético enterrado	Minerales
c	Concreciones o nódulos	Minerales
c	Tierra coprogenea	L
d	Capa u horizonte denso	Minerales sin m
d	Tierra diatomea	L
e	Material orgánico moderadamente descompuesto	H y O
f	Suelo congelado	No en I y R
g	Condiciones estagnicas	Sin restricción
h	Acumulación de materia orgánica	Minerales
i	Superficies de deslizamiento	Minerales
i	Materia orgánica ligeramente descompuesta	H y O
j	Acumulación de jarosita	Sin restricción
k	Acumulación de carbonatos pedogenéticos	Sin restricción
l	Franja capilar de moteados (gleyización)	Sin restricción
m	Fuerte cimentación o endurecimiento	Minerales
m	Marga	L
n	Acumulación pedogenética de sodio intercambiable	Sin restricción
o	Acumulación residual de sesquióxidos	Sin restricción
p	Labranza u otra acción humana	Sin restricción
q	Acumulación de sílice pedogenética	Sin restricción
r	Fuerte reducción	Sin restricción
s	Acumulación iluvial de sesquióxidos	B
t	Acumulación iluvial de arcilla silicatada	B y C

u	Materiales urbanos y otros antrópicos	No en R, I, L y W
v	Ocurrencia de plintita	Sin restricción
w	Desarrollo de color o estructura	Horizonte B
x	Características fragipán	Sin restricción
y	Acumulación pedogenética de yeso	Sin restricción
z	Acumulación pedogenética de sales más solubles que el yeso	Sin restricción
@	Evidencia de crioturbación	Sin restricción

Fuente: FAO, 2009.

Taxonomía de los perfiles con WRB

La clasificación taxonómica de los perfiles con base en la IUSS (2015) se realiza a partir de los horizontes, propiedades y materiales de diagnóstico, siguiendo el orden de aparición de los grupos de suelos. Es conveniente abordar primero los horizontes superficiales y después los horizontes subsuperficiales de acuerdo con la intensidad de la participación de los factores formadores del suelo. A continuación, se presentan algunos casos en los que es importante considerar aspectos especiales a fin de realizar una adecuada clasificación.

En ambientes no percolantes, y por lo tanto de acumulación de sales, se recomienda considerar la acumulación de sales solubles (SC), yeso (GY), carbonatos de calcio y magnesio (CL) y acumulación y cementación de sílice (DU) a lo largo del perfil, ya que habrá sales en la parte baja por efecto de la precipitación o en el caso del ascenso capilar.

Se recomienda también registrar tipo y forma de los afloramientos o costras salinos, así como el grado de cementación (débil, fuerte o frágil) de los materiales de acumulación de yeso y carbonatos. Se debe tener cuidado de no confundir un horizonte cementado con un horizonte C y se recomienda tomar una muestra, así como observar las capas horizontales de acumulación del material cementante.

En los suelos que acumulan sodio (Solonetz SN), se recomienda registrar la estructura masiva del horizonte superficial o columnar de los

horizontes subsuperficiales. Con el contenido de sodio intercambiable analizado en el laboratorio se podrá fundamentar perfectamente la presencia de Solonetz. En ambientes semiáridos la formación de grietas y caras de deslizamiento suele aparecer en los suelos arcillosos del grupo Vertisol (VR), se recomienda registrar ancho y profundidad de las grietas, así como el tamaño y profundidad de las cuñas y de las caras de deslizamiento.

En suelos con acumulación de materia orgánica en el horizonte mineral superficial (epipedón), como es el caso de los Chernozems (CH), Kastanozems (KS), Phaeozems (PH) y Umbrisols (UM), se recomienda asegurarse de la presencia del horizonte mólico, considerando su espesor y color, así como la presencia de carbonatos secundarios y de la saturación de bases. Se recomienda tener cuidado con el color, ya que en los suelos con abundante cantidad de carbonatos, yeso y óxidos de hierro en ocasiones dominan el color espectral del suelo haciéndolo blanquecino o rojizo. También hay minerales (Mn y Fe) de color negro que pueden confundirse con materia orgánica.

En los suelos enriquecidos con arcillas en la parte subsuperficial, horizontes Bt, se recomienda registrar la precipitación pluvial. En ambientes de mayores precipitaciones pluviales podemos esperar translocaciones de la arcilla y la posibilidad de formación de horizontes Bt, como ocurre en los grupos Retisols (RT), Acrisols (AC), Lixisols (LX), Alisols (AL) y Luvisols (LV).

En estos suelos es de suma importancia documentar la presencia de la arcilla iluviada mediante fotografías de los revestimientos de arcilla. Esto se puede hacer con un microscopio digital de campo, rompiendo un agregado y haciendo un aumento de la imagen. El análisis de la textura también servirá de apoyo para fundamentar la presencia del horizonte de acumulación de arcilla. Con análisis de laboratorio sobre la CIC, la saturación de bases, además del aluminio intercambiable, se podrá dilucidar con precisión el grupo de suelo según la IUSS (2015).

Dentro del grupo de suelos con horizontes Bt, los menos intemperizados son los Alisols con una alta capacidad de intercambio

catiónico y mucho aluminio intercambiable, y los Nitisols, que son suelos profundos, en materiales parentales relativamente ricos y se distinguen por el brillo y elementos estructurales nuciformes.

Los más intemperizados son los Acrisols, que son suelos fuertemente lixiviados, de color rojo o fuertemente amarillo, sobre roca parental ácida, con horizonte de acumulación de arcilla, baja capacidad de intercambio catiónico, baja saturación de bases; los Lixisols que son suelos con baja capacidad de intercambio catiónico, pero alto porcentaje de saturación de bases; y los Ferralsols que son suelos que tienen una capacidad de intercambio catiónico muy baja y casi carentes de minerales primarios intemperizables.

Los suelos regulados por la química de Fe/Al los podemos dividir en dos subgrupos, los que presentan condiciones reductoras con drenaje deficiente o nulo y los suelos con condiciones de oxidación por estar bien drenados. Dentro de los primeros se encuentran los Gleysols (GL), Planosols (PL), Stagnosols (ST) y Podzols (PZ). En estos suelos se recomienda registrar los cambios en color, estructura y textura, como la forma, tamaño y cantidad de las motas por los óxidos de Fe y Mn.

En los suelos regulados por la química de Fe/Al y con condiciones de oxidación se encuentran los Andosols (AN), Plinthosols (PT), Nitisols (NT) y Ferralsols (FR). En estos suelos se recomienda registrar el color, la fijación de fósforo, la densidad aparente, la identificación del mineral (alófono, plintita, petroplintita o pisolitos) y la estructura.

Sobre rocas intemperizadas y antiguas se forman los Plinthosols que son suelos con una mezcla de arcilla y cuarzo (plintita) que se endurece al exponerse al aire (Cuadro 19). En estos suelos se recomienda registrar la inclinación de la pendiente, capacidad de drenaje, cambios de clima hacia condiciones más secas y la fluctuación de agua freática o de aguas subterráneas, ya que el endurecimiento de la plintita tiene lugar debido al secado y humedecimiento constante del suelo.

Los suelos con enraizamiento limitado son los Cryosols (CR) y Leptosols (LP). Los procesos criogénicos son dominantes en los Cryosols, estos suelos se forman con una amplia variedad de materiales, en áreas planas a montañosas de regiones antárticas, árticas, subárticas

y boreales por el permafrost, por lo que están afectados por el hielo. El horizonte crítico, que se encuentra en un estado permanentemente congelado, identifica a los Cryosols.

Los Leptosols son suelos muy delgados que se desarrollan sobre roca continua o que presentan muchos fragmentos gruesos (más del 80 %). Estos suelos se forman principalmente en regiones con mediana a alta altitud y con fuerte pendiente; se encuentran en todas las zonas climáticas y principalmente en áreas erosionadas, por lo que este grupo de suelos es el más extenso sobre la tierra (IUSS, 2015). El Cuadro 19 muestra diferentes tipos de rocas asociados a los suelos.

Los Histosols (HS) son suelos con capas orgánicas gruesas que se forman en material orgánico acumulado, pantanos, manglares o en áreas frías montañosas no saturadas de agua. Los restos de plantas parcialmente descompuestas son el material parental de estos suelos. Estos suelos cumplen una función importante en la regulación de flujo de arroyos y humedales.

Entre los suelos con poco desarrollo se encuentran los Cambisols (CM), Arenosols (AR), Fluvisols (FL) y Regosols (RG). Los Cambisols son suelos moderadamente desarrollados, con al menos 5 cm de horizonte naciente diferenciado en el subsuelo. Este horizonte (denominado cámbico), se identifica a partir de la formación de estructura, colores pardos, aumento en el porcentaje de arcilla o remoción de carbonatos. Estos suelos pueden ser encontrados desde terrenos llanos hasta montañosos en todos los climas y con múltiples tipos de vegetación (IUSS, 2015).

Los Arenosols son suelos arenosos profundos que pueden ser encontrados en dunas recientes, crestas de playa y llanuras de arena. En estos suelos se recomienda registrar la clase textural y el porcentaje en volumen de fragmentos gruesos. Los Fluvisols son suelos formados a partir de sedimentos estratificados fluviales, marinos o lacustres, pueden encontrarse en llanuras de ríos, abanicos fluviales, valles, depresiones lacustres y marismas.

Cuadro 19. Ejemplos de tipos de roca comúnmente asociadas a los suelos

Clase litológica	Suelos comunes (IUSS ¹)	Suelos comunes (<i>Soil Taxonomy</i> ²)
Extremadamente silíceo	Arenosols, Podzols	Spodosols; <i>Quartzipsammments</i>
Altamente silíceo	Arenosols	Entisols; <i>Psammments</i> ; Inceptisols
Medianamente silíceo	Durisols; Lixisols; Planosols; Solontz; Umbrisols	Alfisols y Aridosols de baja fertilidad; Inceptisols
Poco silíceo	Acrisols; Alisols; Cambisols; Retisols	Alfisols y Aridosols de intermedia fertilidad
Intermedio superior	Luvissols; Ferralsols	Alfisols y Aridosols de alta fertilidad; Oxisols; <i>Udults</i>
Intermedio inferior	Chernozems; Kastanozems	Mollisols; Udolls; Ustolls; Kandiuults; Mollic paleudalfs
Máfico	Nitisols; Phaeozems; Vertisols	Vertisols
Ultramáfico	Vertisols; Gleysols (metales pesados)	Vertisols (metales pesados)
Calcáreo	Calcisols	Aridosoles; Calcids; Argids; Calciargids
Orgánico	Histosols	Histosols; Gellisols; <i>Histels</i>
Sesquióxido	Ferralsols; Plinthosols	Oxisoles; <i>Plinthaquox</i>
Evaporita	Solonchaks	Salids; Aquisalids; Haplosalids

Fuente: Adaptado a partir de Gray y Murphy (1999) e Isbell et al., (1997) y actualizado con base en *Base for Soil Resources* (IUSS Working Group, 2015).

¹Gray et al., (2011) y ²Soil Survey Staff (2022).

Nota: La mayoría de los tipos de suelo se extenderán a clases de litología contiguas.

Los Regosols son suelos con poco o ningún desarrollo significativo del perfil, carecen de horizonte móllico o úmbrico, tienen pocos fragmentos gruesos, no poseen horizontes de diagnóstico y no son

delgados, arenosos, ni con materiales flúvicos. Estos suelos se forman a partir de materiales no consolidados, usualmente de grano fino, y son comunes en zonas áridas y regiones montañosas. En este tipo se incluyen también a los suelos que no cumplen con las particularidades de los otros grupos referenciales de la WRB.

La fuerte influencia humana es la característica principal de los Anthrosols (AT) y Technosols (TC). Los Anthrosols son suelos desarrollados a partir de un uso agrícola largo e intensivo, se forman prácticamente en cualquier material parental modificado por el cultivo o adición de material (como materia orgánica o mineral), carbón vegetal o residuos domésticos. La influencia humana en este tipo de suelos está usualmente restringida a los horizontes superficiales.

Los Technosols (TC) son suelos formados a partir de cantidades significativas de artefactos antrópicos, que se refieren a algo hecho o fuertemente alterado por el hombre, o que están sellados por material duro técnico o que contienen una geomembrana. Las propiedades y edafogénesis de estos suelos tienen un origen técnico, incluye a los suelos de desechos, carreteras, minas, derrames de petróleo, cenizas de carbón, pavimentos y construidos artificialmente. Son conocidos comúnmente como suelos urbanos o suelos de minas (IUSS, 2015).

Recomendaciones generales prácticas para la clasificación de los suelos:

1. Definir horizontes con base en color y dureza al enterrar el cuchillo, oler, oír, registrar las grietas, las caras de deslizamiento y los tipos de fragmentos gruesos (Figura 31). Sacar una buena fotografía del perfil. En zonas de rocas metamórficas es posible encontrar varios tipos de roca dando lugar a suelos diferentes (pero juntos) por intemperismo, a manera de diferentes horizontes, cuando en realidad son diferentes suelos. En zonas reforestadas o rehabilitadas después de un evento catastrófico, es posible encontrar suelos enterrados.

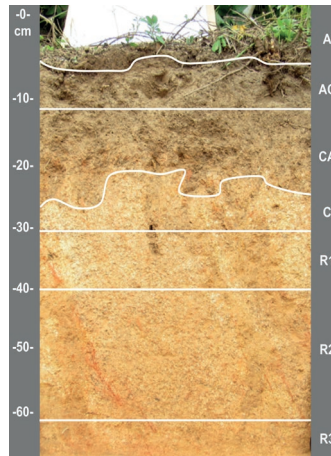


Figura 31. Ejemplo de designación de horizontes en Leptosols con rocas intemperizadas.

2. Observar el entorno en busca de más evidencias (rocas, estructura, horizonte C, horizonte R).
3. Análisis de campo por horizontes (estructura, pH, CE, MO, raíces, motas, concreciones, cutanes, etcétera).
4. Identificar procesos pedogenéticos (iluvación Bt, cambio de color Bw, condiciones de óxido-reducción por color, acumulaciones de materiales).
5. Designación de horizontes (Ah, Ap, Bt, Bg, Bi, Bk, Bw, etcétera).
6. Clasificación WRB con base en horizontes, propiedades y materiales de diagnóstico, siguiendo el orden de aparición de los grupos (primero horizontes superficiales y después los horizontes subsuperficiales).

Al nombrar un perfil de suelo, debe haber congruencia entre la secuencia de horizontes, el grupo de suelos y sus calificadores primarios y secundarios.

Estudios detallados en ambientes extremos y/o modificados y/o raros

5

Francisco Bautista

Estudios en perfiles de suelo en ambientes extremos/raros

Las fuentes de información suelen ser: la ciencia como *corpus*, la sabiduría o experiencia local y la realidad. Se transita de un pensamiento deductivo (ciencia) a un pensamiento inductivo (los datos y la realidad), con la sabiduría como paso intermedio. Así, cuando estamos ante un perfil de suelo tratamos de entenderlo con base en la ciencia (pensamiento deductivo), sus horizontes, los factores formadores, los procesos pedogenéticos y demás ciencias relacionadas con la pedología. Las cosas raras las “metemos con calzador” al *corpus* científico. Pero en este caso, cuando encontramos algún “perfil de suelo raro” sería mejor tratar de entenderlo a partir de su propia morfología, de manera inductiva, partiendo de los datos (Taleb, 2013).

Las condiciones ambientales extremas se presentan en gran parte del territorio mexicano: las sierras en el poniente, el oriente y el sur; en el eje Neovolcánico; en la península de Yucatán; en las zonas áridas (las dunas de yeso, por ejemplo); en las altas montañas; así como en sustratos tóxicos (como el ex-lago de Texcoco); en las cavernas (de las zonas kársticas y en los tubos volcánicos); en las zonas de rocas metamórficas de Oaxaca (donde es tan complejo hacer los mapas de suelo); aguas poco profundas escasamente exploradas, entre

otros. Varios suelos de dichas zonas no pueden explicarse satisfactoriamente dentro del marco de la pedología tradicional.

Algunos ejemplos de suelos en ambientes extremos son: a) cuando las calizas en forma de lámina se encuentran en posición vertical y se comienzan a intemperizar o meteorizar por los extremos dando lugar a “vertizontes” en lugar de horizontes; b) cuando las calizas laminares son de diferente composición mineral y dan lugar a suelos de diferentes colores; c) cuando las calizas son de diferente dureza, dando lugar a zonas que en la superficie tienen rocas y suelos en mosaicos; d) cuando las rocas metamórficas son “bandeadas” con minerales de diferentes colores, lo cual produce un mosaico de suelos; e) cuando los volcanes son muy activos y producen cenizas de diferentes colores por sus minerales (de manera frecuente), pero con erupciones pequeñas, lo que da lugar a suelos con una secuencia de horizontes AC-AC-AC no derivada de ambiente fluviales; f) cuando en zonas de karst se forman los petenes que son un conjunto de Leptosols y Cambisols con selva mediana rodeados de Gleysols y Solonchaks con halófilas; los micro perfiles de suelos de 2 a 5 cm en zonas de caliza de los cuales no hay un solo registro; g) los suelos dentro de las cavernas; h) los suelos sumergidos costeros o lagunares; i) los suelos en zonas costeras con resurgencias marinas donde hay varios grupos de suelo a distancias cortas, entre muchos otros (Goryachkin et al., 2019; Fragoso-Servón et al., 2020).

En México hay grandes territorios con condiciones de pedogénesis extrema que no han sido explorados con este enfoque, por lo que hay mucho por hacer en torno al registro de estos suelos, así como en el estudio de su morfología y su análisis químico, físico y biológico, para ello se requerirán nuevos enfoques y herramientas (Goryachkin et al., 2019).

Para estudios detallados de perfiles de suelos de ambientes extremos, modificados o raros se recomienda: a) la descripción del sitio, que incluye la posición en el relieve, cubierta vegetal, paisaje geomorfológico; b) la descripción del perfil en campo, que incluye propiedades como la pedregosidad, rocosidad, densidad aparente en campo, agre-

gados, rasgos pedológicos, etc. (Anexo 3); y c) mapas de los perfiles de suelos para representar la variabilidad de sus propiedades a detalle (Figura 32).

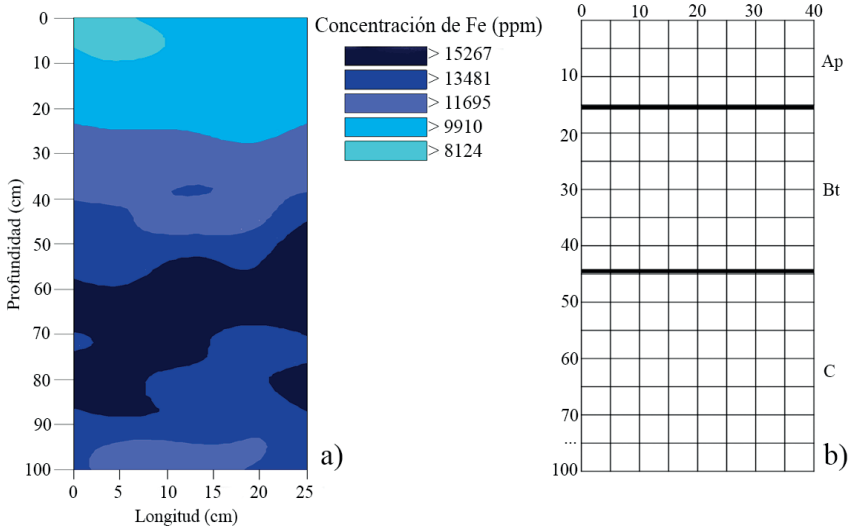


Figura 32. Ejemplo de un mapa de perfil de suelo para estudios detallados: a) mapa geoestadístico de la concentración de Fe en un perfil de suelo; b) ejemplo de malla para la toma de muestras en estudios detallados.

También es recomendable realizar análisis de las propiedades magnéticas, color en RGB o CIE L*a*b*, elementos totales (FRX), materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, Ca, Mg, Na y K, óxidos de Fe y Mn, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, entre otras cosas dependiendo de las particularidades del perfil del suelo. En la Figura 33 se muestran ejemplos de equipo para la medición de algunas de estas propiedades.

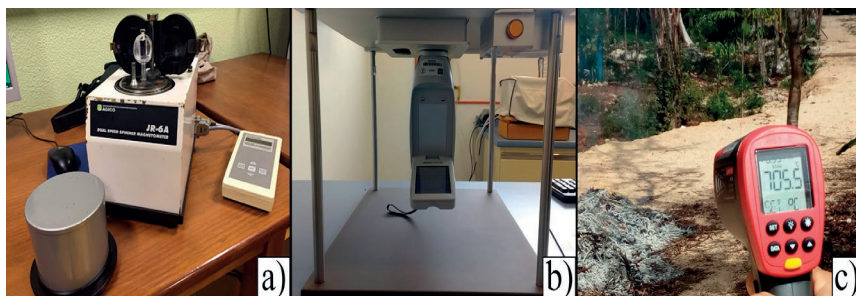


Figura 33. Equipo para análisis de propiedades de los suelos para estudios detallados en ambientes extremos: a) magnetómetro; b) pistola de FRX; c) pistola de IR.

Cuando nos encontramos ante un “perfil de suelo raro” recomendamos hacer un mapa de éste, el procedimiento se describe a continuación:

- 1) Tomar muestras de suelo (20 a 50 g) de los perfiles de manera sistemática en rejilla, cada 5 cm hasta lo más profundo y cada 5 cm a lo ancho hasta llegar a los 40 cm. Por ejemplo, horizontalmente cada 5 cm y hasta 40 cm. Verticalmente cada 5 cm hasta 100 o hasta 150 cm (Figura 33b). El objetivo es hacer los mapas del perfil con las propiedades magnéticas, color y FRX.
- 2) Tomar muestras por horizontes (2,000 g) con el procedimiento de muestreo tradicional.
- 3) Tomar muestras de suelo por horizontes separando la matriz (1,000 g) de las motas (500 g). La idea es mostrar la acumulación o concentración de minerales para explicar los procesos pedogenéticos.
- 4) Tomar muestras y prepararlas en láminas delgadas, denominadas “cajas de Kubiëna”, y explicar los procesos pedogenéticos.
- 5) Cuantificar por volumen la fracción gruesa (piedras y gravas), separar y pesar. Obtener cilindros para la medición de la densidad aparente.
- 6) Secar a la sombra las muestras de suelos, después, tamizar a malla 10 con abertura de 2 mm, pesar y guardar ambas fracciones.

Estudios de suelo en parcelas

Para suelos de alta heterogeneidad espacial como las zonas de karst de Yucatán, México, se recomienda un muestreo de tipo sistemático equidistante, en donde el tamaño de la parcela debe ser de acuerdo con el tamaño de los “mosaicos” de suelos que podrían ser de 5×5 m, 10×10 m, 25×25 m, entre otros, y que pueden ser identificados según el color, la pedregosidad o la rocosidad (Bautista, 2021). Se recomienda tomar muestra de 250 g de suelo en cada vértice (Figura 34).

Para hacer los mapas de suelo de las parcelas se recomienda utilizar las propiedades del suelo de bajo costo: color, pH, CE, susceptibilidad magnética, profundidad y elementos totales con el uso de equipo móvil de FRX, entre otros. El modelo digital de elevación será de gran ayuda en los casos de que el muestreo no sea en planicies. También puede usarse la altitud como covariable.

Cuando se hace uso de base de datos de suelo heredada, se recomienda revisar minuciosamente los datos. En caso de datos faltantes existen procedimientos para obtenerlos (López-Castañeda et al., 2022), pero eso ya disminuye la calidad de los productos cartográficos.

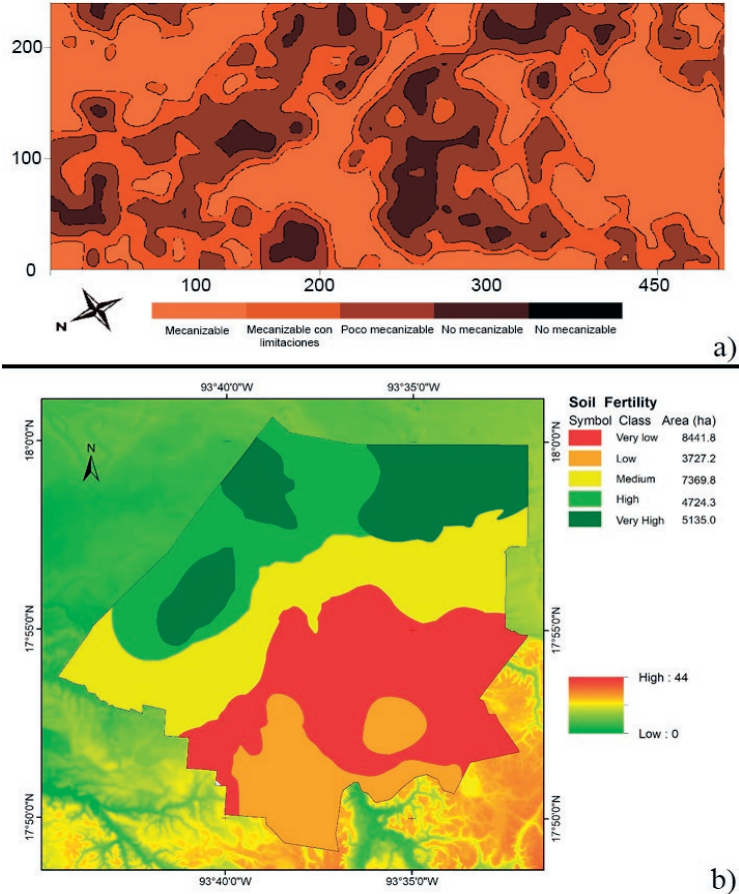


Figura 34. Ejemplo de estudios de suelo en parcelas: a) mapa parcelario geoestadístico con rejilla de 50×50 m (mapa de muy buena precisión); b) ejemplo de un mapa geoestadístico en una superficie de 29 389 ha (659 ha por perfil de suelo) con información de una base de datos de perfiles heredada más 46 perfiles nuevos (mapa de baja precisión, pero ilustrativo de la fertilidad) (López-Castañeda et al., 2022).

Bibliografía

Libros

- Bautista, F., Gallegos, A., y Pacheco, A. et al. (2016a), *Análisis de las funciones ambientales de los suelos con datos de perfiles (Soil & Environment)*. Skiu.
- Bautista, F., Pacheco, A., y Bautista-Hernández, D. A. (2016b). *Análisis del cambio climático con datos mensuales (Clic-MD)*. Skiu.
- Castellanos, J. Z. (2000). *Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas*. (2ª ed.). Intagri.
- CCE (Comisión de las Comunidades Europeas). (2006). Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco para la protección del suelo y se modifica la Directiva 2004/35/CE. CCE. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TX/T/?uri=celex%3A52006PC0232>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2009). *Guía para la descripción de suelos* (4ª ed.).FAO.
- Frank, E., et al. (2016). *The WEKA Workbench. Online Appendix for Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. (4ª ed). Morgan Kaufmann. Software disponible en: https://waikato.github.io/weka-wiki/downloading_weka/
- García de Miranda, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Geografía.
- Gray, J. M., y Murphy, B. W. (1999). *Parent Material and Soils - a Guide to the Influence of Parent Material on Soil Distribution in Eastern Australia*, Technical Report (No. 45). Department of Land and Water Conservation.
- Isbell, R. F., McDonald, W. S., y Aston, L. J. (1997). *Concepts and Rationale of the Australian Soil Classification*. Australian Collaborative Land Evaluation Program: CSIRO Land and Water

- IUSS (International Union of Soil Science). (2015). *World reference bases for soil resources 2014*, actualizado en 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Reports, FAO (106). FAO.
- Lehmann, A., David, S. y Stahr, K. (2008) *Technique for Soil Evaluation and Categorization for Natural and Anthropogenic Soils*. University of Hohenheim.
- Lugo-Hubp, J. (2011). *Diccionario geomorfológico*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Munsell Color Company. (2000). *Munsell Soil Color Charts*. Munsell Color Company.
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., Benham, E. C., y Soil Survey Staff. (2012). *Field book for describing and sampling soils* (Version 3.0). Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center.
- Semarnat (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Semarnat.
- Siebe, C., Janh, R., y Stahr, K. (2006). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo* (4ª ed.). Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.
- Soil Survey Staff. (2022). *Keys to Soil Taxonomy* (13th ed.). USDA Natural Resources Conservation Service.
- Taleb, N. N. (2013). *El cisne negro: el impacto de los altamente improbable*. Paidós.
- Viscarra-Rossel, R. A., McBratney, A. B., y Minasny, B. (2010). *Proximal soil sensing: Progress in soil science 1*. Springer Science and Business Media.

Publicaciones periódicas

- Aguilar, Y., y Bautista, F. (2011). Extrapolating the suitability of soils as natural reactors using an existing soil map: application of pedotransfer

- functions, spatial integration, and validation procedures. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. XIII, no. II, 221-232.
- Bautista, F. (2021). Geostatistical analysis of soil properties of the karstic sub-horizontal plain of the Yucatán Peninsula. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. XXIV, no. IX, 1-11.
- Bautista, F., Jiménez-Osornio, J., Navarro-Alberto, J., Manu, A., y Lozano, R. (2003). Microrrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. *Terra Latinoamericana*, vol. XXI, 1-11.
- Bouma, J. (2009). Soils are back on the global agenda: Now what? *Geoderma*, vol. CL, 224-225. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.015>
- Cortés, J. L., Bautista, F., Quintana, P., Aguilar, D., y Gogichaishvili, A. (2015). The color of urban dust as indicator of contamination by the potentially toxic elements: the case of Ensenada, Baja California México. *Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. XXI, no. 3, 255-266.
- Delgado, C., Bautista, F., Gogichaishvili, A., Cortés, J. L., Quintana, P., Aguilar, D., y Cejudo, R. (2019). Identificación de las zonas contaminadas con metales pesados en el polvo urbano de la Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental.*, vol. XXXV, no. 1, 81-100.
- Fragoso-Servón, P., Pereira-Corona, A., Bautista, F., Prezas-Hernández, B., y Reyes, N. A., (2020). Soils in extreme conditions: the case of the catenas karst-marsh-coastline in the Mexican Caribbean. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. LXXII, no. II.
- Gallegos, A., García-Oliva, F., Pereira-Corona, A., y Bautista, F. (2021). Digital soil morphometrics of coarse fragments and horizon delineation in soil profiles from Central Mexico. *Geoderma Regional*, e00403.
- García, R., Delgado, C., Cejudo, R., Aguilera, A., Gogichaishvili, A., y Bautista, F. (2020). The color of urban dust as an indicator of heavy metal pollution. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. XXVI (no. 1), 3-15.
- García-Ruiz, R., Sánchez-Hernández, R., Bautista, F., y Goguitchaichvili, A. (2022). Colorimetric method to estimate the soil organic matter in karst áreas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, vol. IX, no. I, e3189.
- Godinho, S. H., Hartemink, A. E., dos Santos, A. F., Vasconcellos, A., Guimarães, L., Guilherme, R., y Curi, N. (2018). Soil weathering anal-

- ysis using a portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometer in an Inceptisol from the Brazilian Cerrado. *Applied Clay Science*, vol. CLXII, 27-37.
- Goryachkin, S. V., Mergelov, N. S., y Targulian, V. O. (2019). Extreme Pedology: Elements of Theory and Methodological Approaches. *Eurasian Soil Science*, vol. LII, 1-13.
- Gray, J. M., Humphreys, G. S., y Deckers, J. A. (2011). Distribution patterns of World Reference Base soil groups relative to soil forming factors. *Geoderma*, vol. CLX, no. III-IV, 373-383.
- Jiang, Z.-D., Wang, Q.-B., Libohova, Z., Adhikari, K., Brye, K. R., Sun, Z.-X., Sun, F.-J., Jiang, Y.-Y., y Owens, P. R. (2021). Fe-Mn concentrations in upland loess soils in mid-continental north America: A step towards dynamic soil survey. *Catena*, vol. CCLII, 105273.
- Lázaro, G. del R., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., López-Noverola, U., y Sánchez-Hernández, R. (2021). Efecto de la quema agrícola en un Vertisol de Tabasco, México: fósforo, pH, y conductividad eléctrica. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. XXIV, no. XXVI, 2-10.
- López-Castañeda, A., Zavala-Cruz, J., Palma-López, D. J., Rincón-Ramírez, J. A., y Bautista, F. (2022). Digital Mapping of Soil Profile Properties for Precision Agriculture in Developing Countries. *Agronomy*, vol. XII, no. II, 353.
- McBratney, A., Field, D. J., y Koch, A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, vol. CCXIII, 203-213.
- Ortiz, O., Porta, J., y Arbelo, C. D. (2014). Criteria and recommendations for capturing and presenting soil profile images in order to create a database of soil images. *Spanish Journal of Soil Science*, vol. IV, no. I, 112-126. doi:10.3232/SJSS.2014.V4.N1.08
- Rodríguez, F. A., Bramley, R. G. V., y Gobbett, D. L. (2015). Proximal soil sensing for Precision Agriculture: Simultaneous use of electromagnetic induction and gamma radiometrics in contrasting soils. *Geoderma*, vols. CCXLIII-CCXLIV, 183-195.
- Sánchez-Duque, A., Bautista, F., Cejudo, R., Goguitchaichvili, A., y Cervantes-Solano, M. (2020). Los parámetros magnéticos como indicado-

- res de contaminación por elementos mayores y plomo en suelos urbanos del Valle de Aburrá, Colombia. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. XXXVII, no. III, 224-236.
- Viscarra-Rossel, R. A., Minasny, B., Roudier, P., y McBratney, A. B. (2006). Colour space models for soil science. *Geoderma*, vol. CXXXIII, 320-337.
- Vodyanitskii, Y. N., Savichev, A. T. (2017). The influence of the organic matter on soil color using the regression equations of optical parameters in the system CIE-L*a*b*. *Annals of Agrarian Science*, vol. XV (no. III) 380-385.
- Zhang, Y., y Hartemink, A. E. (2019). A method for automated soil horizon delineation using digital images. *Geoderma*, vol. CCCXLIII, 97-115.

Capítulos de libros

- Bautista, F., Cram Heydrich, S., y Sommer Cervantes, I. (2011). Suelos. En F. Bautista Zúñiga, J. L. Palacio Prieto, H. Delfín González, R. Paéz Bistrain y C. Delgado Carranza (eds.) *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (227-258). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Byers, H. G., Kellog, C. E., Anderson, M. S., y Thorp, J. (1938). Formation of soils. En *Soils and men* (948-978). Department of Agriculture.
- Cajuste, L., y Gutiérrez, M. C. (2011). El factor relieve en la distribución de los suelos en México. En P. Krasilnikov, F. J. Jiménez, T. Reyna y N. García (eds.). *Geografía de suelos de México* (73-84). Universidad Nacional Autónoma de México-Facultad de Ciencias.
- Más-Martínez, R., Fernández-Denis, I., Villegas, R., y Bautista, F. (2011). Monolitos de suelos. En F. Bautista (ed.), *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (227-258). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ortiz-Solorio, C. A., Sánchez, P., Gutiérrez, E. V., y Gutiérrez, M. C. (2011). El factor clima en la distribución de suelos en México. En P. Krasilnikov,

F. J. Jiménez, T. Reyna y N. García (eds.). *Geografía de suelos de México* (57-71). Universidad Nacional Autónoma de México-Facultad de Ciencias.

Documentos digitales

- Conagua (Comisión Nacional del Agua). (2020). *Información Estadística Climatológica*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- INTEF (Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado). (2022). *Banco de imágenes y sonidos –Accidentes geográficos*. <https://procomun.intef.es/>
- Loomatix, (2008). *Color Grab*, recuperado el 25 de marzo de 2020 de <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.loomatix.color-grab&hl=es&gl=US&pli=1>

Anexos

Anexo 1. Material para el trabajo de campo

Kits de muestreo

- 1 cinta métrica de costura
- 1 cinta métrica pedológica
- 2 espátulas rígidas
- 1 regla 30 cm
- 1 cuchillo de campo
- 8 frascos de plástico transparente con tapa de 100 ml
- 2 lupas
- 1 cuenco de porcelana
- 1 placa de porcelana
- 8 cuencos de plástico
- Cuerda o cordón (1 m)
- 2 marcadores permanentes
- 1 marcador para pintarrón
- Chinchas o banderillas
- 2 brochas de 3 pulgadas
- 1 tijeras para podar de una mano

Materiales

- 1 pintarrón de 30 x 40 cm
- Bolsas de plástico grueso transparente de 2 kg
- Bolsas de plástico grueso con asa de 5 kg
- Silla de campo
- Sombrilla de campo
- Toallas de papel
- Toallas húmedas
- 1 piseta con agua destilada
- 1 piseta con agua corriente
- 8 a 10 cilindros para densidad aparente

- 1 trozo de madera
- 8 a 10 tubos de centrífuga
- Gradilla
- Imanes

Equipo

- Cámara fotográfica
- GPS
- Penetrómetro de bolsillo
- Tester para pH en suelo GroLine Hanna HI981030
- Tester para medición directa de CE en suelo Hanna HI98331
- Microscopio digital inalámbrico Visio-tek

Herramientas

- 1 pala plana
- 1 pala curva
- 1 pala de mano
- 1 barra
- 1 barrena
- 1 pico
- 1 martillo geológico

Reactivos

- Soluciones buffer pH 7 y pH 4
- Ferrocianuro de potasio 1 %
- Fenolftaleína indicadora 1 %
- Alfa dipiridilo 0.2 %
- Fluoruro de sodio
- Ácido clorhídrico
- Hidróxido de sodio 0.5 M
- Pirofosfato de sodio 0.1 M
- Agua oxigenada

Anexo 2. Función de pedotransferencia para la estimación de la materia orgánica de suelos de zonas volcánicas

El primer paso es recopilar datos de perfiles de suelos, si se utilizan datos de varias fuentes de información deben estandarizarse para utilizar nombres, unidades, claves o similares. Una vez que los datos han sido recopilados y estandarizados se debe realizar un análisis exploratorio que incluya la estadística descriptiva, histogramas y gráficas de dispersión. Estos análisis permitirán seleccionar las mejores propiedades de los suelos (variables predictoras) para el entrenamiento del modelo de estimación.

Para obtener la estadística descriptiva y los coeficientes de correlación con el software WEKA deben cargarse los datos en formato de valores separados por comas (.csv). Para generar el archivo .csv pueden recopilarse los datos en Excel y al momento de guardar el documento se selecciona la opción “CSV UTF-8”.

Desde el software WEKA puede convertirse el archivo .csv a .arff (Attribute-Relation File Format, por sus siglas en inglés). Este tipo de archivo también es aceptado por WEKA. Para convertir el formato del archivo, desde la ventana inicial de WEKA: 1) oprimir el botón “Explorer»; 2) oprimir el botón “Open file”; 3) cargar el archivo .csv; y 4) oprimir el botón “Save”, seleccionar la ruta de destino y guardar el archivo .arff.

Una vez cargados los datos en WEKA se podrán visualizar a la izquierda de la interfaz principal las variables predictoras del modelo. Para eliminar alguna de las variables se selecciona la casilla de verificación y se oprime el botón “Remove”. A la derecha de la interfaz, en la parte superior, se encontrará la estadística descriptiva (mínimo, máximo, promedio y desviación estándar) por variable; y en la parte inferior los histogramas (Figura 35). Para visualizar todos los histogramas en una sola ventana oprimir el botón “Visualize”.

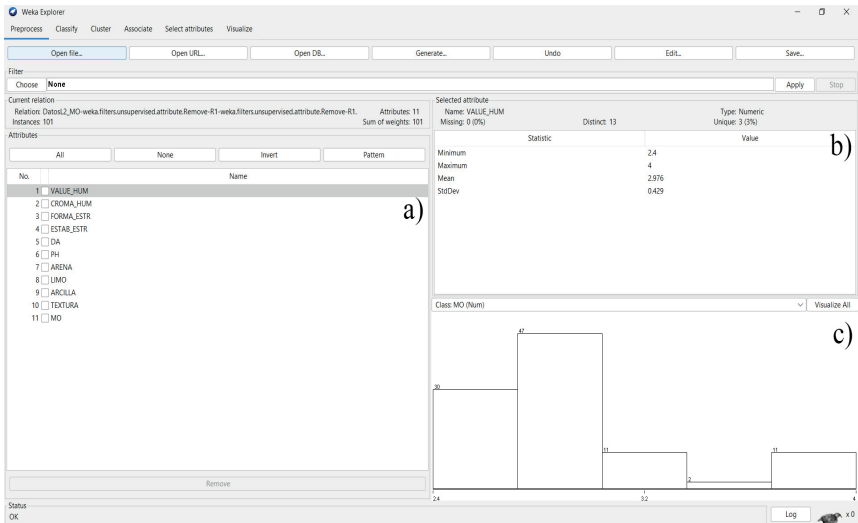


Figura 35. Interfaz principal de WEKA (pestaña “Preprocess”); a) lista de variables predictoras para el entrenamiento del modelo de estimación, b) estadística descriptiva de las variables, c) histogramas.

Además de la estadística descriptiva, se muestra información sobre el tipo de datos (Type), el porcentaje de los datos faltantes (Missing), número de valores distintos (Distinct), entre otros. Esta información es relevante ya que permite la selección de un tratamiento adecuado para lidiar con datos incompletos. Por ejemplo: a) si el porcentaje de datos faltantes es bajo, se podría optar por eliminarlos; b) si se trata de datos de tipo nominal, podrían reemplazarse por el dato más frecuente; o c) si se trata de datos numéricos, podría utilizarse la mediana o el promedio. Otras opciones para el tratamiento de datos faltantes son el uso de una constante o un análisis de vecinos cercanos.

Para realizar la selección de las mejores variables predictoras del modelo pueden consultarse las gráficas de dispersión desde la pestaña “Visualize” (Figura 36). Las gráficas de dispersión permiten identificar si existe una relación entre la variable a predecir y las variables predictoras. Puede ajustarse el tamaño de las gráficas desde los controles deslizantes “PlotSize” y “PointSize” o con doble clic para visualizar la gráfica en otra ventana.



Figura 36. Gráficas de dispersión para la identificación de relaciones entre las variables de entrenamiento del modelo de estimación.

Otra opción es utilizar la pestaña “Select attributes” para evaluar la correlación de las variables, en ese caso: 1) oprimir el botón “Choose”; 2) seleccionar el algoritmo “CorrelationAttributeEval”; 3) oprimir el botón “Start”; y 4) revisar en los resultados el filtro de clasificación de correlación para seleccionar las mejores variables predictoras (entre más cercano a 1 o -1 sea el resultado, habrá mayor correlación). También puede utilizarse el conocimiento experto para la selección de estas variables.

Una vez seleccionadas las variables predictoras, se deben eliminar aquellas que no serán utilizadas para el modelo de estimación. Al final de la lista que se muestra en la interfaz principal (pestaña “Preprocess”), debe ubicarse la variable a predecir, que en este caso sería la materia orgánica.

Para generar el modelo de estimación: 1) seleccionar la pestaña “Classify”; 2) en el botón “Choose” seleccionar el algoritmo M5P que se

ubica en la carpeta “Trees”; 3) elegir una opción de entrenamiento (la más utilizada y seleccionada por defecto es “Cross-validation” con 10 pliegues); y 4) oprimir el botón “Start” y revisar el panel de resultados.

En el panel de resultados se mostrarán las variables utilizadas, el modelo de estimación (función de pedotransferencia) y los resultados de la validación cruzada. Entre más cercano a 1 sea el coeficiente de correlación, mejor será la precisión del modelo. Para visualizar el árbol de decisiones: 1) dar clic con el botón secundario en la sección “Result list”; y 2) seleccionar la opción “Visualize tree”. Finalmente, para guardar el modelo dar clic con el botón secundario en la sección “Result list” y seleccionar la opción “Save model”.

Para aplicar el modelo de estimación en una nueva base de datos se debe generar un archivo .arff (con el procedimiento que se explicó anteriormente), teniendo especial cuidado en que la propiedad por estimar se ubique en la columna final con valores asignados, y que los nombres y tipos de datos de las nuevas variables predictoras sean los mismos que se utilizaron para el entrenamiento del modelo.

Una vez generado el archivo .arff de la base de datos en la que se aplicará el modelo: 1) seleccionar la pestaña “Classify”; 2) en el panel “Test options” activar la casilla “Supplied test set” y desde el botón “Set” cargar el archivo; 3) dar clic con el botón secundario en el panel “Result list” y seleccionar la opción “Re-evaluate model on current test set”; 4) dar clic con el botón secundario en el panel “Result list” y seleccionar la opción “Visualize classifier errors”; 5) guardar el resultado como archivo .arff y cargarlo nuevamente en la pestaña “Preprocess”; y 6) guardar el archivo como .csv para poder visualizar los resultados en Excel.

Cabe mencionar que, aunque el coeficiente de correlación sea bueno, la congruencia de los modelos de estimación siempre debe comprobarse con base en conocimiento teórico experto. Un ejemplo de función de pedotransferencia generada para la estimación de la materia orgánica de suelos de zonas volcánicas se muestra a continuación:

Scheme: weka.classifiers.trees.M5P -M 4.0 -num-decimal-places 4

Instances: 101
Attributes: 11
VALUE_HUM
CROMA_HUM
FORMA_ESTR
ESTAB_ESTR
DA
PH
ARENA
LIMO
ARCILLA
TEXTURA
MO
Test mode: 10-fold cross-validation

=== Classifier model (full training set) ===
M5 pruned model tree: (using smoothed linear models)

CROMA_HUM <= 2.05: LM1 (24/70.474%)

CROMA_HUM > 2.05:

| ARCILLA <= 30.57: LM2 (37/43.256%)

| ARCILLA > 30.57: LM3 (40/23.747%)

LM num: 1

MO =

-3.627 * CROMA_HUM

+ 0.6132 * FORMA_ESTR=MI, AB, GR

+ 0.2583 * ESTAB_ESTR=B, A, MO

- 4.6427 * DA

- 0.5457 * PH

+ 0.0163 * LIMO

+ 18.8449

LM num: 2

MO =

-0.8708 * VALUE_HUM
 - 0.3207 * CROMA_HUM
 + 0.3591 * FORMA_ESTR=MI, AB, GR
 - 0.7577 * ESTAB_ESTR=ME, B, A, MO
 + 1.5168 * ESTAB_ESTR=B, A, MO
 - 2.7346 * DA
 - 1.3461 * PH
 + 0.018 * ARENA
 + 0.0307 * LIMO
 + 0.0131 * ARCILLA
 + 15.1716

LM num: 3

MO =

-0.2079 * VALUE_HUM
 - 0.6315 * CROMA_HUM
 + 0.3537 * FORMA_ESTR=MI, AB, GR
 + 0.2836 * ESTAB_ESTR=B, A, MO
 - 2.2033 * DA
 - 1.0986 * PH
 + 0.0171 * ARENA
 + 0.0406 * LIMO
 + 0.0124 * ARCILLA
 + 11.0598

Number of Rules: 3

Time taken to build model: 0.01 seconds

=== Cross-validation ===

=== Summary ===

Correlation coefficient 0.7852

Mean absolute error 1.0368

Root mean squared error	1.4258
Relative absolute error	57.738 %
Root relative squared error	60.906 %
Total Number of Instances	101

Para obtener más información acerca del funcionamiento de los algoritmos de aprendizaje automático del software WEKA puede consultarse la documentación (Frank et al., 2016). Hay tutoriales disponibles en la página web del Proyecto de Aprendizaje Automático de la Universidad de Waikato: <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/index.html>

Anexo 3. Formato de captura de información de campo

1. DESCRIPCIÓN DEL SITIO										Observaciones:							
Sitio:			ID Suelo:			Fecha:											
Autor:			Pendiente (°):		Latitud:		Longitud:										
Uso de suelo:			Geoforma:		Pendiente (%):		Posición:										
Clima y estado del tiempo:			Cubierta vegetal:		Material parental:		Afloramientos rocosos (%):										
Evidencias de erosión:			Precipitación (mm):		Nivel de agua subterránea (m):		Prof. enraizamiento (cm):										
			Evidencias de uso histórico:		Naturalidad del suelo:		Contaminantes:										
2. DESCRIPCIÓN DEL SUELO EN CAMPO																	
#	Profundidad (cm)		Límite del horizonte		Color		Vol. Frag. (%)	M.O (%)	C.O (%)	D.A (g cm ⁻³) Cuch. Cílin	pH	C.E dS m ⁻¹	Raíces		Poros		
	Sup.	Inf.	Clar.	Topo.	Seco	Hum.							Col. S.	F. T.	Cant.	Eval.	Ab.

Sup. = límite superior; Inf. = límite inferior; Clar. = claridad; Topo. = topografía; Col. S. = color secundario; F. = forma; C. = Contraste; Vol. Frag. = volumen de fragmentos; M.O = materia orgánica; C.O = carbono orgánico; D.A = densidad aparente; C.E = conductividad eléctrica; Cant. = cantidad; Eval. = evaluación; Ab. = abundancia; Dist. = distribución; Tam. = tamaño; For. = forma; % P -> S = porcentaje de estructura primaria y secundaria.

#	Estructura						Clase textural	Horizonte
	Primaria	Secundaria	% P->S	Rompe en	Tamaño	Estabilidad		

Rasgos pedológicos																		
#	Revestimientos		Cementación		Concreciones			Afloramiento sales		Óxido reducción		Sup. Desliz.	Al activo					
	Cant.	Gr.	Tipo	Loc.	Ab.	Color	Tam.	Dur.	For.	Nat.	Ub.			For.	Color	Ab.	Tam.	Límite

Cant. = cantidad; Gr. = grosor; Loc. = localización; Ab. = abundancia; Tam. = tamaño; Dur. = dureza; For. = forma; Nat. = naturaleza; Ub. = ubicación; Reac. = reacción física de la muestra; Sup. Desliz. = superficies de deslizamiento; Al activo = aluminio activo.

Anexo 4. Composición química de los tipos de roca

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃
Extremadamente síliceo	Arena de dunas (s)	97.62	-	1.32
Altamente síliceo	Arenisca de cuarzo (s)	82.05	0.35	9.20
Medianamente síliceo	Arenisca feldespática (s)	77.1	0.3	8.7
Medianamente síliceo	Granito (p)	71.30	0.31	14.32
Medianamente síliceo	Riolita (v)	72.82	0.28	13.27
Poco síliceo	Grauvaca (s)	66.75	0.63	13.64
Poco síliceo	Granodiorita (p)	66.09	0.54	15.73
Poco síliceo	Dacita (v)	65.01	0.58	15.91
Intermedio superior	Lutitas (s)	64.80	0.78	16.90
Intermedio inferior	Diorita (p)	57.48	0.95	16.67
Intermedio inferior	Andesita (v)	57.94	0.87	17.02
Máfico	Basalto (v)	49.2	1.84	15.74
Ultramáfico	Peridotita (p)	42.26	0.63	4.23
Calcáreo	Caliza (s)	5.19	0.06	0.81
Sesquióxido	Laterita	13.74	4.33	31.14
Sesquióxido	Bauxita	10.18	4.50	40.45

Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	CO ₂	P ₂ O ₅
0.4	-	-	0.13	0.28	-	-	0.52	-	-
0.50	1.92	0.05	0.39	0.22	0.16	1.50	2.48	1.31	-
1.5	0.7	0.2	0.5	2.7	1.5	2.8	0.9	3.0	0.1
1.21	1.64	0.05	0.71	1.84	3.68	4.07	0.77	0.05	0.12
1.48	1.11	0.06	0.39	1.14	3.55	4.30	1.41	0.08	0.07
1.60	3.84	0.12	2.15	2.54	2.90	1.00	2.95	1.24	0.10
1.38	2.73	0.08	1.74	3.83	3.75	2.73	1.04	0.08	0.18
2.43	2.30	0.09	1.78	4.32	3.79	2.17	1.19	0.06	0.15
-	5.70	0.06	2.85	3.56	1.15	3.99	-	-	0.11

2.50	4.92	0.12	3.71	6.58	3.54	1.76	1.36	0.10	0.29
3.27	4.04	0.14	3.33	6.79	3.48	1.62	1.17	0.05	0.21
3.79	7.13	0.2	6.73	9.47	2.91	1.1	1.38	0.11	0.35
3.61	6.58	0.41	31.24	5.05	0.49	0.34	4.22	0.3	0.1
0.54	-	-	7.89	42.57	0.05	0.33	0.77	41.54	0.04
35.54	-	-	tr.	0.16	-	-	15.40	-	tr.
23.80	3.33	-	-	-	-	-	17.5	-	-

Fuente. p = ígneas intrusivas; v = volcánicas ígneas de grano fino; s = sedimentarias;
tr. = rastro

Índice alfabético

A

Acrisols 41, 74, 75, 77
Afloramientos rocosos 9, 16, 17, 18, 19, 41, 73
Albufera 13
Alisols 74, 77
Aluminio activo 62, 63
Andosols 41, 75
Anthrosols 78
Archipiélago 12
Arenosols 41, 43, 76, 77

B

Bahía 13

C

Cabo o Punta 12
Cambisols 41, 76, 77, 81
Cementación 65, 66, 73
Chernozems 74, 77
Clima 22, 23, 75
Color 6, 7, 28, 29, 30, 36, 37, 38, 45, 53, 54, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 73, 74, 75, 76, 78, 79, 82, 83, 84
Concreciones 8, 28, 29, 58, 60, 65, 72, 79
Condiciones ambientales extremas 7, 80
Conductividad eléctrica 52, 53
Cordillera o sierra 12
Cryosols 75, 76
Cuenca hidrográfica 12

D

Delta 13
Densidad aparente 40, 41, 75, 81, 83, 92
Depresión 12

E

Erosión del suelo 21, 43
Estructura 29, 32, 41, 42, 43, 55, 65, 66, 70, 71, 73, 75, 76, 78, 79
Estuario 13

F

Factor biológico 15
Ferralsols 75, 77
Fluvisols 76
Formas del terreno 10, 11, 12
Fosa tectónica 12
Fragmentos gruesos 9, 30, 38, 39, 40, 58, 71, 76, 77, 78

G

Gleysols 75, 77
Golfo 13

H

Histosol 8, 76, 77
Horizonte A 70
Horizonte B 70, 73
Horizonte C 71, 73, 78
Horizonte E 70
Horizonte H 70
Horizonte O 54, 56, 70

I

Isla 12
Istmo 12

K

Kastanozems 74, 77

L

Leptosols 16, 28, 75, 76, 79, 81

Lixisols 74, 75, 77

Luvisol 41, 74, 77

M

Macizo 12

Materia orgánica 6, 15, 36, 43, 45, 49, 50, 53, 54, 57, 62, 65, 70, 71, 72, 74, 78, 82, 94, 96, 97

Material parental 15, 16, 17, 22, 36, 76, 78

Meseta 12

Montaña 12

N

Naturalidad del suelo 34

Nitisol 74, 75, 77

O

Óxido-reducción 36, 58, 60, 61, 62, 79

P

Península 7, 12, 80

pH 25, 50, 51, 53, 57, 62, 79, 84, 93

Phaeozems 74, 77

Planicie 12

Planosols 75, 77

Plinthosols 75, 77

Podzols 75, 77

Profundidad del suelo 28, 31

R

Rasgos pedológicos 8, 58, 63, 82

Regosols 76, 77

Retisol 74, 77

Revestimientos 44, 50, 58, 59, 60, 63, 74

Ría 13

S

Sales 21, 52, 53, 63, 71, 73

Solonetz 43, 73, 74

Solución de Kononova 56, 57

Stagnosols 75

Superficies de deslizamiento 64, 72

Sustancias húmicas 54, 56, 57

T

Technosols 78

Textura 28, 45, 46, 47, 49, 53, 70, 74, 75, 98

U

Umbrisols 74, 77

V

Valle 12, 13

Vertisol 41, 44, 77

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Breve descripción de las principales formas del terreno	12
Cuadro 2. Tipos de vegetación	15
Cuadro 3. Cobertura, tamaño y espaciamiento de los afloramientos rocosos	16
Cuadro 4. Evidencias de erosión del suelo.....	21
Cuadro 5. Descriptores para el estado del tiempo en el sitio de muestreo	23
Cuadro 6. Claridad de la transición y forma del límite entre los horizontes	31
Cuadro 7. Identificación de contaminantes en el sitio	34
Cuadro 8. Clasificación de los fragmentos rocosos	39
Cuadro 9. Tipo, clase y tamaño de los agregados en perfiles de suelos	43
Cuadro 10. Claves para estimar las clases texturales del suelo en campo	47
Cuadro 11. Clasificación del contenido de sales en el suelo a través de la conductividad eléctrica	53
Cuadro 12. Descripción de los revestimientos del suelo	58
Cuadro 13. Descripción de concreciones del suelo	60
Cuadro 14. Descripción de moteados para la identificación de condiciones de óxido-reducción	61
Cuadro 15. Descripción del afloramiento de sales en el suelo	63
Cuadro 16. Descripción de superficies de deslizamiento en el suelo	64
Cuadro 17. Descripción de la cementación del suelo	65
Cuadro 18. Distinciones subordinadas de los horizontes mayores	72
Cuadro 19. Ejemplos de tipos de roca comúnmente asociadas a los suelos	77

Índice de figuras

Figura 1. Ejemplos de las principales formas del terreno	11
Figura 2. Posición de la pendiente	13
Figura 3. Diferentes tipos de material parental	17
Figura 4. Afloramientos rocosos	18
Figura 5. Cobertura en porcentaje de afloramientos rocosos	19
Figura 6. Los vehículos aéreos no tripulados, drones, son una herramienta muy útil	20
Figura 7. Ejemplos de gráficas de la longitud del periodo de crecimiento para una zona	24
Figura 8. Equipo para muestreo de suelos	26
Figura 9. Calicata para la descripción de un perfil de suelo	27
Figura 10. Perfiles de suelos con horizontes contrastantes	29
Figura 11. Ejemplo de procesamiento de la imagen digital de un perfil de suelo	30
Figura 12. Ejemplos de evidencias de uso antiguo de los suelos	33
Figura 13. Ejemplo de fuentes de contaminación del suelo	33
Figura 14. Ejemplo de la pérdida de la naturalidad del perfil de suelo	35
Figura 15. Diferentes colores de muestras de suelo y de contenido de materia orgánica	36
Figura 16. Ejemplo de suelos superficiales de la Ciudad de México	37
Figura 17. Medición del color en muestras sólidas de suelo	38
Figura 18. Perfiles de suelo con diferentes porcentajes de fragmentos gruesos	40
Figura 19. Dos métodos para estimar la densidad aparente del suelo en campo	41
Figura 20. Ejemplos de diferentes tipos de estructura en los suelos	42
Figura 21. Estimación de la estabilidad de los agregados del suelo	45

Figura 22. Ejemplos de muestras de suelos ubicadas en el triángulo de texturas	46
Figura 23. Ejemplos de algunas pruebas utilizadas para la estimación de textura del suelo en campo	49
Figura 24. Estimación de la textura del suelo con el método de extracción de la materia orgánica	49
Figura 25. Potenciómetros portátiles para la medición de pH en campo	50
Figura 26. Interpretación de los valores de pH en el suelo con relación a la disponibilidad de nutrimentos	51
Figura 27. Ejemplos de uso del conductímetro de campo.....	52
Figura 28. Uso de la solución de Kononova para la estimación de la cantidad de sustancias húmicas extraíbles del suelo	57
Figura 29. Ejemplos de rasgos pedológicos observables en el perfil de suelo	63
Figura 30. Ejemplo de llenado del formato de campo para la descripción de un perfil de suelo	67
Figura 31. Ejemplo de designación de horizontes en Leptosols con rocas intemperizadas	79
Figura 32. Ejemplo de un mapa de perfil de suelo para estudios detallados	82
Figura 33. Equipo para análisis de propiedades de los suelos para estudios detallados en ambientes extremos	83
Figura 34. Ejemplo de estudios de suelo en parcelas	85
Figura 35. Interfaz principal de WEKA	95
Figura 36. Gráficas de dispersión para la identificación de relaciones entre las variables de entrenamiento del modelo de estimación	96

*Manual para el muestreo y descripción de perfiles de suelo
en campo con objetivos múltiples*
editado por el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental/UNAM.
Se publicó en diciembre de 2023.
Coordinación editorial: Israel Chávez Reséndiz;
cuidado editorial: Benito Artigas;
formación editorial: Eduardo González Palacios.
Para su formación se utilizaron
las tipografías News Goth BT y Garamond en 11 y 10 pt.

Los suelos son un elemento clave de los ecosistemas terrestres, pero no todos funcionan de la misma manera, por lo que se considera que para lograr los objetivos de desarrollo sustentable será necesario conocerlos, conservarlos y manejarlos de acuerdo con su funcionamiento en particular.

Manuales de técnicas de estudio del suelo hay muchos, y estamos presentando uno más. Cada manual que hemos analizado tiene ventajas y desventajas con respecto a los demás.

En este manual hacemos énfasis en las funciones ambientales del perfil del suelo, con la finalidad de lograr los objetivos de desarrollo sustentable declarados por las Naciones Unidas.



centro de investigaciones en
geografía ambiental • UNAM