







INTRODUCCIÓN

AL MANEJO

DE LOS

SUELOS TROPICALES





PAOLA BRENES ROJAS

INTRODUCCIÓN
AL MANEJO
DE LOS
**SUELOS
TROPICALES**



EDITORIAL UNIVERSIDAD ESTATAL A DISTANCIA





PROMADE
PROGRAMA DE PRODUCCIÓN
DE MATERIAL DIDÁCTICO ESCRITO

Producción académica
y asesoría metodológica

Ana Beatriz Picado González

Carlos Fco. Zamora-Murillo

© Paola Brenes Rojas
© Universidad Estatal a Distancia

ISBN: 978-9968-48-357-5

Primera edición:
Editorial Universidad Estatal a Distancia
San José, Costa Rica, 2021

Encargado de Carrera Manejo de Recursos Naturales
Héctor Brenes Soto

Encargados de Cátedra Gestión Sostenible del Suelo
Wagner Peña Cordero

Especialista en contenido
Natalia Gómez Calderón

Coordinación de la edición académica
Evelin Umaña Ramírez

Corrección de estilo
Alejandro Lizano Fernández

Edición gráfica y propuesta de publicación
Carlos Fco. Zamora-Murillo

Ilustraciones

*Alejandra Céspedes Brenes
José Francisco (Franco) Céspedes Carvajal*

Diseño de cubiertas

*Carlos Fco. Zamora-Murillo utilizando una ilustración
de José Francisco (Franco) Céspedes Carvajal y algunos
epipedones y endopedones, según la taxonomía de suelos
de la USDA en Costa Rica (FIG. 57 y 58)*

Fotografías

*Cortesías de: Carlomagno Salazar Calvo,
Creative Commons, Emmanuel Chaves González,
José Carlos Lacayo, N. Solórzano, Paola Brenes Rojas,
USDA-NRCS, Wagner Peña Cordero, Wikimedia
Commons, salvo que se indique lo contrario.*

Ver créditos de las imágenes
utilizadas en esta obra en la página 269

Esta unidad didáctica fue producida en su versión final por el Programa de Producción de Materiales Didácticos Escritos (PROMADE) en 2020, para la asignatura **Suelos Tropicales** [cód. 860] que imparte la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales (ÉCEN) de la Universidad Estatal a Distancia (UNED), San José, Costa Rica.

Los contenidos de esta unidad didáctica, en su versión preliminar, fueron revisados y avalados por la especialista y el encargado de cátedra.

Se han respetado, en la medida de lo posible, la estructura lingüística y el estilo utilizado por el autor.

636.082
C352c Cartín-Rojas, Andrés, 1980
Sanidad animal de especies productivas / Andrés Cartín Rojas. -- San José, C.R. : EUNED, 2017.
296 p.
ISBN: 978-9968-48-357-5
1. MEDICINA VETERINARIA. 2. ANIMALES DOMÉSTICOS. 3. SALUD PÚBLICA. 4. ENFERMEDADES TRANSMISIBLES. I. Título.

Impreso en Costa Rica
Reservados todos los derechos.

Prohibida la reproducción total o parcial
bajo cualquier medio mecánico o electrónico
del contenido total o parcial de esta publicación
sin el permiso expreso del autor y de los editores.



A Dios y su energía divina e infinita.

A Kahil y Dalai, quienes me incentivan diariamente a ser mejor y que con sus sonrisas logran darme la energía suficiente para lograr las metas propuestas.

A Doña Leticia, mi abuelita, que desde la tierra, y ahora en el cielo, me alentó a ser todo lo que soy.

A mi madre que con su aliento me acompañó en este camino,

¡A todos los tenemos claro que, bajo nuestros pies, existe un recurso inigualable que alberga una infinita biodiversidad y por el cual debemos preocuparnos por conservar!





AGRADECIMIENTO

Al doctor Wagner Peña Cordero por su guía y a todos los que aportaron para el desarrollo de este material.

A mis estudiantes que alentaron a construir este documento.



PRESENTACIÓN

Los recursos naturales representan el capital mundial más valioso que posee la humanidad, ya que cada uno de estos contribuye a sostener el equilibrio del planeta y, como consecuencia, la existencia del género humano. Uno de los recursos involucrado en todas las actividades, tanto naturales como las fabricadas por la sociedad, es el suelo.

Con respecto al suelo, cobran importancia los eventos atmosféricos, incluidos el agua, el sol y el aire, el material parental, la vegetación, los animales, el relieve y el paso del tiempo. Estos son los factores que ayudan a formar el recurso edáfico sobre el cual crece y se desarrolla la vida.

En la presente unidad didáctica, elaborada por la máster Paola Brenes Rojas, se refleja la relevancia de los elementos mencionados y de las propiedades del suelo, que varían constantemente y aún más en ambientes tropicales, donde coexisten pisos bioclimáticos, vegetación y otros organismos diferentes en cada región.

En el libro, la autora despliega los contenidos de formación, propiedades, fertilidad y nutrición, clasificación, manejo y calidad del suelo desde una visión transversal de la sostenibilidad y la conservación del recurso, con énfasis en las relaciones entre el suelo, el agua, los organismos y el clima de las tierras en el trópico, temas cuyo estudio contribuye con el desarrollo de la humanidad, pero con la perspectiva del suelo tropical como un recurso cuyo valor crece día a día para todos los que compartimos un ecosistema.





X

Sin duda, esta obra didáctica es una útil herramienta para los estudiantes de la carrera de Manejo de los Recursos Naturales y otras afines en la UNED y los profesionales del sector, quienes contarán con un referente de consulta para conservar y manejar ese recurso que es frágil y sigue vivo.

WAGNER PEÑA CORDERO

Catedrático

Coordinador Cátedra Gestión Sostenible del Suelo

Escuela de Ciencias Exactas y Naturales





Para propiciar distintas líneas de aprendizaje en la unidad didáctica, aparecerán señales que indican el momento en que surjan conceptos, datos e información complementaria, los cuales exemplifican los contenidos.

ICONOGRAFÍA APLICADA A LAS ESTRATEGIAS PARA LA ENSEÑANZA	
	ACTIVIDAD. Refiere a actividades, ejercicios y tareas sobre el tema tratado. Cumplen una doble función: ayudan a reforzar y a comprobar el aprendizaje
	ATENCIÓN. Se utiliza para invitar a la relectura, profundizar en un tema o llamar la atención sobre algún punto de singular peso en el proceso de enseñanza-aprendizaje.
	CONCEPTO. Se disponen términos considerados muy técnicos o de uso muy específico y que, por ende, es mejor definir para facilitar la lectura y comprensión del texto propuesto.
	EN LA RED... Sugiere actividades para realizar en internet: acceder a algún audiovisual o multimedia recomendado, así como visitar entornos virtuales de aprendizaje para la enseñanza a distancia. <small>[VÉASE CÓDIGO QR]</small>
	INVESTIGUE. Como parte de la formación en planificación educativa, con esta estrategia se proponen actividades de indagación, exploración, prácticas de campo y aplicación sobre temas sustantivos de la obra.
	EJEMPLO. Se recurre a esta figura para exponer situaciones relacionadas con el tema y que, de manera significativa, faciliten la comprensión de los distintos procesos evolutivos de la disciplina en estudio.
	ESTUDIO DE CASO. Se le proponen al lector casos hipotéticos, pero relacionados con el ejercicio profesional, con la intención de facilitar la aplicación de algunos conceptos o situaciones particulares.
	CÓDIGO QR. Para acceder a las direcciones sugeridas para visitar en la Red, utilice un teléfono inteligente (<i>smartphone</i>) y una aplicación (app), la cual sirve para leer este tipo de imágenes. Se puede descargar gratuitamente en tiendas y repositorios.





SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS MÁS UTILIZADOS

ORGANIZACIONES, INSTITUCIONES, ENTES ADMINISTRATIVOS O FINANCIEROS

ACCS	Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo	NRCS	Servicio de Conservación de Recursos Naturales (Natural Resources Conservation Service, por sus siglas en inglés)
CADETI	Comisión Asesora sobre Degradación de Tierras	ONU	Organización de las Naciones Unidas
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza	UCR	Universidad de Costa Rica
CCT	Centro Científico Tropical	UNAD	Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia
CIA	Centro de Investigaciones Agronómicas, UCR	UNED	Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica
COP22	Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, por sus siglas en inglés)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Food and Agriculture Organization of the United Nations, por sus siglas en inglés)	USAL	Universidad de Salamanca, España
GLASOD	Evaluación Global de la Degradación Humana del Suelo, FAO (Global Assessment of Human-induced Soils Degradation, por sus siglas en inglés)	OTROS	
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura	CIA	Capacidad de intercambio aniónico
IMN	Instituto Meteorológico Nacional	CIC	Capacidad de intercambio catiónico
INBio	Instituto Nacional de Biodiversidad	GPS	Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System, por sus siglas en inglés)
INTA	Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, MAG	GSR	Grupos de suelos de referencia
IPNI	Instituto Internacional de Nutrición Vegetal (International Plant Nutrition Institute, por sus siglas en inglés)	IAH	Informaciones Agronómicas de Latinoamérica
ISSS	Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo (International Society of Soil Science, por sus siglas en inglés)	IMR	Índice por Método Racional
IUSS	Unión Internacional de las Ciencias del Suelo (International Union of Soil Sciences, por sus siglas en inglés)	MO	Materia orgánica
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería	MOS	Materia orgánica del suelo
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía (anteriormente MIRENEM: Ministerio de Recursos Naturales, Energía y Minas)	SIG	Sistema de información geográfica
		USDA	Taxonomía de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (United States Department of Agriculture, por sus siglas en inglés)
		USLE	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Universal Soil Loss Equation, por sus siglas en inglés)
		WRB	Base Referencial Mundial para Recursos del Suelo (World Reference Base, por sus siglas en inglés)



CONTENIDO

PRESENTACIÓN.....	IX
ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS.....	XVII

CAPÍTULO PRIMERO

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

DE LA EDAFOLOGÍA

<i>Objetivos de aprendizaje</i>	2
<i>Conceptos clave</i>	2
<i>Introducción</i>	3
I. HISTORIA DE LA EDAFOLOGÍA	3
II. INTRODUCCIÓN A LA EDAFOLOGÍA	9
A. CONCEPTOS	9
1. <i>Pedósfera</i>	9
2. <i>Suelo y tierra</i>	10
3. <i>Solución de suelo</i>	13
4. <i>Edafogénesis</i>	13
B. FUNCIONES ECOSISTÉMICAS DEL SUELO	13
C. FACTORES FORMADORES DEL SUELO	14
1. <i>Clima</i>	16
2. <i>Relieve</i>	17
3. <i>Roca madre</i>	19
4. <i>Tiempo</i>	20
5. <i>Organismos</i>	21
6. <i>Efectos antropológicos</i>	21
D. PROCESOS DE FORMACIÓN DE SUELOS.....	21
1. <i>Fraccionamiento</i>	22
2. <i>Alteración</i>	22
3. <i>Translocación</i>	23
4. <i>Adición y remoción</i>	24
E. PERFIL DEL SUELO	24
F. METEORIZACIÓN	27
1. <i>Disolución</i>	28
2. <i>Carbonatación</i>	28
3. <i>Hidratación</i>	28
4. <i>Hidrólisis</i>	28
5. <i>Oxidación</i>	29
6. <i>Actividad biológica</i>	30
III. MINERALES	30
A. CLASIFICACIÓN DE ROCAS	31
1. <i>Rocas ígneas</i>	31
2. <i>Rocas metamórficas</i>	32
3. <i>Rocas sedimentarias</i>	32



4. <i>Rocas más comunes</i>	32
B. MINERALES PRIMARIOS	33
1. <i>Silicatos</i>	33
2. <i>Ortosilicatos</i>	34
3. <i>Sorosilicatos</i>	35
4. <i>Ciclosilicatos</i>	35
5. <i>Inosilicatos</i>	35
6. <i>Tectosilicatos</i>	36
7. <i>Filosilicatos</i>	37
8. <i>Otros minerales primarios</i>	38
C. MINERALES SECUNDARIOS	38
1. <i>Sales</i>	39
2. <i>Aluminosilicatos o arcillas</i>	39
3. <i>Óxidos e hidróxidos</i>	40
IV. INFLUENCIA DEL TRÓPICO SOBRE EL SUELO	41
V. SUELO IDEAL	43
<i>Resumen</i>	44
<i>Ejercicios de autoevaluación</i>	47
<i>Respuesta a los ejercicios de autoevaluación</i>	49

CAPÍTULO SEGUNDO

PROPIEDADES FÍSICAS. QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL SUELO

Objetivos de aprendizaje	51
Conceptos clave	52
<i>Introducción</i>	53
I. FERTILIDAD DEL SUELO	53
A. FERTILIDAD EN LOS ECOSISTEMAS NATURALES Y EN LOS AGROECOSISTEMAS	54
B. FACTORES QUE AFECTAN LA FERTILIDAD DEL SUELO	56
II. MUESTREO DE LOS SUELOS	58
III. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	69
A. TEXTURA	69
B. ESTRUCTURA	75
C. DENSIDAD DEL SUELO	79
1. <i>Densidad aparente</i>	79
2. <i>Densidad real o de partículas</i>	84
D. POROSIDAD	85
E. AGUA EN EL SUELO	87
1. <i>Propiedades del agua</i>	88
2. <i>Determinación de humedad en el suelo</i>	93
3. <i>Movimiento del agua en el suelo</i>	94
F. COLOR DEL SUELO	95
IV. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO	96
A. ELEMENTOS DEL SUELO	97
B. pH Y ACIDEZ DEL SUELO	105
1. <i>Concepto de pH</i>	105
2. <i>Acidez del suelo</i>	106
C. INTERCAMBIOS IÓNICOS EN EL SUELO	112



1. <i>Capacidad de intercambio catiónico (CIC)</i>	113
2. <i>Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe)</i>	115
3. <i>Capacidad de intercambio de aniones (CIA)</i>	116
4. <i>Absortividad</i>	118
D. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	119
E. EVALUACIÓN DE FERTILIDAD DE SUELOS	120
V. PROPIEDADES BIOLÓGICAS DEL SUELO	124
A. MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO	125
B. MICROORGANISMOS EN EL SUELO	133
1. <i>Bacterias</i>	137
2. <i>Actinomicetos</i>	139
3. <i>Hongos</i>	140
4. <i>Otros organismos</i>	141
5. <i>Factores que influyen en la actividad microbiológica del suelo</i>	142
C. ABONOS ORGÁNICOS.....	143
D. BIOESTIMULANTES Y BIOCONTROLADORES	147
<i>Resumen</i>	150
<i>Ejercicios de autoevaluación</i>	153
<i>Respuesta a los ejercicios de autoevaluación</i>	154

CAPÍTULO TERCERO

CLASIFICACIÓN

DE LOS SUELOS

<i>Objetivos de aprendizaje</i>	156
<i>Conceptos clave</i>	157
<i>Introducción</i>	157
I. HISTORIA DE LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS	158
II. BASE REFERENCIAL MUNDIAL PARA RECURSOS DEL SUELO, SISTEMA WRB	160
III. TAXONOMÍA DE SUELOS, SISTEMA USDA	163
IV. SUELOS DE AMÉRICA LATINA.....	174
V. CARACTERIZACIÓN EDÁFICA DE COSTA RICA.....	178
<i>Resumen</i>	184
<i>Ejercicios de autoevaluación</i>	187
<i>Respuesta a los ejercicios de autoevaluación</i>	188

CAPÍTULO CUARTO

MANEJO Y CONSERVACIÓN

DE SUELOS

<i>Objetivos de aprendizaje</i>	189
<i>Conceptos clave</i>	190
<i>Introducción</i>	191
I. CALIDAD Y SALUD DEL SUELO	193
II. FUNCIONES DEL SUELO	194
III. DEGRADACIÓN DE SUELOS	195
A. TIPOS DE DEGRADACIÓN DE SUELOS	199
1. <i>Degradación natural</i>	200



2. <i>Degradación antrópica</i>	201
a) Degradación de la fertilidad.....	201
b) Contaminación.....	202
c) Erosión.....	203
B. PRÁCTICAS INADECUADAS EN EL MANEJO DEL SUELO.....	209
IV. METODOLOGÍA PARA DETERMINAR PERDIDA DE SUELO	211
V. EVALUACIONES DE CALIDAD DE SUELO	214
A. GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD Y SALUD DE USDA	216
1. <i>Propiedades físicas</i>	216
2. <i>Propiedades biológicas</i>	217
3. <i>Propiedades químicas</i>	218
B. PROPUESTA DE CALIDAD DE SUELO SEGÚN ALTIERI.....	218
VI. NORMATIVA AMBIENTAL SOBRE USO, MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS.....	220
A. NORMATIVAS ESPECÍFICAS: CASO DE COSTA RICA.....	221
B. METODOLOGÍA SOBRE LA CAPACIDAD DE USO DE LAS TIERRAS: CASO DE COSTA RICA.....	224
VII. TÉCNICAS DE MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS	229
A. PRÁCTICAS AGROCONSERVACIONISTAS O PRÁCTICAS CULTURALES.....	229
1. <i>Curvas de nivel</i>	229
2. <i>Coberturas</i>	231
a) Coberturas muertas	231
b) Abonos verdes	232
c) Coberturas vivas	232
3. <i>Cortinas rompevientos</i>	234
4. <i>Fajas protectoras</i>	234
B. PRÁCTICAS ESTRUCTURALES O PRÁCTICAS MECÁNICAS.....	235
1. <i>Canales guardia</i>	235
2. <i>Acequias de ladera y zanjillas de drenaje</i>	236
3. <i>Vías de agua empastada</i>	237
4. <i>Terrazas</i>	237
5. <i>Zonas de infiltración (conservación de agua)</i>	237
C. PRÁCTICAS AGRONÓMICAS.....	239
D. MEDICIÓN DE DISTANCIAS Y PENDIENTES.....	250
<i>Resumen</i>	242
<i>Ejercicios de autoevaluación</i>	243
<i>Respuesta a los ejercicios de autoevaluación</i>	245
<i>Fuentes consultadas</i>	247
<i>ANEXOS</i>	259
<i>Formulario para documentar observaciones de campo durante un mapeo de suelos</i>	261
<i>Plantilla de campo para la descripción de la capacidad de uso del suelo</i>	263
<i>GLOSARIO</i>	255
<i>CRÉDITOS DE LAS ILUSTRACIONES UTILIZADAS EN ESTA OBRA</i>	269
<i>ACERCA DE LA AUTORA</i>	273



ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

CUADROS

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6 CUADRO 1. Principales diferencias entre el concepto de edafología y el de pedología. | 122 CUADRO 17. Variables químicas en suelos agrícolas de Costa Rica. |
| 12 CUADRO 2. Comparación de los conceptos de suelo y de tierra. | 145 CUADRO 18. Características y niveles óptimos de los abonos orgánicos. |
| 25 CUADRO 3. Características principales de los horizontes. | 146 CUADRO 19. Niveles de carbono y nitrógeno en abonos, según material. |
| 26 CUADRO 4. Características específicas en los horizontes según el sufijo. | 162 CUADRO 20. Clasificación de suelo según sistema WRB y descripción general. |
| 29 CUADRO 5. Ejemplos de procesos de oxidación y las correspondientes observaciones de los suelos. | 165 CUADRO 21. Órdenes de suelo según USDA, elemento formativo, descripción y característica determinante. |
| 56 CUADRO 6. Ejemplos de sinergismos en un agropaisaje. | 170 CUADRO 22. Prefijos formativos para los subórdenes y su significado. |
| 64 CUADRO 7 Profundidad de muestreo según uso u objetivo. | 174 CUADRO 23. Diferencias entre los sistemas de clasificación de suelos más reconocidos. |
| 71 CUADRO 8. Clases texturales de acuerdo con los porcentajes de minerales. | 175 CUADRO 24. Similitud entre los nombres de grupos de suelo de referencia (GSR) del sistema WRB y los de órdenes y subórdenes del sistema USDA. |
| 75 CUADRO 9. Propiedades de los suelos que se infieren según dominancia granulométrica. | 179 CUADRO 25. Características de los órdenes de suelo en Costa Rica. |
| 81 CUADRO 10. Densidad aparente según clase textural. | 209 CUADRO 26. Factores o circunstancias que contribuyen la erosión y sus consecuencias. |
| 86 CUADRO 11. Tipos de poros en el suelo. tamaño, clasificación y descripción. | 224 CUADRO 27. Clases de capacidad de uso de suelo. |
| 92 CUADRO 12. Coeficiente hídrico según presión atmosférica | 226 CUADRO 28. Subclases, limitaciones y parámetros para determinar la unidad de manejo. |
| 97 CUADRO 13. Proporción de constituyentes según el material parental | 228 CUADRO 29. Factores y limitantes para la evaluación de la capacidad de uso de las tierras. |
| 99 CUADRO 14. Elementos químicos presentes en el suelo. | 232 CUADRO 30. Coberturas vivas utilizadas en América Latina. |
| 115 CUADRO 15. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) según la naturaleza del material. | |
| 121 CUADRO 16. Categoría del suelo según valores de conductividad eléctrica. | |



FIGURAS

- 7 **FIGURA 1.** Ilustración de la teoría del mínimo.
- 9 **FIGURA 2.** Cronología del origen de la edafología como ciencia.
- 11 **FIGURA 4.** Pedón y polipedón en un suelo.
- 13 **FIGURA 5.** Integración de los sistemas en el suelo.
- 15 **FIGURA 6.** Funciones ecosistémicas del suelo.
- 15 **FIGURA 7.** Factores formadores del suelo según el ambiente.
- 17 **FIGURA 8.** Tipos de arcilla según precipitación del suelo en Hawaii.
- 18 **FIGURA 9.** Cambios en el paisaje según el perfil del suelo.
- 20 **FIGURA 10.** Efecto del tiempo en la formación de los suelos.
- 22 **FIGURA 11.** Meteorización física: fragmentación de la materia parental.
- 24 **FIGURA 12.** Perfil de un suelo con horizontes O, A, B, C y R.
- 34 **FIGURA 13.** Estructura del silicato.
- 34 **FIGURA 14.** Olivino: un ortosilicato.
- 35 **FIGURA 15.** Sorosilicato.
- 35 **FIGURA 16.** Ciclosilicato.
- 35 **FIGURA 17.** Inosilicatos simple y doble.
- 36 **FIGURA 18.** Estructura interna tridimensional de un cuarzo.
- 37 **FIGURA 19.** Filosilicato.
- 41 **FIGURA 20.** Zona intertropical.
- 42 **FIGURA 21.** Suelos dominantes en el mundo.
- 55 **FIGURA 22.** Ecosistema natural y materia orgánica.
- 61 **FIGURA 23.** Modelos sistemáticos para muestreo de suelos.
- 61 **FIGURA 24.** Muestreo aleatorio en suelos.
- 62 **FIGURA 25.** Esquema de muestreo de suelos.
- 63 **FIGURA 26.** Herramientas recomendadas para el muestreo de suelos.
- 65 **FIGURA 27.** Método de toma de muestra de suelo con palín.
- 66 **FIGURA 28.** Cuarteo de la muestra.
- 67 **FIGURA 29.** Dimensiones de la calicata.
- 70 **FIGURA 30.** Partículas minerales del suelo.
- 72 **FIGURA 31.** Comparación del tamaño de partículas minerales.
- 72 **FIGURA 32.** Triángulo de clasificación textural según el departamento de agricultura de los estados unidos (USDA).
- 76 **FIGURA 33.** Estado de los coloides del suelo .
- 76 **FIGURA 34.** Diagrama de una buena estructura del suelo.
- 78 **FIGURA 35.** Tipos de estructuras del suelo.
- 80 **FIGURA 36.** Equipo necesario para la toma de muestras de densidad.
- 85 **FIGURA 37.** Porosidad en suelos arenosos y arcillosos.
- 86 **FIGURA 38.** Porosidad en los horizontes A y B de ultisoles con diferente material parental (Talamanca, Costa Rica).
- 89 **FIGURA 39.** Puentes de hidrógeno entre moléculas de agua.
- 93 **FIGURA 40.** Condiciones de retención de humedad del suelo
- 95 **FIGURA 41.** Forma del bulbo húmedo en el suelo, según la clase de textura.
- 106 **FIGURA 42.** Escala de pH.
- 107 **FIGURA 43.** Tipos de acidez en la solución del suelo.
- 110 **FIGURA 44.** Disponibilidad de nutrientes del suelo según valores de pH.
- 114 **FIGURA 45.** Intercambio catiónico del suelo.



- 130 **FIGURA 46.** Factores que intervienen en la desintegración y el mantenimiento de la materia orgánica.
- 132 **FIGURA 47.** Transformación de la materia orgánica.
- 134 **FIGURA 48.** Ciclo del nitrógeno.
- 136 **FIGURA 49.** Proceso de nitrificación y desnitrificación.
- 141 **FIGURA 50.** Microorganismos del suelo.
- 144 **FIGURA 51.** Fases del compostaje.
- 148 **FIGURA 52.** Hongos antagonistas.
- 149 **FIGURA 53.** Micorrizas en las raíces de la planta.
- 159 **FIGURA 54.** Clasificación de suelos según Dokucháyev.
- 161 **FIGURA 55.** Mapa de suelos dominantes de FAO/UNESCO.
- 167 **FIGURA 56.** Efecto de los factores y procesos formadores del suelo en la clasificación de suelos a través del tiempo.
- 168 **FIGURA 57.** Epipedones según la taxonomía de suelos de la USDA en Costa Rica.
- 169 **FIGURA 58.** Endopedones según la taxonomía de suelos de la USDA en Costa Rica.
- 176 **FIGURA 59.** Principales grupos de suelo de referencia (GSR) en Latinoamérica según la clasificación de la WRB.
- 181 **FIGURA 60.** Órdenes de suelos para Costa Rica.
- 182 **FIGURA 61.** Subórdenes de suelos para Costa Rica.
- 183 **FIGURA 62.** Distintos perfiles de suelos clasificados según la taxonomía de suelos de la USDA en Costa Rica.
- 184 **FIGURA 63.** Mapa de grupos de suelos de referencia para Costa Rica.
- 198 **FIGURA 64.** Degradación de suelos en Mesoamérica y América del Sur.
- 200 **FIGURA 65.** Clasificación de tipos de degradación.
- 200 **FIGURA 66.** Productividad según la degradación de un suelo.
- 201 **FIGURA 67.** Diagrama explicativo de la degradación de la fertilidad del suelo.
- 205 **FIGURA 68.** Clasificación de los tipos de erosión.
- 216 **FIGURA 69.** Indicadores de calidad de suelo.
- 230 **FIGURA 70.** Codal como instrumento para realizar curvas de nivel.
- 231 **FIGURA 71.** Curvas de nivel.
- 231 **FIGURA 72.** Coberturas muertas.
- 232 **FIGURA 73.** Cobertura de abonos verdes.
- 234 **FIGURA 74.** Coberturas vivas.
- 235 **FIGURA 75.** Cortinas rompevientos.
- 236 **FIGURA 76.** Construcción de canales guardia.
- 236 **FIGURA 76.** Acequias de ladera.
- 237 **FIGURA 78.** Zonas de infiltración y captación de aguas y sedimentos.
- 238 **FIGURA 79.** Otros materiales aplicados en zonas de infiltración.
- 240 **FIGURA 80.** Mediciones de distancia en zonas con pendiente.
- 241 **FIGURA 81.** Determinación de la pendiente.





INTRODUCCIÓN AL MANEJO DE LOS SUELOS TROPICALES

CAPÍTULO PRIMERO

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS DE LA EDAFOLOGÍA

CAPÍTULO SEGUNDO

PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL SUELO

CAPÍTULO TERCERO

CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

CAPÍTULO CUARTO

MANEJO Y CONSERVACIÓN DE LOS SUELOS







CAPÍTULO PRIMERO

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS DE LA EDAFOLOGÍA

SUMARIO

- Historia de la edafología
- Introducción a la edafología
- Minerales
- Influencia del trópico sobre el suelo
- Suelo ideal

SINOPSIS

Para comprender los procesos biogeoquímicos que suceden en el suelo y su importancia en el ecosistema, es significativo entender los principios, los componentes del suelo y los factores que influyen en el suelo, tanto en la solución como en la rizosfera. El material parental que compone un suelo y los minerales son parte fundamental en el entendimiento del suelo como ingrediente especial de los sistemas agrícolas forestales o en un ecosistema no perturbado. Los procesos que suceden sobre el material primario forman el conjunto de horizontes del suelo y cada horizonte o capa presenta características físicas, químicas y biológicas diferentes y valiosas. Un suelo ideal se constituye de manera única y lo más valioso es el mantenimiento de las interacciones que en este suceden.





OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

OBJETIVO GENERAL

Identificar los aspectos fundamentales que influyen en la formación de los suelos y su perfil en los ecosistemas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Al finalizar el estudio del presente capítulo, el educando estará en capacidad de:

1. Comentar brevemente el nacimiento de la edafología y el establecimiento de las ciencias del suelo en la actualidad.
2. Explicar los fundamentos y los principios de la ciencia del suelo.
3. Relacionar los factores formadores del suelo con la variabilidad edáfica en el paisaje.
4. Reconocer los minerales primarios y secundarios que se encuentran en el suelo.
5. Describir las características edáficas de los suelos tropicales.

CONCEPTOS CLAVE

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| • pedología | • teoría edafogenética |
| • ciencia del suelo | • meteorización |
| • teoría del mínimo | • perfil del suelo |
| • pedósfera | • gleyiación |
| • suelo | • nivel freático |
| • tierra | • meteorización |
| • solución del suelo | • nitrificación |
| • edafogénesis | • desnitrificación |
| • funciones del ecosistema | • influencia del trópico |
| • factores formadores | • suelos no disturbados |
| • zona de vida | • suelo ideal |





INTRODUCCIÓN

El científico, inventor y pintor italiano Leonardo da Vinci (1452-1519) dijo: «Sabemos más sobre el movimiento de los cuerpos celestes que sobre el suelo bajo nuestros pies» (CITADO POR DÖRNER, HORN, BLUM, VALLE, WENDROTH, ZÚÑIGA, THIERS Y SEGUEL, 2015, p. 2). Eso fue hace aproximadamente 500 años y los expertos coinciden en que el suelo sigue tan ignoto como hoy.

La historia de la edafología es vital para entender las ciencias agrícolas y el desarrollo agrario y forestal de los países. Todos los días, en las ciencias naturales se lleva a cabo un descubrimiento; pero en la historia y en el nacimiento de los conceptos básicos se sientan los cimientos científicos para continuar el estudio de la edafología y, así, identificar, en la actualidad, las necesidades futuras de conocimiento y las de investigación de hoy para cubrirlas. El objetivo es lograr que la ciencia en este campo sea más integral y dinámica y no solo abarque el sector agropecuario.

Los interesados en el tema deben readecuar la noción de suelo a partir de una perspectiva ecológica integral: como parte del planeta Tierra. Ellos requieren conocer las funciones del suelo para obtener el cambio: este actúa la plataforma de la seguridad alimentaria del mundo y del equilibrio de los principales recursos del planeta, y es una fuente agotable.

Existe una revolución constante de los avances científicos y la edafología; como la mayoría de las ciencias, no presenta fronteras. Cada día se necesita que más investigadores profundicen en las interrelaciones que suceden en el suelo y regulen el manejo y los cuidados requeridos para mantener la estabilidad de tal recurso.

I. **Historia de la edafología**

La edafología es una ciencia cuyo propósito es el estudio del suelo respecto a las plantas y su entorno. Sin embargo, a lo largo de la historia, los límites y la forma de análisis del suelo como



recurso han variado pues dependen, además de las escuelas de investigación, de las corrientes de pensamiento o los distintos enfoques que el pensador o el experto en el tema les ha asignado.

En la actualidad, el concepto del suelo ha evolucionado: no se limita a un material o a un recurso natural aislado, sino que consiste en uno de los engranajes esenciales en los diferentes **ciclos ecosistémicos**, como los de la materia y la energía.

Por años, la edafología se consideró una ciencia estática; pero actualmente se piensa como dinámica y holística, que comprende aspectos físicos, químicos, biológicos y sus relaciones ecosistémicas (PEÑA CORDERO, 2017) y donde no solo se evoca al sector agrícola sino también en usos y servicios urbanos.

La edafología es comúnmente confundida con el término pedología, puesto que estudiosos del tema, como el lexicógrafo español José Martínez de Sousa (n. 1933), estiman que pedología y edafología son sinónimos. Pero ahora se refuta esa idea porque la mayoría de los especialistas de ambas ramas establece una diferencia clara: la pedología estudia la descripción, la génesis y la clasificación de los suelos, mientras que la edafología trata el suelo como medio vital para el desarrollo de la vida, tanto animal como vegetal (DOMERGUE Y FILELLA, 1998). Por lo tanto, *la pedología se clasifica como una rama de la geología, en tanto que la edafología se reconoce como una especialización de la ecología*, disciplina que estudia las relaciones y las interacciones de los diferentes organismos animales y vegetales.

Con base en dicha distinción, se aprecian las otras posiciones que atañen al término suelo desde la perspectiva de cada una de las dos ciencias. En la edafología el suelo se muestra como un medio edáfico, el cual se encuentra a su vez relacionado con las diferentes interacciones bióticas y abióticas que circundan el medio. En la pedología, el suelo se considera como un objeto natural, producto de la aparición y la evolución que devienen de procesos de transformación y degradación de un material parental.

Históricamente, las diferencias entre el uso de las terminologías han radicado en la cultura. Las autoras France-Line Domergue y Montserrat Filella (1998) comentan que en los países de lengua francesa el término **ciencia del suelo** es desconocido en su tota-



ATENCIÓN

Los suelos desempeñan múltiples servicios ecosistémicos en el planeta: la producción de alimento, el ciclo del agua (almacenan y filtran agua), la producción de medicinas, ser cuna de la cuarta parte de la biodiversidad del planeta y ser clave en el ciclo de carbono, entre otros.



lidad y que, sin embargo, para los de habla inglesa es el vocablo más empleado y, generalmente, aceptan la palabra pedología como sinónimo de edafología.

El *Diccionario de la Lengua Española* define el término **edafología** con la siguiente acepción única: «Ciencia que trata de la naturaleza y las condiciones del suelo, en su relación con las plantas» (RAE, 2017).

Esto se refirma con lo aportado por Jaume Portas y Darío Villanueva, en su estudio de neologismos en ciencias del suelo, donde sugieren que los países de habla hispana utilizaron el término edafología es una rama de la ciencia del suelo y separan la pedología la conocieron como una rama de la geología (PORTAS Y VILLANUEVA, 2012).

Etimológicamente, la palabra **pedología** proviene de la raíz indoeuropea *ped*, cuyo significado es «pie», y se refiere al suelo como «sobre el que se anda», o sea, una plataforma. Esta palabra se relaciona más con el material de la plataforma en la cual se va a construir, razón por la cual siempre se enlaza con la geología. A causa de lo anterior, la mayoría de las personas utilizan el término pedología como tal y tienden a pensar en edafología como ciencia del suelo.

En cuanto al término ciencia del suelo proviene de la expresión en inglés *soil science*, la cual se difundió en un inicio en países de lengua inglesa. El nombre se introdujo formalmente en el congreso celebrado en Washington, en 1927 pues este se llamó First International Congress of International Society of Soil Science.

Como se mencionó, para los países hispanoamericanos y europeos de lengua española, los términos ciencia del suelo y edafología son sinónimos (DOMERGUE Y FILELLA, 1998).

El edafólogo francés Philippe Duchaufour, en su libro *Edafología: edafogénesis y clasificación* (1984), contrasta los conceptos edafología y ciencias del suelo; según lo indican Portas y Villanueva (2012), la diferencia radica en que edafología es una ciencia dinámica, mientras que el concepto de ciencias del suelo es más estático. En la actualidad, dicha posición ha sido adoptada y generalizada en la mayor parte de los países del continente americano.

CONCEPTOS

relaciones

ecosistémicas. Procesos interrelacionados relativos a las comunidades bióticas y su interacción con la tierra, agua y aire. El enfoque ecosistémico es una estrategia para la ordenación integrada de la tierra, el agua y los recursos vivos que promueve la conservación y el uso sostenible de manera equitativa.

ciencia del suelo. Rama de las ciencias que estudia el suelo en su composición y estructura como recurso natural en la superficie de la Tierra.



CUADRO 1

PRINCIPALES DIFERENCIAS
ENTRE EL CONCEPTO DE EDAFOLOGÍA
Y EL DE PEDOLOGÍA

EDAFOLÓGIA	PEDOLOGÍA
Rama de la ecología	Rama de la geología
Ciencia que estudia la descripción, génesis y clasificación de los suelos	Ciencia que estudia el suelo como medio vital para el desarrollo de la vida animal y vegetal
El suelo es un sistema edáfico relacionado con múltiples factores bióticos y abióticos	El suelo es un objeto natural definible, cuya aparición y evolución se debe a intercambios de energía con el entorno
Término utilizado en zonas de lengua hispana y recientemente aceptado como único vocablo para acuñar las ciencias del suelo	Término utilizado en zonas de lengua inglesa y relacionado con su importancia para la construcción

FUENTE: investigación y propuesta de Paola Brenes Rojas a partir de Edafología del trópico, de Wagner Peña Cordero (2017) y «Formación de neologismos en Ciencias del Suelo», de Jaume Portas y Darío Villanueva (2012).

Para entender mejor las diferencias entre las nociones de edafología y de pedología, estas se resumen en el Cuadro 1.

Al geólogo ruso Vasili Vassílievich Dokucháyev (1846-1903) se le considera el fundador de la edafología pues introdujo el estudio del suelo como ciencia independiente a finales del siglo XIX (KRUPENIKOV, 1992).

La historia de la edafología es dividida por Ildefonso Barrios (1985), geólogo español, en las siguientes etapas:

1. La etapa precientífica, donde se destacan conocimientos dispersos no diferenciados; finaliza en el siglo XVIII.

En este lapso, los filósofos como Hipócrates (460-370 A.E.C.), Empédocles (495-430 A.E.C.) y Teofrasto (370-287 A.E.C.) establecen las primeras percepciones sobre el componente

del suelo por medio de la definición de la Tierra y su participación en el universo.

2. La segunda etapa empieza con la aparición de los pasos del método científico y su aplicación a las disciplinas de estudio, por ejemplo, la química y la física. En este periodo se fundamentan los pilares de las ciencias edafológicas, simultáneamente con los cimientos de otras ciencias como la física, la química, la geología, la biología y la geografía. La etapa culmina con las publicaciones de Dokucháyev, quien sintetiza y fundamenta los enfoques de la edafología existentes hasta entonces.

También, otros científicos como el geólogo suizo Henri Saussure, el químico inglés Humphry Davy y el químico alemán Justus von Liebig, considerado uno de los pioneros en el estudio de la química orgánica, inician con los trabajos de la nutrición y crecimiento de las plantas en relación con las necesidades de elementos. Liebig (1803-1873) hace aportes relevantes en el uso de fertilizantes, por medio de la **teoría del mínimo**, propuesta por el botánico alemán Christian Sprengel (1787-1859). y difundida por Liebig.

Esta teoría se ejemplifica con un barril, donde la productividad, representada por la cantidad de agua, se ve afectada por la barra me-



ATENCIÓN

La teoría del mínimo plantea que el nutriente menos disponible es el que limita la producción y, por eso, la adición del nutriente más abundante no hace que aumenten el rendimiento, el desarrollo ni la productividad.



- nos alta, la cual simboliza el elemento que se encuentra en menor cantidad (FIG. 1).
3. En el tercer periodo, aparecen instrumentos de trabajo y, con estos, se transforman o sintetizan mejor las ideas antes propuestas. Por medio de la física, la revolución de los ensayos puede modificar parcialmente los postulados.

Al final de la historia, Dokucháyev fundamenta, junto sus discípulos, los postulados de la edafología y es el primero en clasificar suelos; para 1882, había hecho varias divisiones de este tipo.

Este geólogo muere sin dejar nada escrito, pero sus discípulos, en especial el geólogo ruso Konstantine Glinka (1867-1927), comunicaron los trabajos de su mentor en el primer tratado de edafología.

Otros de sus seguidores traducen esos escritos a varios idiomas: el geólogo y geógrafo estadounidense Curtis Marbut (1863-1935) publica en inglés, el químico alemán Emilie Ramman lo hace en su idioma natal y Glinka en ruso, lo cual ayuda a la difusión de los conocimientos y a la generación de diferentes escuelas de la rama en el mundo (BARRIOS, OB. CIT.). En los Estados Unidos de Norteamérica, Marbut da a conocer la ciencia en el Primer Congreso Internacional de la Sociedad de las Ciencias del Suelo, celebrado en 1927.

El origen de la ciencia, oficialmente, se formaliza a partir de la IV Conferencia Internacional sobre Pedología, llevada a cabo en Roma en 1924. Ahí se plantea la necesidad de crear consenso en diferentes temas del recurso suelo; con base en esa idea, se origina la Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo (International Society of Soil Science, ISSS), cuyos primeros documentos, realizados en Europa, se fundamentaron en métodos de análisis y de clasificación de suelos (PEÑA CORDERO, 2017).

Para visualizar mejor la historia de la edafología, es necesario revisar la cronología que se presenta en la página siguiente (FIG. 2).

De manera integral, podemos decir que la edafología se relaciona con otras ciencias de forma dependiente. Matemática, biología, ecología, física, química, administración, derecho, geología, cartografía, fertilidad, nutrición vegetal y ciencias de la salud son parte de las disciplinas científicas que se articulan con la edafología. Esta ciencia se aplica en áreas de los campos de la agricultura, el forestal y el de las ingenierías, entre otros (FIG. 3, V. P. SIG.).

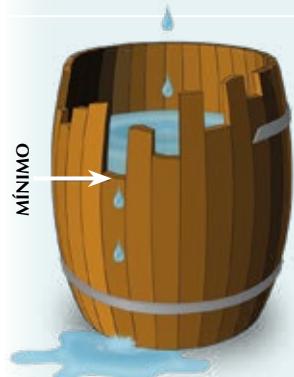


FIGURA 1. ILUSTRACIÓN DE LA TEORÍA DEL MÍNIMO.

Esta teoría se ilustra con el símil de un barril lleno de agua y la particularidad de estar construido con duelas (tablas convexas) de diferentes alturas. Cuando una de las tablas tiene una altura más baja que el resto, puede resultar en pérdidas del líquido. Esto ejemplifica lo que sucede en el suelo; ya que a falta o escasez de un solo elemento en la solución líquida del suelo puede resultar en que la planta no se desarrolle adecuadamente.

FUENTE: «Ley Mínima» según Justus von Liebig (1803-1873). Archivo: Minimum-Tonne.svg. Ilustración de DooFi (2009). Imagen de dominio público. Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons.

ATENCIÓN

El año 2015 fue dedicado a los suelos por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO por sus siglas en inglés) y por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Se destacan las siguientes lecciones:

- El valor de los suelos desde la perspectiva ecosistémica y la de alimentación humana.
- Lo trascendental del combate y de la adaptación al cambio climático.



EN LA RED...

RESEÑA HISTÓRICA

Observe el video «Análisis de Suelo: Reseña histórica I», producido por Audiovisuales UNED, para la Cátedra de Gestión Sostenible de Suelos (GESS) de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales (ECEN), en donde se hace una descripción del nacimiento de la ciencia del suelo en el mundo y de su origen en Costa Rica y su evolución como ciencia.

Accédalo en la siguiente dirección <[https://www.youtube.com/watch?v=w7gtNUijYFk&list=PLeIX_dGDBCcryE3Vt2Cbh123XaNUXRH-q&index=5](https://www.youtube.com/watch?v=w7gtNUijYFk&list=PLeIX_dGDBCcryE3Vt2Cbh123XaNUXRH-q&indext=5)> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.

**HIPÓCRATES**
(400 A.E.C.)

DEFINE AL SUELO COMO TIERRA Y PARTE DE LOS ELEMENTOS DEL UNIVERSO

EMPÉDOCLES
(483-430 A.E.C.)

CONSIDERA AL SUELO COMO LA MATERIA BÁSICA DEL UNIVERSO

TEOFRASTO
(370-287 A.E.C.)

DIFERENCIA ENTRE LOS TÉRMINOS SUELO Y TIERRA

LIEBIG
(1803-1873)

TRABAJA EN TEMAS DE LOS NUTRIENTES DE LAS PLANTAS, CON BASE EN LA TEORÍA DEL MÍNIMO DE SPRENGEL

DOKUCHÁYEV
(1845-1903)

DEFINE EL SUELO CON RELACIÓN A LAS PLANTAS. SUELO FORMADO BAJO CINCO FACTORES

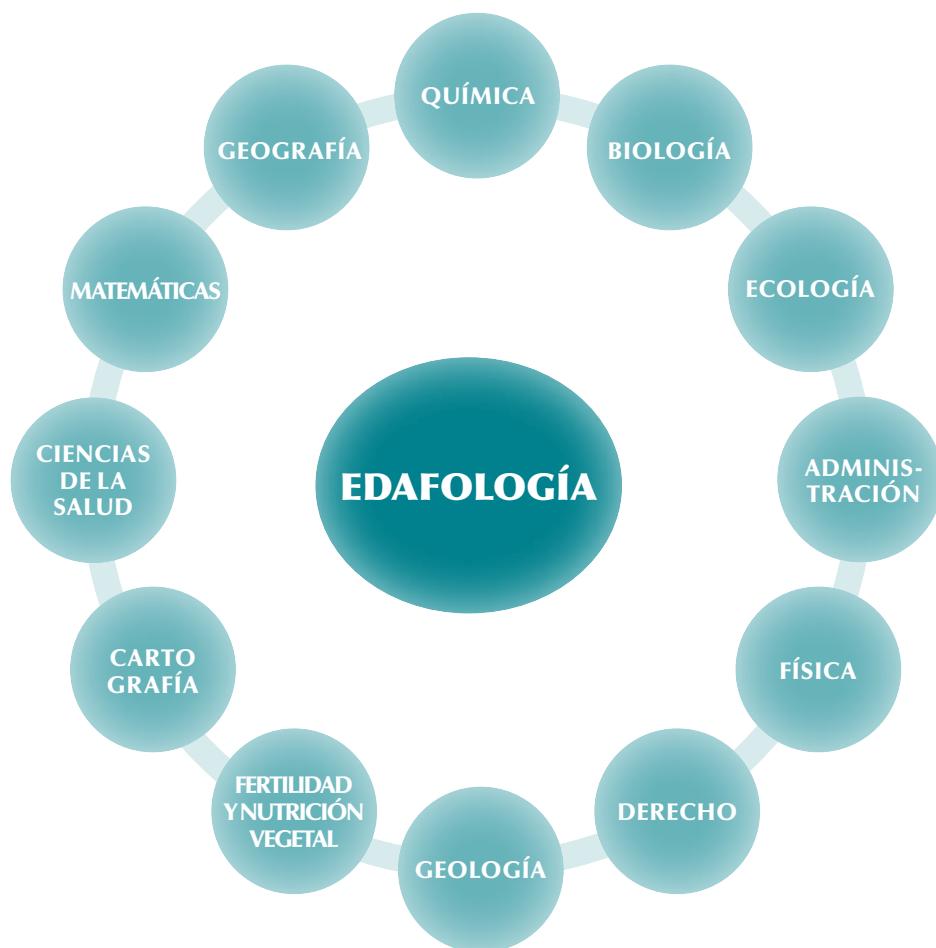


FIGURA 3. REPRESENTACIÓN DE OTRAS CIENCIAS QUE SE RELACIONAN CON LA EDAFOLOGÍA. En el estudio del suelo como ciencia se involucran otras ramas de diferentes disciplinas para el entendimiento de sus interacciones con la física, el derecho, la geología, la fertilidad y nutrición vegetal, la cartografía, las ciencias de la salud, las matemáticas, la química, la biología, la ecología, la administración y la geografía.

FUENTE: basada en *Suelos Tropicales*, de Ana Cecilia Arias Jiménez (2001).



FIGURA 2. CRONOLOGÍA DEL ORIGEN DE LA EDAFOLOGÍA COMO CIENCIA. La línea del tiempo muestra que, desde el 400 A.E.C., se comienzan a sentar las bases de la edafología como ciencia, pasando por filósofos como Hipócrates, Empédocles y Teofrásto; luego, los científicos Justus von Liebig, Vasilí Dokucháyev sentaron los fundamentos que se conocen y que fueron transmitidas al mundo entero por los discípulos de Dokucháyev, Konstantín Glinka y Curtis F. Marbut.

FUENTE: Retrato de Hipócrates (2008), Portrait of Empedocles (1655), Teofrásto. Ancient greek philosopher and botanist (2009), Justus von Liebig (1866), Vasilí Dokucháyev (1888), Glinka (1927), Curtis Fletcher Marbut (2017), International Congress of Soil Science 1927 (2016). Reproducidas con fines educativos, bajo licencia Creative Commons y Wikimedia Commons, según corresponda. Investigación y propuesta Paola Brenes Rojas.

II. *Introducción a la edafología*

En este apartado, se explican algunos de los conceptos necesarios en el estudio de la edafología, los cuáles serán los principios para el entendimiento de las interacciones que suceden en el suelo y de cómo los interesados en ampliar su conocimiento sobre este recurso pueden iniciar un proceso de investigación detallada de un suelo.

De seguido, se presentan los conceptos como fundamentos para la comprensión del suelo, las funciones ecosistémicas, los factores formadores y los procesos de formación de suelos:

A. CONCEPTOS

A continuación, se describen los conceptos de pedósfera, suelo y tierra, solución del suelo y edafogénesis. Son la base del entendimiento del concepto de suelo dentro de un medio dinámico como el ecosistema con los componentes bióticos y abióticos existentes, además de los procesos evolutivos que en él suceden.

1. PEDÓSFERA

El ecosistema natural, los agroecosistemas y la naturaleza en general presentan diversidad desde todo punto de vista. La diversidad, asimismo, es heterogénea en sus dimensiones, debido al nú-



mero de relaciones que circundan en el medio. Desde una posición edafológica, se puede afirmar que la litosfera no está exenta, ya que allí también se desarrollan procesos y transformaciones apreciables, los cuales dependen, a la vez, del lugar.

La litosfera es la zona interna de la corteza terrestre; en ella se localiza lo que se llama suelo y el material parental que lo forma. Litosfera viene del griego litos, que significa piedras o rocas. Cada una de las rocas o piedras se clasifica de acuerdo con su proceso de formación y con las características químicas y físicas que la identifican.

La pedósfera es la capa más externa de la Tierra; está compuesta por suelo en forma de roca y se encuentra sujeta a los procesos de formación del suelo. La roca se define como el material primario o material parental que da origen a la formación de los suelos. El término pedósfera proviene del griego pedon, que significa suelo y *sfaíra*, esfera.

El pedón se define como la unidad más pequeña del suelo de forma tridimensional [no debe tener un área menor de un metro cuadrado (1 m^2) que representa, homogéneamente, las características del paisaje en estudio. El polipedón es la unión de varios pedones. Entonces, el suelo en análisis es el polipedón y el conjunto de los polipedones forman el paisaje que, en la lengua inglesa, se conoce como *soilscape* (paisaje del suelo). El paisaje, en este contexto, solo se compone de la parte pedológica (Fig. 4).

Este tipo de divisiones fueron implementadas para estudiar más profundamente las clasificaciones y el mapeo de suelos. Con base en ellas, los especialistas, por medio de fotografías aéreas y de observaciones puntuales de la geomorfología y del suelo, pueden determinar las divisiones.

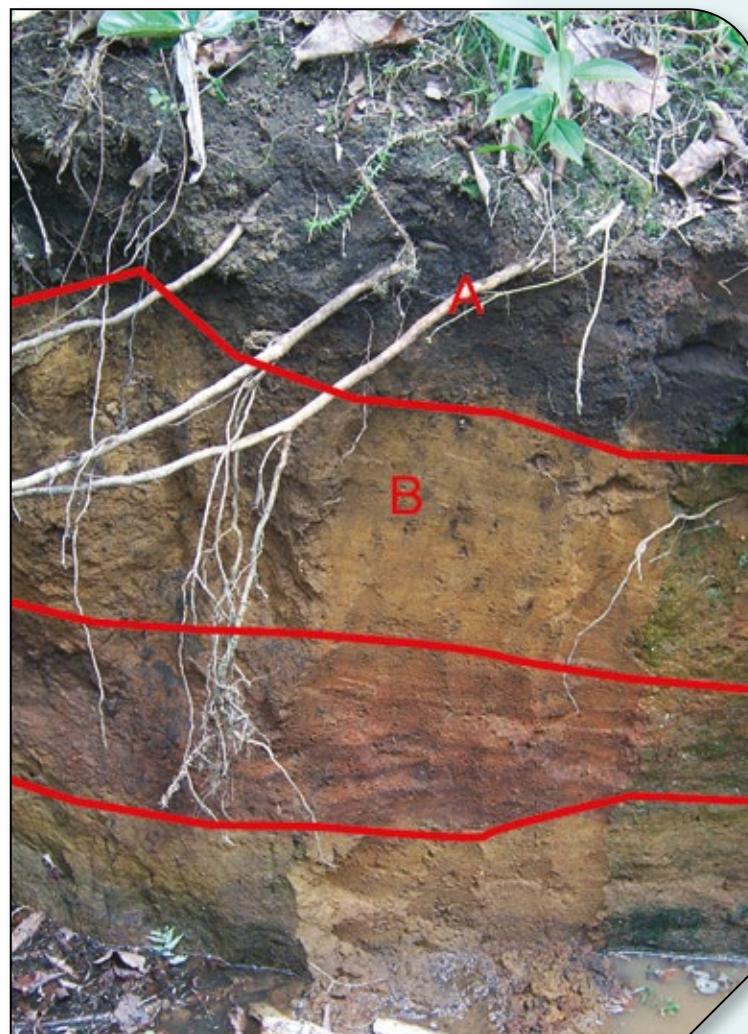
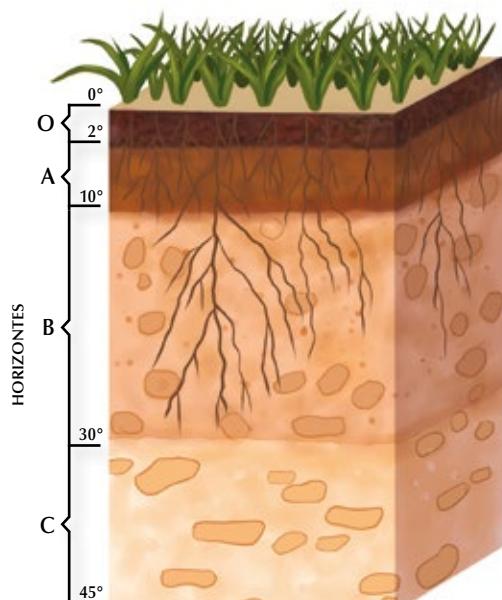
2. SUELO Y TIERRA

Como se estudió en la sección anterior, el concepto de suelo ha variado a lo largo de la historia. El vocablo se deriva del latín *solum*, con el cual se denominaba a la superficie sólida de la Tierra. En la Grecia clásica, Empédocles considera el suelo como la materia básica del universo, que se componía además de fuego, agua y aire (CROSARA, 2017). Más adelante, Teofrasto diferencia el término



FIGURA 4. PEDÓN Y POLIPEDÓN EN UN SUELO. Para el muestreo de suelos, se debe definir un pedón con el propósito de realizar un estudio de los perfiles del suelo. El conjunto de pedones se conoce como polipedones y estos son los que componen el paisaje. El solum es la parte del suelo que involucra los horizontes A, E, B, con excepción del C; sin embargo, el perfil del suelo sí incluye este horizonte en particular y en este caso no se presenta un horizonte E.

FUENTE: *Manejo y conservación de suelos tropicales*, de Wagner Peña Cordero, Roger Muñoz Hernández y Carlomagno Salazar Calvo (2017). Reproducida con fines educativos, bajo el permiso expreso de los autores.



suelo del concepto tierra, ya que usualmente eran sinónimos, y divide el suelo en superficial, subsuperficial, sustrato y por debajo. La connotación «por debajo» se refería a la zona del dominio del reino de la oscuridad.

Posterior a los estudios de varios científicos, como Berzellius, Sprengel y Dokucháyev, se logra trabajar en la definición de suelo, la cual, básicamente, integra las numerosas relaciones e interrelaciones entre el material parental o rocas con el suelo, la flora, la fauna y el ser humano.

Para Dokucháyev el suelo es un cuerpo natural independiente, con morfología propia, producto de la alteración de los factores formadores del suelo sobre el material de partida o material madre.



ATENCIÓN

En el presente libro, se utilizan como sinónimos los siguientes términos: rocas no alteradas, roca pura, roca madre, litología, material litológico, material parental, material de partida, material primario y material madre.



CONCEPTOS

horizontes del suelo.

Capas o estratos que se desarrollan en el suelo y presentan diferentes características químicas y físicas.

sóluto. Es una disolución, el sóluto es la sustancia que se disuelve. En las ciencias del suelo se realizan diversos estudios para conocer el movimiento de los sólutos en el suelo, los cuales se analizarán con el movimiento de la fase líquida por medio del perfil edáfico. Así mismo, se estudia la absorción de los sólutos y agua por parte de la planta.

En 1967, Jean Boulaine y Georges Aubert proponen una definición bastante completa en la que expresan que el suelo es «el producto de la alteración, de la reestructuración y de la organización de las capas superiores de la corteza terrestre, bajo la acción de la vida, de la atmósfera y de los intercambios de energía que en ella (la corteza) se manifiestan» (BARRIOS, 1985, p. 2).

Si bien el concepto es difícil de acuñar, en la actualidad el vocablo suelo refiere al medio natural para el crecimiento de las plantas. También se ha descrito como un cuerpo natural que consiste en capas (**horizontes del suelo**) compuestas de materiales, de minerales meteorizados, de materia orgánica, de aire y de agua (FAO, 2015).

Por otro lado, el término **tierra** se considera el área de la superficie terrestre que se puede observar en el paisaje y que varía según el clima, los materiales del suelo, las formas del terreno, la superficie hidrológica, las capas sedimentarias y las aguas subterráneas; además, contempla la flora, la fauna y las actividades humanas, las cuales involucran estructuras de conservación, accesibilidad a caminos y construcciones, entre otros factores (PEÑA CORDERO, 2017). Obsérvese el Cuadro 2, para una mejor comprensión de ambos conceptos y sus diferencias.

CUADRO 2
COMPARACIÓN DE LOS CONCEPTOS
DE SUELO Y DE TIERRA

SUELO	TIERRA
Medio natural para el crecimiento de las plantas. Es producto de la edafogénesis (proceso de formación de suelo a partir de una roca no alterada) del material parental y otros factores; se organiza por capas u horizontes.	Área de superficie terrestre que se puede observar. Toma en cuenta el clima, los materiales del suelo, las formas del terreno, la superficie hidrológica, las capas sedimentarias y las aguas subterráneas; además, considera la flora, la fauna y las actividades humanas.

FUENTE: investigación y propuesta de Paola Brenes Rojas a partir de *Fundamentos de edafología*, de Jorge Núñez Solís (1981) y *Edafología del trópico*, de Wagner Peña Cordero (2017).

El suelo se compone de tres fases, las cuales se describen a continuación:

1. **Sólida.** Comprende una parte orgánica y otra inorgánica. La primera se compone de la materia orgánica proveniente del material vegetal y el animal en descomposición y la segunda, de minerales.
2. **Líquida o solución del suelo.** Corresponde al agua donde se encuentran disueltos las sales minerales y los coloides del suelo, como arcillas y humus.
3. **Gaseosa.** Consiste en el aire que ocupa los poros del suelo; en este aire se hallan disueltos los mismos componentes del aire atmosférico, pero en menor proporción (O_2 , N_2 , H_2O , CO_2 , CH_4 , entre otros).



3. SOLUCIÓN DEL SUELO

La fase líquida del suelo es una solución cuyos solutos son compuestos valiosos para las plantas. En esta solución se disuelven los macronutrientes y los micronutrientes esenciales para la biota (organismos que ocupan un área dada) edáfica. Desde la perspectiva química, la fase líquida es una solución electrolítica, es decir, cargada con cationes y aniones, con sustancias orgánicas hidrosolubles que se encuentran en un estado de equilibrio con los componentes sólidos y gaseosos del medio (SCHWAB, 2000).

4. EDAFOGÉNESIS

El proceso de formación de suelo a partir de una roca no alterada se denomina edafogénesis. El suelo es la interfaz entre la geósfera, la hidrósfera, la atmósfera y la biosfera, como se ilustra en la Figura 5.

La **edafogénesis**, además de la formación del suelo, trata de su evolución; por lo tanto, comprende la alteración del material parental, la descomposición (transformación) de la capa orgánica y la elaboración del humus, al igual que la intervención de factores como el clima, el relieve, lo biológico, el tiempo y el material parental.

El término en estudio se encuentra ligado a la **edafización**, la cual comprende procesos genéticos, bioquímicos o de metabolismo que se producen desde la superficie terrestre y disminuyen su acción, conforme se profundiza en el suelo hasta llegar al material geológico. Como los procesos ocurren de forma variable las capas que se forman en el suelo son heterogéneas (DENYER Y KUSSMAUL, 2000).

B. FUNCIONES ECOSISTÉMICAS DEL SUELO

De acuerdo con Peña Cordero (2017) el suelo despliega las siguientes cuatro funciones o capacidades básicas:

- filtrar los materiales orgánicos,
- degradar los materiales orgánicos,
- producir alimentos y
- mantener un equilibrio ambiental



CONCEPTO

edafogénesis. Proceso de formación y evolución de los suelos por la intervención de factores formadores del suelo como el clima, el relieve, lo biológico, el tiempo y el material parental.

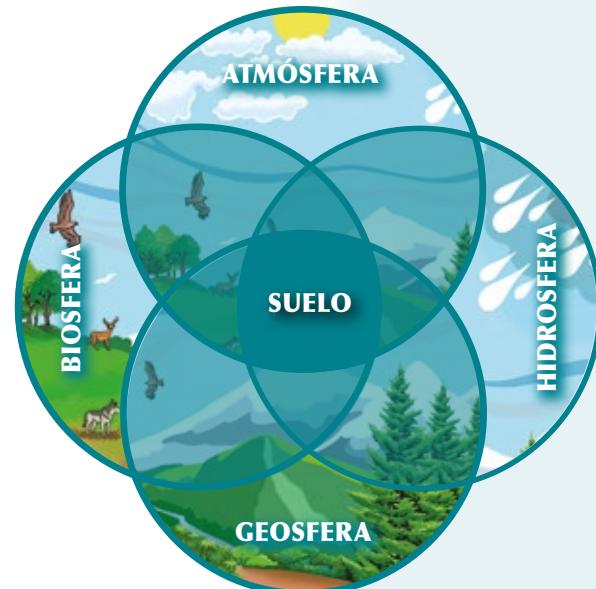


FIGURA 5. INTEGRACIÓN DE LOS SISTEMAS EN EL SUELO. El suelo es parte de una interfaz donde se integra la geósfera, la hidrósfera, la atmósfera y la biosfera.

FUENTE: adaptación de «Dinámica del suelo», en Revista Creces (2004). Reproducida con fines educativos.



Además de estas capacidades, proporciona múltiples servicios ecosistémicos vitales, algunos de los cuales se puntualizan a continuación:

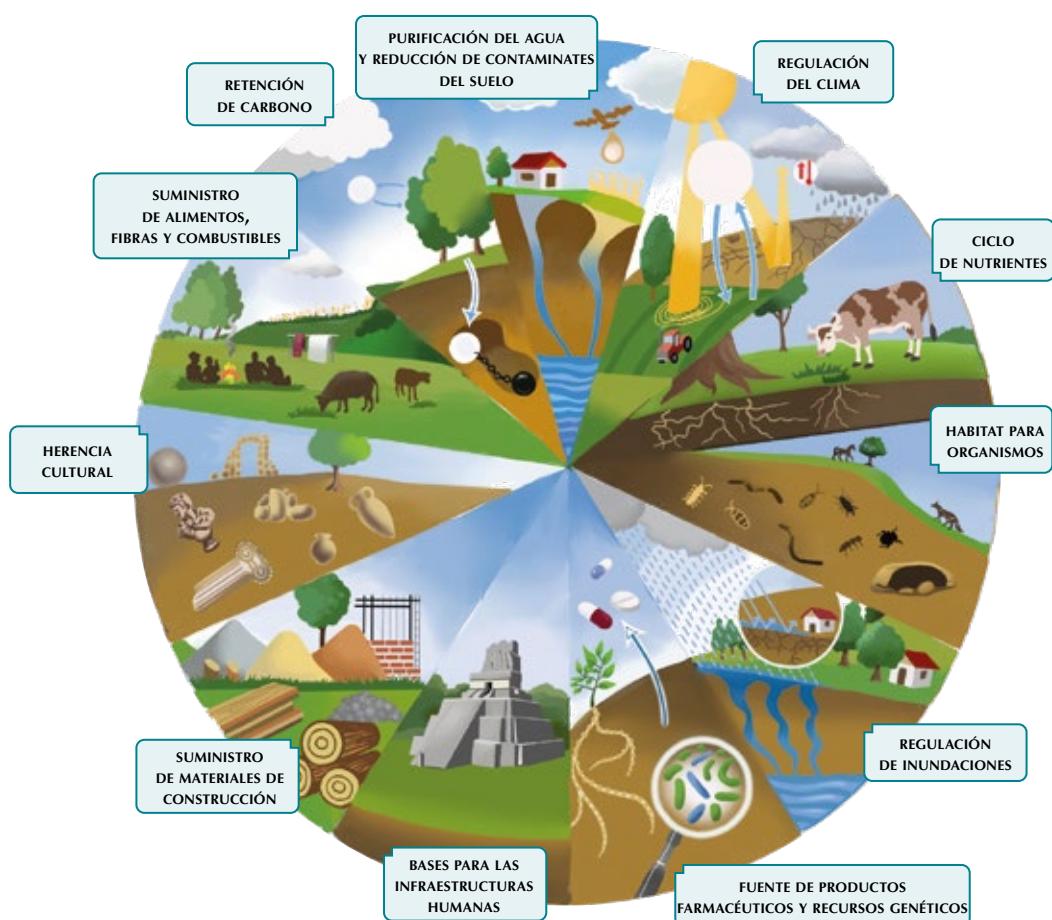
- **Balance global de carbono.** La cual está relacionada con la fijación de carbono al suelo y su relación con los gases de efecto invernadero y el calentamiento global.
- **Purificación del agua.** Proceso por el cual el agua se ve purificada a través de los horizontes del suelo.
- **Regulación del clima.** El suelo interacciona en la regulación del clima al mantener el intercambio de energía y los diferentes estados de la materia entre la biosfera, la atmósfera, la hidrosfera y la litosfera. Además, ayudan a adaptarse al cambio climático por su función en el ciclo del carbono, en el cual los suelos se catalogan como uno de los grandes sumideros de carbono del planeta.
- **Ciclo de nutrientes.** Contribuye al reciclaje de nutrientes en el suelo para que sean aprovechados por las plantas y la cadena trófica en general.
- **Herencia cultural.** Coadyuva en el albergue de hallazgos culturales importantes que influyen sobre el contexto social.
- **Cultivo de alimentos.** Aporta a la seguridad alimentaria de los países y las economías del mundo.

Para una mayor comprensión, las funciones citadas se representan en la Figura 6 y se pueden revisar, más en detalle, en el Capítulo 4.

c. FACTORES FORMADORES DEL SUELO

El suelo es producto de la interacción de cinco elementos conocidos como «los cinco factores formadores del suelo». Basados en los estipulados de Dokucháyev (BUOL, HOLE, Y McCRAKEN, 1989), estos factores (según su intensidad y su variación) determinan el tipo de suelo en un lugar determinado. Estos agentes son: clima, relieve, roca madre, organismos y tiempo.

Recientemente, se piensa agregar un sexto factor que tome en cuenta la influencia del ser humano sobre el suelo, el cual se aprecia en ambientes más disturbados; por ejemplo, en los sistemas agrícolas o áreas urbanas (BLANCO Y SENCLADES, 2001). En zonas naturales, el trastorno a causa de los individuos ha sido mínimo por lo que este factor no influye (Fig. 7).



FUENTE: adaptación de la infografía «Funciones del suelo», de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO (2015). Reproducida con fines educativos.

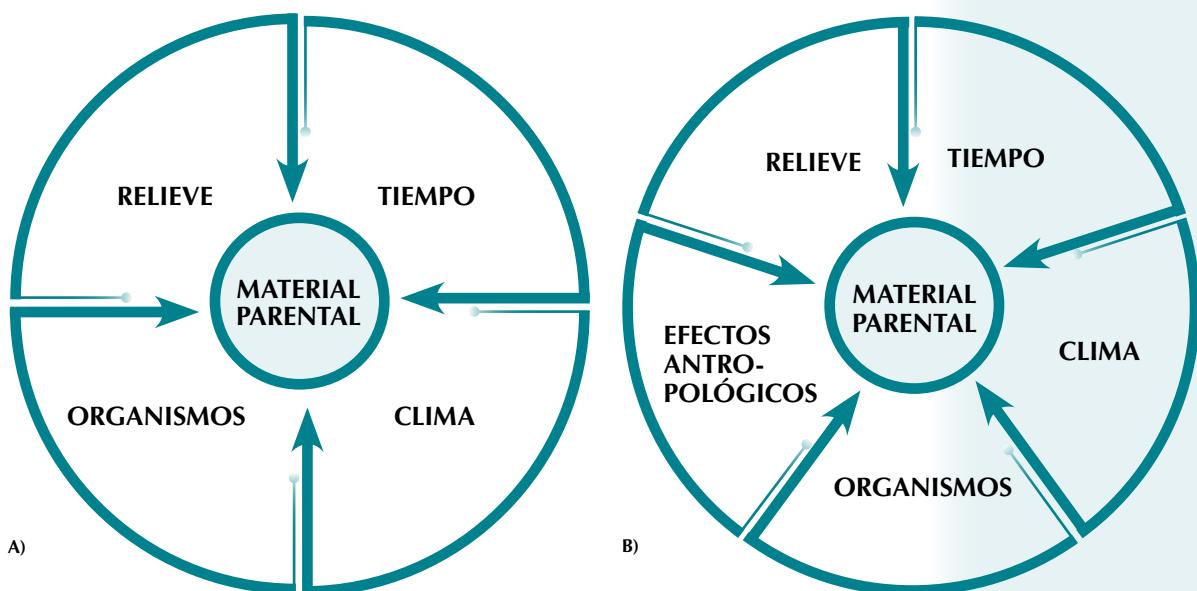


FIGURA 7. FACTORES FORMADORES DEL SUELO SEGÚN EL AMBIENTE. A) No disturbados por el ser humano: el relieve, el tiempo, el clima y los organismos, los cuales inciden sobre la roca madre o el material parental. B) Disturbados por el ser humano: los factores formadores aumentan a seis, dado el efecto antropológico ocasionado por el ser humano.

FUENTE: investigación y propuesta de Paola Brenes Rojas, en 2019.



CONCEPTOS

meteorización. Conjunto de procesos externos que provocan la alteración y la disagregación de las rocas en contacto con la atmósfera.

humificación. Proceso de transformación de la materia orgánica del suelo en humus.

humus. Sustancia de naturaleza coloidal producto de la degradación de materiales orgánicos.

mineralización. Concepto teórico que incluye la transformación completa de un compuesto orgánico en compuestos inorgánicos.

A continuación, se describen los cinco factores formadores del suelo.

1. CLIMA

El clima se estima el principal factor de las disturbaciones y la distribución de los suelos. Es una de las circunstancias más activas en el desarrollo de los suelos pues condiciona la velocidad de un sinfín de procesos. Influye en la **meteorización** de las rocas, en la actividad biológica y en la **humificación y mineralización** de la materia orgánica, entre otras.

Dentro del **factor clima**, median la precipitación, la temperatura, la radiación solar, la humedad, el balance hídrico y el viento. Y se puede entender de la siguiente manera:

- **A mayor humedad y a mayor temperatura.** Los procesos de meteorización y la actividad se agilizan.
- **Cambios en los períodos de lluvia.** Se favorece la formación de suelos, ya que, en zonas tropicales, se beneficia la translocación de materiales por lavado o lixiviación.
- **A mayor meteorización química.** Se producen suelos más profundos. El caso contrario sucede si la meteorización es muy escasa, como en zonas con climas fríos y secos
- **A mayor temperatura y a mayor precipitación.** Aumenta la velocidad de los procesos de meteorización y, por ende, variará el tipo y la cantidad de arcilla en los suelos. La Figura 8 presenta gráficamente que: a mayor precipitación, mayor contenido de arcillas porque los minerales se van oxidando y liberan compuestos de hierro, de manganeso y de aluminio en suelos mal drenados. Por ejemplo, las montmorillonitas son estables cuando los medios son alcalinos y, al aumentar la precipitación, el medio se torna ácido, pierden su estabilidad y liberan compuestos de aluminio al medio.

La humedad altera significativamente el suelo: a mayor humedad, mayor contenido de materia orgánica y nitrógeno, así como mayor cantidad de cuarzo y menor capacidad de intercambio catiónico, en razón de que hay presencia de caolinitas (arcillas estables que pueden agregarse en forma de escama; no son elásticas).

El viento afecta la formación de los suelos, según su intensidad, frecuencia y duración porque influye en el movimiento de partículas,



en la humedad atmosférica y en el movimiento de material, como cenizas volcánicas o arenas en zonas de playas, entre otros factores. La radiación solar también participa en este proceso, según su grado de reflexión en el relieve incide en la temperatura ambiental y del suelo, así como en los procesos de meteorización e intercambio gaseoso.

2. RELIEVE

El relieve es considerado un macrofactor: la geomorfología del lugar influye en el suelo directamente pues, como se precisó en párrafos anteriores, este es producto del paisaje.

La posición fisiográfica, la pendiente, la forma de ladera, el grado de exposición de la ladera, la longitud, la altitud y el microrelieve son microfactores que también intervienen en el tipo de suelo.

En lugares como plataformas estructurales, los factores formadores inciden más lentamente; por el contrario, en superficies menos estables, como las escarpadas, los fondos de valles o las zonas de inundación, los suelos se encuentran en constante cambio y el proceso de formación es más rápido.

Otro aspecto que condiciona el relieve es la posición de los suelos; por ejemplo, según la posición o la inclinación de la pendiente, así será la secuela de la incidencia solar. La inclinación y la longitud de la pendiente también repercuten en el gradiente hidráulico, la velocidad de la escorrentía y, por lo tanto, en la tasa de erosión.

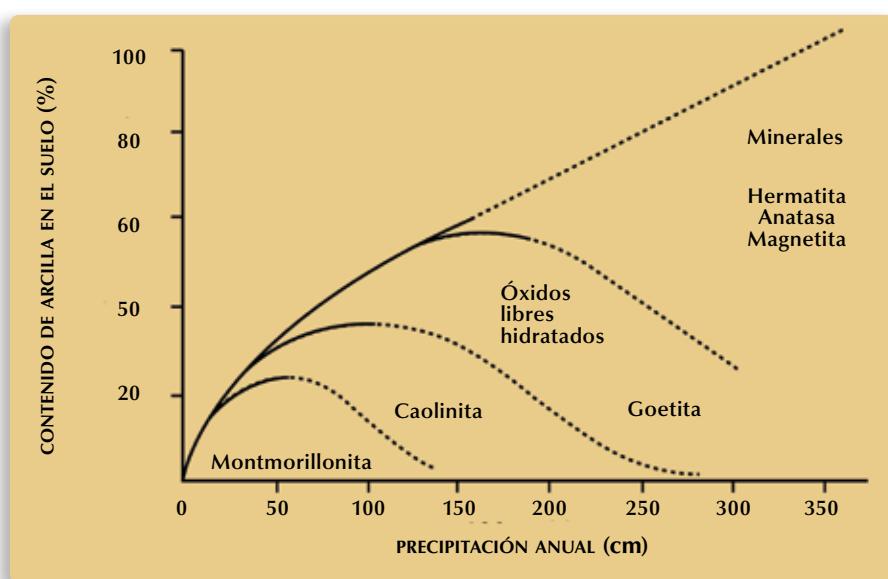


FIGURA 8. TIPOS DE ARCILLA SEGÚN PRECIPITACIÓN DEL SUELO EN HAWAII. El contenido de arcilla en el suelo es determinado por la precipitación anual de las regiones; a mayor precipitación, sucede un efecto más significativo sobre el material parental y transforma los materiales más arcillosos por efecto de la acidez del medio.

FUENTE: basado en «The genesis and morphology of the alumina-rich laterite calys», de G. D. Sherman (1952) citado en *El origen de los suelos*, de Alfredo Alvarado H. (1985). Reproducida con fines educativos.



CONCEPTO

perfil del suelo. Estructura vertical del suelo, conformada por los horizontes del suelo. El perfil de suelo está compuesto por todas las capas de formación de un suelo, desde la más superficial hasta llegar al material parental. El perfil de suelo puede estudiarse a través de fosas de investigación (calicatas) con el fin de exponer a la vista las diferentes capas del suelo. Las capas del suelo se pueden apreciar en paredones a lo largo de carreteras recién construidas, donde a simple vista se ven diferencias de capas de suelo por color o espesor.

El relieve determina la existencia de microclimas e incide en otras variables físicas y químicas del suelo, como profundidad, estructura y contenidos de materia orgánica de los suelos.

Anteriormente, se afirmó que la geomorfología es relevante con respecto al suelo. Jorge Núñez Solís, uno de los pioneros en estudiar los suelos de Costa Rica, declara en su libro *Fundamentos de edafología*, publicado en 1946 y reeditado por la editorial de la UNED en 1981, que el suelo debe contemplarse también como el resultado del **perfil** en conjunto con el paisaje porque muchas de las características de los suelos o de las diferencias entre ellos son derivación de su relación con el paisaje y con el perfil. En este los factores formadores del suelo actúan sobre el material parental (FIG. 9).

La profundidad del suelo, el espesor de los horizontes, la cantidad de materia orgánica, la humedad relativa, el grado de diferenciación de los horizontes y los contenidos de sales solubles son parte de las propiedades que se relacionan con la caracterización de los distintos perfiles y paisajes. Ejemplos de paisajes particulares son los suelos costeros o de manglares, lo mismo que los desiertos y las selvas tropicales.

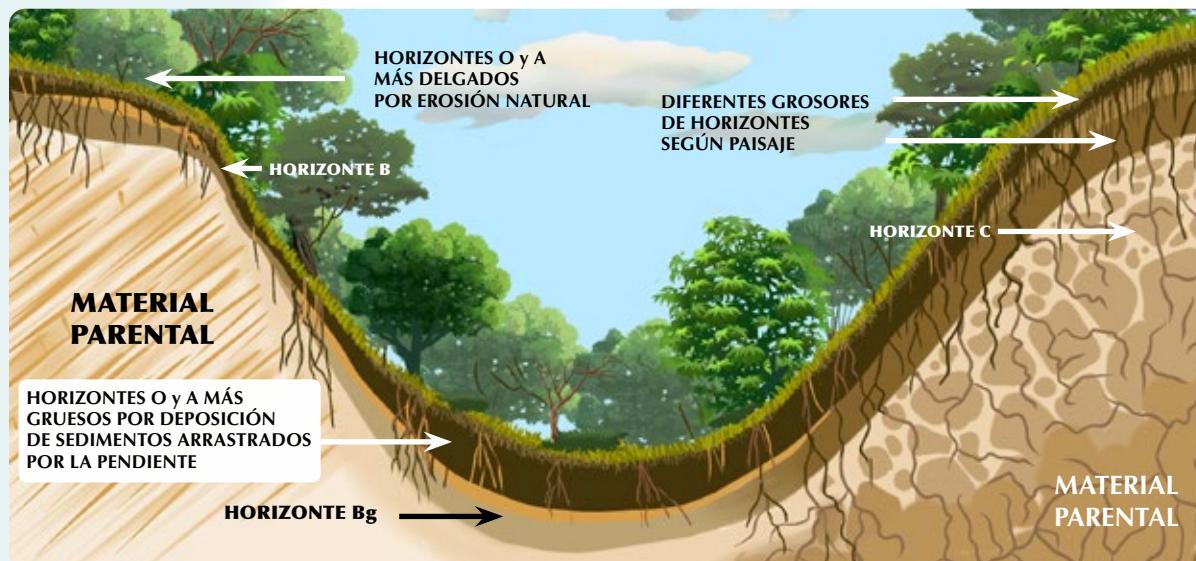


FIGURA 9. CAMBIOS EN EL PAISAJE SEGÚN EL PERFILE DEL SUELO. Como se puede observar en la figura, en el proceso de edafogénesis el paisaje influye en la formación del suelo. Este interviene sobre el material parental y le confiere propiedades físicas, químicas y biológicas únicas. En la figura se aprecia como el paisaje puede influir sobre la profundidad de los horizontes, especialmente por efecto del movimiento del suelo gracias a la pendiente.

FUENTE: investigación y propuesta de Paola Brenes Rojas, en 2019.



Los suelos tropicales son heterogéneos por la gran variedad de climas, de materiales parentales, de geomorfología y de edad que existe en las zonas. A manera de ejemplo, la mayoría de los países centroamericanos combina multiplicidad de factores, como climas intensos, relieves escarpados, influencias volcánicas de peso y diferentes tipos de vegetación; todos ellos contribuyen a formar suelos muy complejos; de ahí que la heterogeneidad sea muy amplia.

Costa Rica, en sus 51 100 km² de superficie, tiene influencia marítima del mar Caribe y del océano del Pacífico; también de dos sistemas montañosos con amplio vulcanismo (112 volcanes, 5 de estos activos). Posee 12 **zonas de vida** según el sistema de zonas de vida Holdridge. Todo ello, sumado a la gran variabilidad de material parental, a la alta exposición a la intemperie de los materiales y a la heterogeneidad de la orografía y de las condiciones climáticas, ha provocado que exista diversidad en los suelos, tanto en sus propiedades físicas y químicas como biológicas (PEÑA CORDERO, 2017).

3. ROCA MADRE

Este elemento, también conocido como el material parental o litológico, es la roca pura, consolidada o no consolidada, que sirve como medio o sustrato en el cual ejercen acción los otros factores formadores del suelo.

De acuerdo con el grado de influencia de los factores mencionados en un material determinado, este formará suelos con distintas características. Igual sucede en el caso opuesto: en suelos con material diferente en los cuales los factores efectúan presión similar, constante y activa pueden desarrollar suelos parecidos (BADÍA, MARTÍ, Y POCHE, 2011).

Normalmente, el material parental afecta propiedades físicas de los suelos, como textura, color, pedregosidad, infiltración y densidad. Igualmente, la parte química, como pH, macroelementos y microelementos, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y capacidad de intercambio aniónico (CIA).

Las características de la roca madre que más influyen en la formación del suelo son: la composición mineralógica, la permeabilidad y la granulometría. Por ejemplo, las rocas sedimentarias



CONCEPTO

zona de vida (SEGÚN LESLIE HOLDRIDGE). Sistema de clasificación de regiones que contempla regiones latitudinales, en cada una se establecen las zonas de vida, las cuales incluyen asociaciones de áreas terrestres según su comportamiento global bioclimático. El sistema de clasificación fue desarrollado, publicado y actualizado por el científico Leslie Holdridge en 1947 y 1967, respectivamente.



evolucionan con más facilidad que las constituidas por minerales más estables como el cuarzo. Las caolinitas son producto de rocas ígneas que producen suelos claros, mientras que los suelos con más contenido de hidróxidos y óxidos tienden a generar suelos rojos. Los suelos originados a partir de cenizas volcánicas tienen densidades más bajas y altas capacidades de retener aniones.

La permeabilidad tiene relación con la circulación del agua y el aire dentro del material; por consiguiente, se enlaza con la fragmentación o la alteración.

Y la granulometría –o clasificación granulométrica– se vincula con la porosidad y con cuán rápido sucederán los procesos de edafización. En ese caso, las arenas tardan menos tiempo en formar suelo que las arcillas o los limos.

4. TIEMPO

El grado de influencia en el suelo de los factores que se mencionaron depende del tiempo y, de acuerdo con este, el suelo presenta unas características morfológicas determinadas, como se aprecia en la Figura 10. La consecuencia del paso del tiempo en los suelos no mantiene una regla porque los materiales pueden presentar resistencia a meteorizarse como el caso de los yesos. Los yesos son los menos estables en comparación con los óxidos de hierro (ALVARADO, 1985).

En los suelos jóvenes o inmaduros, que inician sus procesos de edafización, los horizontes son poco desarrollados. Por el contrario, los suelos viejos tienen mayor cantidad de horizontes y están más evolucionados; también, son los suelos más profundos y donde se observa diferenciación entre las capas.

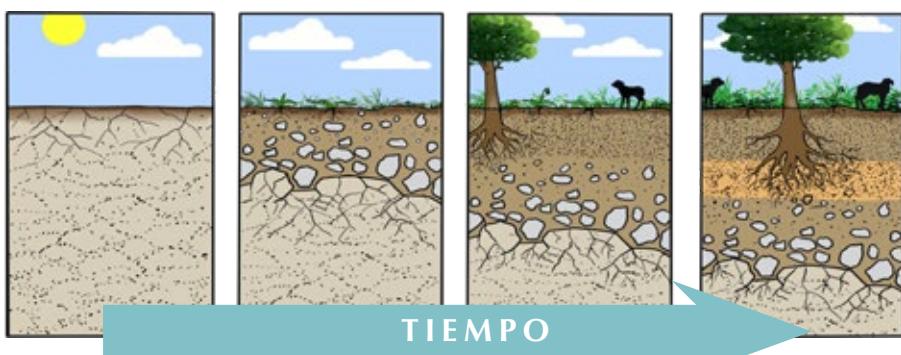


FIGURA 10. EFECTO DEL TIEMPO EN LA FORMACIÓN DE LOS SUELOS. El tiempo, como factor formador de suelos, incide en la formación de nuevos horizontes de suelo.

FUENTE: basado en «Distintas etapas del desarrollo del suelo» (2010). Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons.



5. ORGANISMOS

En los procesos de formación de suelos participan múltiples organismos vivos; entre estos se hallan los animales, los hongos, las bacterias y las algas, que se insertan en múltiples ciclos de los principales elementos para el desarrollo de las plantas.

La vegetación también cumple una función sustancial, ya que aporta material orgánico básico y ayuda a acelerar la meteorización y a incrementar la porosidad y el movimiento del agua y el aire. La vegetación minimiza el golpe de agua sobre el suelo y, por consiguiente, los procesos de escorrentía y de erosión son menos extremos. En las zonas de Centroamérica, el material orgánico proveniente de la caída de follaje contribuye a que se encuentre una amplia variabilidad de organismos en los suelos y a que estos sean más profundos.

Las raíces de las plantas ejercen presión sobre las rocas, lo cual contribuye a su fraccionamiento; los exudados que producen dichas raíces disuelven los minerales. En zonas tropicales, la mayoría de las raíces de los árboles son poco profundas y permanecen en las primeras capas del suelo, particularmente, en especies cuyo hábitat radica en zonas rocosas, como *Plumeria rubra*, que se desarrolla en zonas de este tipo cercanas a las playas (INBio, 2011).

6. EFECTOS ANTROPOLÓGICOS

Se indicó en forma general que cuando se hace referencia a un ecosistema agrícola o a un área perturbada se debe integrar el factor ser humano como elemento formador de suelo. Porque desde la perspectiva de impacto con mecanización, uso de insumos, entre otros factores promueve o desacelera los procesos de formación.

A. PROCESOS DE FORMACIÓN DE SUELOS

Anteriormente indicamos que el suelo es producto de la interacción de cinco factores formadores del suelo; sin embargo, para la formación de los distintos horizontes del suelo, acontecen diversos procesos de formación de suelos. Estos procesos producen cambios constantemente, razón por la cual se expone que los horizontes son muy dinámicos y activos en el tiempo.



ATENCIÓN

En resumen, el suelo es producto de la interacción del clima y de los microorganismos con la roca madre en un tiempo determinado, e influye el relieve del lugar.



EN LA RED...

FACTORES FORMADORES

Con el fin de repasar acerca del efecto de los factores formadores del suelo en nuestro país, se recomienda leer el artículo «Factores formadores y distribución de suelos de la subcuenca del río Pirrís, Talamanca, Costa Rica», escrito por Miguel Chinchilla, Alfredo Alvarado y Rafael Mata, y publicado en la revista *Agronomía Costarricense* [Vol. 35, n.º 1, 33-57].

Puede acceder el documento en formato portable (pdf) en la siguiente dirección: <http://www.mag.go.cr/rev_agr/v35n01_completa.pdf> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.





CONCEPTOS

procesos de edafogénesis.

Estos procesos son una compleja secuencia de reacciones químicas y mecanismos físicos y biológicos que conducen a la diferenciación de los tipos de horizontes, caracterizados por unas propiedades, que dan lugar a la formación del suelo (ORTIZ, 2015).

meteorización física.

Consiste en los procesos físicos que suceden en el material parental; se incluyen todos los que causan la desintegración de la roca, sin cambios químicos o mineralógicos.

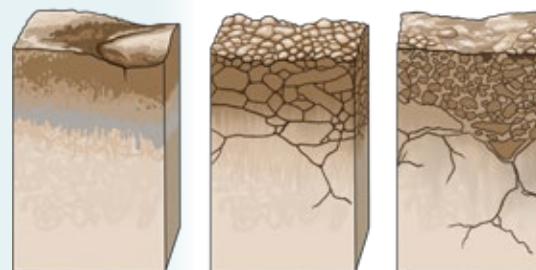


FIGURA 11. METEORIZACIÓN FÍSICA: FRAGMENTACIÓN DE LA MATERIA PARENTAL. La roca o el material parental por efecto de los factores climáticos inicia secuencias de contracción y dilatación, y el material se resquebraja; posteriormente, forma fragmentos más finos de material; así el suelo se constituye.

FUENTE: basado en «Formación del suelo», en Biología, Weebly.com. Reproducida con fines educativos.

2. ALTERACIÓN

Cuando la roca se separa en fragmentos, pero todavía mantiene el estado y la disposición de los minerales que lo conforman, se le llama **saprólito**; después, en el momento que cambia de forma completamente, se denomina suelo, este último proceso es la alteración. Esta transformación ocurre por medio de procesos de meteorización química, como las reacciones de oxidación y de reducción (conocidas como **redox**), de hidratación, de hidrólisis y de disolución; además, por alteración biológica.

Otros autores mencionan la rubefacción y melanización como procesos de alteración. El proceso de rubefacción consiste en la liberación de hierro producto de la deshidratación de los óxidos de hierro pertenecientes al material parental degradado (arcillas). Este fenómeno sucede únicamente en condiciones de pH básico y con saturación de bases altas (PINCHET, 1991). En el caso de la melanización, es un pro-



CONCEPTOS

saprólito. Estado de la roca cuando se separa en fragmentos, pero todavía mantiene el estado y la disposición de los minerales que lo conforman.**redox.** Reacciones químicas en las que ocurren cambios entre los electrones. Ese fenómeno provoca la variación en los estados de oxidación, los cuales pueden ser de reducción y oxidación o de oxidación a reducción.



ceso de afectación de color por degradación de la materia orgánica de las capas superficiales que da como resultado un suelo más oscuro; esta característica es propia de suelos molisoles (BUOL *ET AL.*, 1989).

Según Barrios (1985), para calcular el grado de alteración de un suelo, puede utilizarse el índice de alteración, el cual es la relación entre los minerales secundarios y la suma de los minerales primarios más los secundarios.

$$\text{ÍNDICE DE ALTERACIÓN} = \frac{\text{Minerales secundarios}}{\text{Minerales primarios} + \text{minerales secundarios}} \cdot 100$$

Este índice puede alcanzar un valor de hasta 100 % en un clima tropical húmedo y porcentajes bajos en zonas de suelos alpinos o desérticos.

3. TRANSLOCACIÓN

El proceso formador de suelos involucra transporte de material de un sitio a otro, a causa de diferentes factores erosivos; este movimiento se conoce como translocación.

La translocación se lleva a cabo a través del perfil y forma horizontes muy diferenciados por medio de **eluvación** o **iluvación** de otros.

Los procesos eluvación y de iluvación ocurren, por ejemplo, en las arcillas. En época de lluvia, con el agua, se suspende el material y, por gravedad, este se mueve (sube) por los macroporos; entonces, hay movimiento de arcillas a horizontes superiores. En el horizonte inferior, donde se suspendió el material, ocurrió eluvación; en el superior, el fenómeno fue de iluvación. En el caso contrario, cuando los suelos se secan, la acción de la presión osmótica y de la succión hacen que las arcillas migren (bajen) por los macroporos hacia los microporos; el fenómeno en el horizonte superior es de eluvación. Estos procesos se realizan a través del perfil de suelo y originan horizontes de eluvación y de iluvación.

El proceso de migración de arcillas se llama argiluvación y puede generar transformaciones macromorfológicas en el suelo, como cambios texturales bruscos en sus horizontes. En el ámbito micromorfológico, los efectos son acumulaciones cercanas a microporos, las cuales producen alteraciones en materiales y morfologías.



CONCEPTOS

eluvación. La remoción de materiales desde un horizonte en el cual se encuentran y su deposición en otro horizonte. Este proceso involucra movimiento y pérdida de material en el horizonte de donde parten las sustancias.

iluvación. Consiste en el descenso de materias del horizonte A al horizonte B. En otros casos, existe una migración ascendente, o bien, si se trata de pendientes, de una migración oblicua. La iluvación conlleva ganancia de material en los horizontes que reciben las sustancias.

**ACTIVIDAD**

Indague, ya sea en obras impresas como en sitios de internet calificados, acerca de los procesos de gleyficación, ferralitización, podsolización, sodificación, calcificación y salinización. Busque cuáles de estos se presentan en zonas tropicales.

**ATENCIÓN**

En los procesos de formación del suelo, fraccionamiento, alteración, translocación y adición-remoción intervienen las siguientes acciones: ganancias, pérdidas, transferencias y alteraciones de materiales.

Existen otras maneras en que se forman los suelos. Se llevan a cabo de modo compuesto, como los de gleyficación, podsolización, ferralitización, sodificación, calcificación y salinización.

4. ADICIÓN Y REMOCIÓN

Estos procesos se refieren a la ganancia o a la pérdida de materiales. La adición, por lo general, es de materiales orgánicos o de minerales. La pérdida puede suceder por erosión: los materiales son removidos hacia abajo por acción del agua y de movimientos tectónicos.

Las adiciones y las pérdidas se ligan con agua, materiales disueltos o suspendidos, gases, energía y material en descomposición. Las translocaciones se relacionan con las turbaciones ocasionadas por depósitos de animales muertos, árboles, dilatación y contracción de suelos y terremotos; todas estas causas se conocen como edafoturbaciones. Las alteraciones se generan por cambios químicos en los materiales.

E. PERFIL DEL SUELO

El perfil de un suelo es el corte vertical del suelo que se observa como una serie de capas horizontales llamadas horizontes. Un perfil completo de suelo consta de 4 a 6 de estas capas. Normalmente, se clasifican tres horizontes de suelo y se le designan las letras A, B y C. En un perfil de suelo pueden desarrollarse otros horizontes como el O, H, E, I, L, W (*CDR. 3*), además en los perfiles siempre se indica a la roca madre con la letra R.

FIGURA 12. PERFIL DE UN SUELO CON HORIZONTES O, A, B, C Y R. Perfil de un suelo conformado por cinco horizontes correspondientes a: [O] manto de hojas en descomposición; [A] la capa arable; [B] la capa de precipitación o de acumulación de material que se ha arrastrado; [C] la capa de suelo con el material parental fragmentado y; [R] la roca madre.

FUENTE: adaptada de Esquema de los horizontes del suelo (2007). Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons.



- ← HORIZONTE O [MANTO ORGÁNICO]
- ← HORIZONTE A
- ← HORIZONTE B
- ← HORIZONTE C
- ← HORIZONTE R [ROCA MADRE]

La capa denominada horizonte A representa la capa arable del suelo; la capa designada horizonte B consiste en suelo menos evolucionado y el estrato llamado horizonte C es el material parental fragmentado.

Cada uno de los horizontes mencionados puede variar respecto de los otros en sus



características físicas y químicas, a raíz de los procesos de edafización y a las diferencias espaciales a lo largo del perfil del suelo.

Cuanto más evolucionado se halle un perfil, más definición de horizontes presenta. Por consiguiente, es posible encontrar, por ejemplo, el horizonte H, que comprende hojarasca; el horizonte O, que consiste en hojarasca en descomposición (manto de hojas); y el horizonte R, designado para el material parental o roca madre (*CDR. 3*).

CUADRO 3
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES
DE LOS HORIZONTES

HORIZONTE	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS
H (o hístico)	Acumulación de restos vegetales, prácticamente, sin descomponer, en los que puede reconocerse, en términos generales, la estructura de la parte de la planta. Se presenta en zonas de turberas o de bosques no disturbados. Puede estar saturado con agua o no estar saturado.	Alcanza 30% de materia orgánica.
O	Material orgánico descompuesto en combinación con el material mineral.	El contenido de materia orgánica es variable.
A	Capa superficial del perfil, enriquecida con la materia orgánica humidificada y mezclada con el material mineral.	Sin son zonas boscosas, es una de las capas más activas desde la perspectiva microbiológica. Presenta estructuras migajosas. Es la capa más fértil.
E	Horizonte desarrollado a partir del lavado de minerales desde un horizonte superior por eluvión. Posee bajo grado de desarrollo estructural. Puede formarse por pérdida de arcillas, de hierros o de aluminios.	La fertilidad depende de los depósitos agregados por eluvión.
B	Horizonte con mayor presencia de arcillas y óxidos de hierro y aluminio. Su coloración es parda o rojiza. La estructura es más densa y varía de angular a prismática.	La fertilidad es menor y la actividad biológica desciende.
C	Horizonte con material parental fragmentado. Se perciben diferencias de color y de texturas. El material puede hallarse meteorizado, pero no edafizado.	Fertilidad baja y poca actividad biológica.
R	Material de partida o material parental, conocido como roca.	
I**	Cristales y cuñas de hielo que contienen al menos 75% de hielo.	
L	Sedimentos depositados en cuerpos de agua.	
W	Capas de agua en los suelos o el agua que anega los suelos.	

FUENTE: investigación y propuesta de Paola Brenes Rojas a partir de *Edafología del trópico*, de Wagner Peña Cordero (2012) y «Formación de neologismos en Ciencias del Suelo», de Jaume Portas y Darío Villanueva (2012).



Los horizontes del suelo se estudian de acuerdo con el objetivo propuesto; Nuñez (1981) indica que, para efectos prácticos, se analizan los horizontes hasta donde llega la actividad biológica y las raíces de las plantas, o sea A o B. La zona inferior inmediata se define *subsuelo*.

CUADRO 4

CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS EN LOS HORIZONTES SEGÚN EL SUFijo

LETRA	CARACTERÍSTICAS	HORIZONTE
a	Materia orgánica (M. O.) altamente descompuesta.	O
b	Horizonte genético enterrado.	Cualquiera
c	Concreciones o nódulos.	Cualquiera
d	Zona compactada por vía natural o antrópica.	Cualquiera
e	MO moderadamente descompuesta.	O
f	Permanentemente congelado.	Cualquiera
g	Gleyciación, moteados grises o verdes por reducciones de hierro. Hidromorfía parcial.	Cualquiera
h	Acumulación de MO iluvial.	A, B. En B, cuando por iluvación hay movimiento de humus.
i	MO ligeramente descompuesta	O
k	Acumulación de carbonatos de calcio	B o C
m	Cementación o endurecimiento > 90 %.	Cualquiera
n	Acumulación de sodio (Na) intercambiable.	Cualquiera
o	Acumulación residual de sesquióxidos.	B
p	Horizonte disturbado (la «p» proviene de la palabra en inglés plow, que significa «arable»).	A
q	Acumulación de sílice.	Cualquiera
ss	Presencia de slickensides (cutanes de presión), una superficie suavemente pulida a causa del movimiento de fricción entre las rocas a lo largo de los dos lados de una falla.	B
t	Acumulación de arcillas por iluvación.	B, C
v	Presencia de plintita.	B
w	Meteorización (la «w» viene de weathering, que en español significa «meteorización»). Color y estructura débiles.	B
x	Presencia de fragipán o duripán, las cuales son capas compactadas.	B
y	Acumulación de yeso.	Cualquiera
z	Acumulación de sales más solubles que el yeso.	Cualquiera

FUENTE: investigación y propuesta de Paola Brenes Rojas a partir de *Edafología del trópico*, de Wagner Peña Cordero (2012) y «Formación de neologismos en Ciencias del Suelo», de Jaume Portas y Darío Villanueva (2012).



No en todos los suelos existen las mismas características de horizontes. En caso de que se presenten horizontes mezclados (es decir que tienen dos partes de horizontes reconocibles), se usan las dos letras descriptivas, separadas por una barra. La primera letra será la del horizonte que más domina o de mayor volumen; por ejemplo, un horizonte A/B, donde predomina las características del horizonte A. Pero hay partes moderadas del horizonte que continúa; en este caso, el B. Si se trata de un horizonte en transición, se escribe BC, el cual muestra que existe dominancia de las características del horizonte B; aunque contiene algunas características del horizonte C; o sea tiene características de ambos.

En la clasificación de horizontes se designan sufijos para describir los perfiles. Cada sufijo consta de una o varias letras minúsculas del abecedario y se anota después de la letra del horizonte, sin dejar espacio; por ejemplo, Oa: el horizonte O presenta material orgánico *altamente descompuesto*; de ahí la letra «a». El significado de cada letra minúscula se incluye en el Cuadro 4 (*P. ANT.*).

Algunos ejemplos para una mayor comprensión



EJEMPLOS

EJEMPLO 1

A continuación, se describe el perfil de un suelo en la parte alta de Caño Negro de Tilarán, con las características de sus horizontes.

HORIZONTE	CARACTERÍSTICAS
Oh	Capa orgánica O con presencia de humus.
A	Horizonte A.
Eb	Capa de eluvación con arenas (horizonte enterrado).
Ab	Horizonte A enterrado..
Bw	Horizonte B meteorizado, con estructura frágil.

EJEMPLO 2

En la zona de Santa Rosa existen suelos viejos, profundos y meteorizados, como los alfisoles y los ultisoles. Ahí presentaron acumulaciones de arcillas en el horizonte B, que se clasifica como un Bt debido a los depósitos magmáticos que posee. Este horizonte provoca que los suelos sean más maduros y acumulen mayores bases de intercambio catiónico (LEIVA, MATA, ROCHA Y GUTIÉRREZ, 2009).



CONCEPTOS

gleyiación. Proceso en el que dominan las condiciones de reducción de los óxidos de hierro, los cuales llegan a alcanzar la forma ferrosa (Fe²⁺). Este proceso sucede en condiciones de anoxia, genera colores grises o moteados en el suelo y pone de manifiesto la presencia de mal drenaje o de niveles freáticos fluctuantes.

nivel freático. Es el nivel por el cual se encuentra un acuífero en el subsuelo. Por ejemplo, el nivel freático de un suelo sería la profundidad que se alcance hasta que se empiece a llenar de agua el foso o calicata.

• CONCEPTOS Y PRINCIPIOS



EN LA RED...

DESCRIPCIÓN DE SUELOS

Con el fin de lograr una adecuada descripción de suelos para cualquier investigación en la ciencia de suelo o relacionada con este recurso, puede consultar la Guía para la descripción de suelos, preparada por la FAO.

Puede accederla en formato de documento portable (pdf) en la siguiente dirección: <<http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.



F METEORIZACIÓN

En los procesos por alteración incide la meteorización química, que se refiere a los procedimientos en los cuales los materiales

**CONCEPTO**

disolución cárstica. Se origina por disolución indirecta del carbonato cálcico de las rocas calizas, debido a la acción de aguas ligeramente ácidas. La disolución del carbonato de calcio se representa por la siguiente ecuación:

$$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$$

sufren cambios y se transforman en otro mineral; por consiguiente, el suelo adquiere nuevas características químicas.

Comúnmente, se tiende a confundir edafización con meteorización; empero, la edafización corresponde a la formación de suelo, lo cual implica procesos genéticos, bioquímicos o de metabolismo. Algunos científicos consideran la edafización como el estado clímax o de madurez máxima en el proceso de formación de un suelo (PEÑA CORDERO, 2017).

En la meteorización química se diferencian varios procesos, como son: disolución, carbonatación, hidratación, hidrólisis, oxidación y actividad biológica.

1. DISOLUCIÓN

A grandes rasgos, la disolución consiste en una disociación o una separación de los compuestos en moléculas o en iones, gracias a agentes disolventes como el agua. Las rocas sedimentarias (por ejemplo, las evaporitas), en presencia de anhídrido carbónico, se pueden disolver en el agua.

2. CARBONATACIÓN

La carbonatación solo se lleva a cabo en rocas carbonatadas; sucede que una **disolución cárstica** ataca las rocas que tienen en su composición calcio, sodio, potasio u óxidos básicos y genera compuestos como carbonatos o bicarbonatos.

3. HIDRATACIÓN

La hidratación se produce cuando el agua se combina, químicamente, con otro compuesto. Al estar los compuestos hidratados, entran en las rocas y, en consecuencia, el volumen de esta aumenta. En el tiempo que dichos compuestos se secan, ocurren contracciones y dilataciones las cuales ocasionan que la roca se fragmente. Esto solo sucede en rocas cuya composición estructural es muy débil.

4. HIDRÓLISIS

La hidrólisis es una reacción química entre moléculas de agua y moléculas de otro compuesto. En el proceso, los átomos del agua (hidrógeno y oxígeno) se transforman en iones, los cuales pueden



reaccionar con determinados minerales y formar un compuesto diferente de los que lo originaron. Por ejemplo, los iones de hidrógeno (H^+) del agua de lluvia, en conjunto con los H^+ producidos por la descomposición de un material a causa de los microorganismos, aumentan la concentración de H^+ y el pH de la disolución se torna ácido. En ese medio ácido se favorece la reacción de hidrólisis de ciertas sustancias presentes en el mineral. El concepto de pH se explica en el apartado «pH y la acidez del suelo» del Capítulo 2.

5. OXIDACIÓN

En la oxidación de un compuesto, este pierde electrones; a la vez, otro compuesto gana esos electrones y se reduce. El compuesto que se oxida es el reductor y el que se reduce es el oxidante. Las reacciones de reducción-oxidación son conocidas como redox (*TÉRMINO GLOSADO ANTERIORMENTE*).

En los suelos normales, donde el ambiente es aireado, existe una tendencia general oxidante. La oxidación es preponderante en la formación de suelos, pues en este proceso se libera oxígeno al agua. Por el contrario, los suelos hidromorfos, con saturación en agua, son escenarios reductores y, generalmente, poseen mal olor y coloración verde o negra. Los manglares configuran un ejemplo de estos espacios anóxicos, donde las reacciones de reducción son constantes y el oxígeno disuelto en el agua está agotado.

En el Cuadro 5 se incluyen algunos de los procesos de oxidación que se llevan a cabo en los suelos.

CUADRO 5

EJEMPLOS DE PROCESOS DE OXIDACIÓN Y LAS CORRESPONDIENTES OBSERVACIONES DE LOS SUELOS

EJEMPLOS	PROCESOS	OBSERVACIONES DE LOS SUELOS
Oxidación del hierro	$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$	Poseen tonalidades rojizas, ocres o pardas.
Oxidación de manganeso	$Mn^{2+} \rightarrow Mn^{4+}$	En sales disueltas, los óxidos de manganeso (IV) se tornan morados intensos. En rocas, adquieren coloraciones rojizas y negras.
Oxidación de azufre	$SO_2 \rightarrow SO_3$	El compuesto resultante es incoloro e inoloro, pero en combinación con agua de la atmósfera, produce agua de lluvia ácida.
Oxidación del amonio a nitrato	<i>Paso 1.</i> Nitritación: $NH_3 + O_2 \rightarrow NO_2^- + 3 H^+ + 2 e^-$ <i>Paso 2.</i> Nitratación: $NO_2^- + H_2O \rightarrow NO_3^- + 2 H^+ + 2 e^-$	Este es un tipo de oxidación biológica, es decir, en la que participan seres vivos. En la primera etapa, intervienen las bacterias del género microbiológico Nitrosomonas y Nitrosococcus. La segunda etapa es ejecutada, mayormente, por bacterias del género Nitrobacter.

FUENTE: investigación y propuesta Paola Brenes Rojas.



CONCEPTOS

nitrificación. Proceso de oxidación biológica del amonio a nitrato en medios aeróbicos por medio del oxígeno molecular como acceptor de electrones.

desnitrificación. Proceso biológico de reducción del nitrato a nitrógeno molecular en medios anaeróbicos.

30

PAOLA BRENES ROJAS

6. ACTIVIDAD BIOLÓGICA

En los procesos de meteorización también actúan colonias microbianas y reacciones enzimáticas sobre el material parental. Por ejemplo, los procesos de **nitrificación** y **desnitrificación**, en las cuales ocurren reacciones químicas, generadas por la actividad biológica de bacterias especializadas. La nitrificación es el paso de amonio a nitrato en medios aeróbicos y la nitrificación es el proceso de reducción del nitrato a nitrógeno gaseoso, y este sucede en condiciones anaeróbicas.

También en los procesos de descomposición de la materia orgánica se origina una serie de productos orgánicos que alteran la roca. Asimismo, las plantas liberan CO_2 y, a partir de este compuesto, se incrementan las reacciones químicas del medio.

III. *Minerales*

La corteza terrestre y los océanos son fuente de una gran gama de minerales y rocas. Desde el punto de vista de la geología, las rocas consisten en una masa sólida compuesta por minerales (uno o varios) y que se presentan de manera natural en el planeta.

Los minerales están constituidos por elementos como oxígeno, silicio, aluminio, hierro, calcio, sodio, potasio, magnesio e hidrógeno; se clasifican de acuerdo con el arreglo espacial de sus componentes, en cristalinos o no cristalinos; también se agrupan por color, brillo, raya, dureza, fractura y peso específico relativo (Tarbuck y Lutgens, 2005), propiedades que se describen a continuación:

- **Color.** De las longitudes de onda de luz, la gama que percibe el ojo humano se denomina espectro visible; en él, cada nivel de energía corresponde a un color diferente. En geología, el color ayuda a diferenciar los minerales entre ellas; por ejemplo, el cuarzo posee color rosa y la amatista es púrpura.
- **Brillo.** Atañe a la calidad de la luz reflejada por la superficie del mineral. Por ejemplo, la superficie de los minerales con brillo metálico refleja casi toda la luz; por lo tanto, estos son opacos.
- **Raya.** Es el color del mineral en polvo; se obtiene al frotar el mineral en una placa de porcelanato blanca. Para efectos de identificación,



es más útil que el color del mineral en estado sólido pues es una propiedad constante. Por ejemplo: la hematita es negra y raya roja (el color de la raya es el proceso de deslizar la roca sobre una superficie dura y blanca y definir el color con que se pulveriza).

- **Dureza.** Se vincula esta propiedad con la resistencia de los minerales al ser rayados o al ser sometidos a procesos de abrasión.
- **Fractura.** Alude a la facilidad con que el material se fragmenta. Se relaciona con la estructura de los minerales, ya que existen con enlaces débiles.
- **Peso específico relativo.** Este peso –sin unidades–, también llamado «gravedad específica», consiste en el peso del mineral dividido por el peso de un volumen igual al del agua destilada a 4 °C.

Los elementos más comunes en la corteza terrestre son el silicio y el oxígeno; son, en consecuencia, cuando los dos se combinan entre sí, crean estructuras del grupo mineral más común: los silicatos. Los silicatos son uno de los principales materiales que forman los suelos. Estos pueden ser primarios o secundarios, la diferencia entre ellos radica en los procesos de meteorización y síntesis, con algunas excepciones como los cuarzos o el zircón (NUÑEZ, 1981).

A. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS

Dentro de la ciencia geológicas, las rocas se definen como el material mineral que no está meteorizado y con el cual se compone el suelo. Estas se pueden categorizar según su composición; es decir, la proporción por el que se componen los elementos, en donde los más comunes y más estables son los silicatos.

Dichos minerales, asimismo, se clasifican según el proceso de formación geológica por el cual se formaron; o sea, si su formación fue por procesos de solidificación de magma, por cambios estructurales de otros materiales o por acumulación de sedimentación. Según el proceso por el que se formó, la roca puede variar sus características como la textura, la composición química y la dureza, entre otras. Las rocas se catalogan en ígneas, metamórficas y sedimentarias.

1. ROCAS ÍGNEAS

Las rocas ígneas se forman por la solidificación de material rocoso caliente y móvil, como el magma. Existen varios tipos de





rocas ígneas: las intrusivas o plutónicas y las extrusivas o volcánicas. Las rocas intrusivas se solidifican en el seno de la litosfera; tal es el caso de las dioritas. Las extrusivas lo hacen en las zonas superficiales, por ejemplo, los basaltos.

2. ROCAS METAMÓRFICAS

Las rocas metamórficas son producto de cambios en la estructura y las características del material de rocas preexistentes, en condiciones físicas y químicas específicas (NUÑEZ, 1985); dos ejemplos de aquellas son la pizarra y la serpentinita. Su clasificación se basa en la composición mineralógica, la textura, el tamaño de grano y el tipo de roca inicial o anterior al proceso metamórfico.

3. ROCAS SEDIMENTARIAS

Las rocas sedimentarias se forman por acumulación de sedimentos, los cuales consisten en partículas de diversos tamaños que son transportadas por el hielo, el agua o el aire y sometidas a procesos físicos y químicos. También suelen estar compuestas de productos meteorizados de las rocas ígneas; por ende, abunda este tipo de piedras, como el cuarzo y los minerales arcillosos (resistentes a una nueva meteorización). De acuerdo con su composición, las sedimentarias se clasifican en rocas arcillosas, calizas, silíceas, orgánicas y salinas; por ejemplo, la antracita es orgánica y la caolinita, silícea.

Las rocas sedimentarias presentan una estructura por estratos discontinuos. Al ser más o menos permeables, se favorece la circulación o los depósitos de aguas o hidrocarburos.

4. ROCAS MÁS COMUNES

Los tipos de rocas más corrientes son: calizas, areniscas, granitos, esquistos, pizarras, margas y depósitos aluviales (BARRIOS, 1985).

Las rocas sedimentarias como las calizas y las dolomías son los minerales que están compuestos por más de 50 % de carbonatos y el resto corresponde a limo, arcillas, cuarzos y otros. Los suelos procedentes de la alteración de rocas sedimentarias se forman a partir de los residuos dejados por la disolución de carbonatos.





Si las rocas calizas son ricas en arcillas, el resultado son suelos arcillosos e impermeables. Si es rica en arena, los suelos formados son de textura gruesa y permeable. De ser rica en impurezas de hierro, como la hematita, la consecuencia es un suelo rojo y, casi siempre, ácido.

Las areniscas son las que contienen más de 50 % de partículas del tamaño de la arena, predominantemente, cuarzo. El silicio, el hierro y los carbonatos son los principales compuestos de las arenas.

El granito es una de las rocas ígneas intrusivas más comunes. En su composición, hay de 2 a 40 % de cuarzo y 25 % de feldespato alcalino. Los suelos, por lo general, son amarillentos y cuando son evolucionados, son de color café amarillento, debido al bajo contenido de hierro de la roca madre.

Los esquistos son rocas metamórficas con origen sedimentario, en los que la mayoría de los constituyentes están dispuestos paralelamente. Pueden ser feldespatos, cuarzos y micas o illitas.

Entre los esquistos y las pizarras hay poca diferencia. Por ello, es muy difícil de apreciar y marcar. Las pizarras tienen naturaleza sedimentaria y metamórfica y proceden de la metamorfosis de arcillas.

Las rocas margas son sedimentarias arcillo-calcáreas, es decir, están compuestas por materiales calizos del tamaño de las arcillas.

Los depósitos aluviales son los materiales sedimentarios transportados de **origen fluvial**. Se caracterizan por una heterogeneidad de sus compuestos.



CONCEPTO

origen fluvial. Material proveniente de ríos, arroyos, depósitos y relieves.

B. MINERALES PRIMARIOS

Las alteraciones de los minerales de la roca causadas por la meteorización producen el material de partida: los minerales primarios de los que se compondrá el suelo. La mayoría de estos pertenece al grupo de los silicatos, aunque también se encuentran óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfatos, sulfuros y fosfatos.

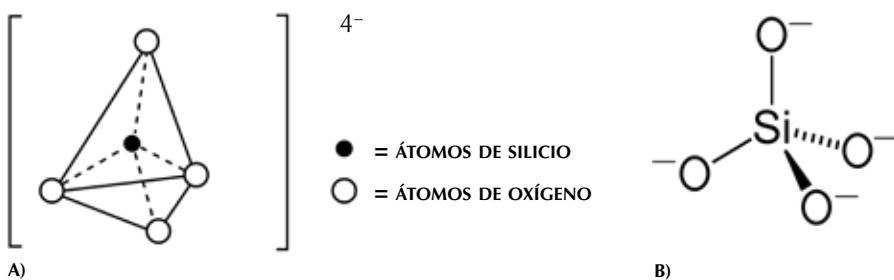
1. SILICATOS

La unidad básica de los silicatos es el anión $(\text{SiO}_4)^{4-}$, un tetraedro con un átomo de silicio en el centro y cuatro átomos de oxígeno en los vértices (FIG. 13, V. P. SIG.).



FIGURA 13. ESTRUCTURA DEL SILICATO. Los silicatos tienen una estructura tetraédrica con un átomo de silicio en el centro y cuatro átomos de oxígeno en los vértices. En la figura A) las esferas blancas representan iones de oxígeno y las esferas negras iones de silicio, las cuales también se representan en la figura B).

FUENTE: A) Adaptada de «La zeolita, una piedra que hierva», de Pedro Bosch e Isaac Schifter (1997) y B) «Silikaat». Silicate-tetrahedron-2D.png, de Benjah-bmm27 (2007). Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons.



Todos los silicatos tienen una forma cristalina constituida por tetraedros. En la formación de la red colaboran enlaces con iones positivos (cationes) que se encuentran entre los espacios del conglomerado. La mayoría de las propiedades fundamentales del suelo se derivan de tales estructuras.

Existen seis grupos de compuestos de silicio: ortosilicatos, sorosilicatos, ciclosilicatos, inosilicatos, tectosilicatos y filosilicatos, los cuales se describen en los apartados subsiguientes. Según el grupo al que pertenezca un compuesto, puede aislarse o agruparse de forma diferente. Los procesos de alteración que sufre este conjunto de minerales se basan en modificaciones y creación de nuevas estructuras de silicatos (GARCÍA NAVARRO, 2005).

2. ORTOSILICATOS

Los ortosilicatos o nesosilicatos están formados por tetraedros simples enlazados por distintos cationes, lo que origina diferentes minerales. En la Figura 14, se muestra la estructura cristalina del olivino $(Mg, Fe)_2SiO_4$. La fórmula química del anión es $(SiO_4)^{4-}$.

Las cargas negativas de los átomos de oxígeno se enlazan con cationes y así se forma el conglomerado de los tetraedros.

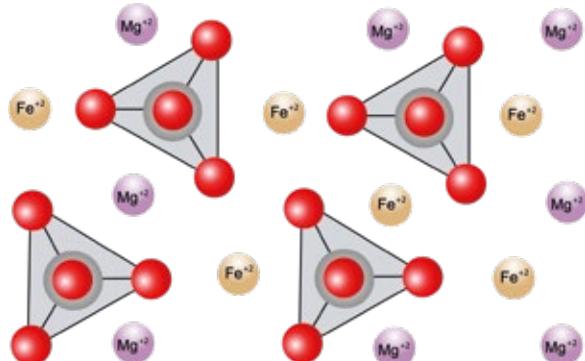


FIGURA 14. OLIVINO: UN ORTOSILICATO. La estructura de ortosilicatos como los olivinos es de forma tetraédrica simple, enlazada por distintos cationes. Las esferas rojas representan iones de oxígeno y las esferas grises iones de silicio.

FUENTE: «Los silicatos» (2015). Químicas.net. Reproducida con fines educativos.



3. SOROSILICATOS

Los sorosilicatos son grupos de silicatos formados por dos tetraedros que comparten uno de sus vértices (Fig. 15). Su fórmula química es $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$.

Este grupo puede crear enlaces iónicos con metales; por ejemplo, sodio, calcio, hierro, aluminio, potasio, magnesio, entre otros.

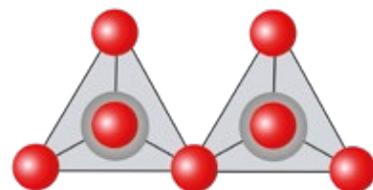


FIGURA 15. SOROSILICATO. La estructura de los sorosilicatos está conformada por dos tetraedros que comparten uno de sus vértices. Las esferas rojas representan iones de oxígeno y las esferas grises iones de silicio.

FUENTE: «Los silicatos» (2015). Químicas.net. Reproducida con fines educativos.

4. CICLOSILICATOS

Los ciclosilicatos son grupos de tres, cuatro o seis tetraedros que comparten dos de sus vértices. También forman enlaces iónicos con cationes de metales como sodio, calcio, hierro, aluminio, potasio y magnesio. La variedad de minerales que forman se debe a que los cationes poseen cargas y tamaños distintos, situación que determina la estructura de los compuestos resultantes (Fig. 16). Estos grupos tienen 16 tipos de familias, un ejemplo son los $(\text{Si}_6\text{O}_{18})^{12-}$ el cual está formado por anillos dobles de 6 eslabones.

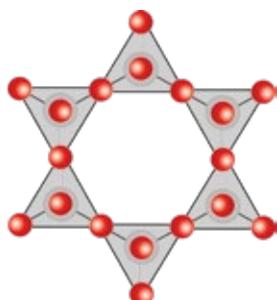


FIGURA 16. CICLOSILICATO. La estructura de ciclosilicatos está conformada por grupos de tres, cuatro o seis tetraedros que comparten dos de sus vértices. Las esferas rojas representan iones de oxígeno y las esferas grises, iones de silicio.

FUENTE: «Los silicatos» (2015). Químicas.net. Reproducida con fines educativos.

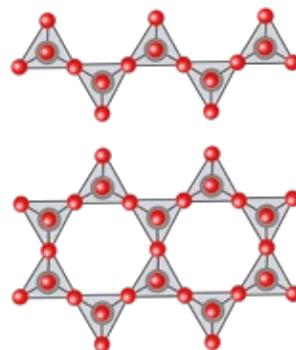


FIGURA 17. INOSILICATOS SIMPLE Y DOBLE. Las estructuras de los inosilicatos se forman por cadenas de tetraedros enlazados por diferentes cationes. Las esferas rojas representan iones de oxígeno y las esferas grises, iones de silicio.

FUENTE: «Los silicatos» (2015). Químicas.net. Reproducida con fines educativos.

5. INOSILICATOS

Los inosilicatos son estructuras compuestas por largas cadenas de tetraedros entrelazadas por diferentes cationes, entre ellos los de hierro ferroso y magnesio. Las cadenas pueden ser simples o dobles (Fig. 17).

En las cadenas simples, cada tetraedro comparte dos vértices con sus vecinos. Dicho arreglo es propio de los piroxenos. Su fórmula química es $(\text{SiO}_3^{2-})_n$, donde la relación Si:O es 1:3.

En las cadenas dobles, los tetraedros centrales pueden compartir tres vértices. Las dobles son propias de los anfíboles, don-



de dos cadenas de tetraedros se unen entre sí por vértices. En la altura de los vértices superiores de los tetraedros siempre quedan libres grupos OH, los cuales pueden ser desplazados; por ejemplo, por flúor. Los átomos de silicio pueden ser reemplazados por aluminio. Tal grupo es característico de rocas ácidas. Su fórmula es $(\text{Si}_4\text{O}_{11})_n$, donde la relación Si:O es 4:11.

6. TECTOSILICATOS

Los tectosilicatos consisten en estructuras tridimensionales formadas por una red de tetraedros de SiO_4 . Si ningún silicio es sustituido por otro átomo en su red, el compuesto es un cuarzo (SiO_4). Este grupo es de los más abundantes, constituye aproximadamente 64 % de los minerales de la corteza terrestre y son los silicatos más estables estructuralmente (Fig. 18). Su fórmula química es SiO_4 .

Además del cuarzo, existen otros tectosilicatos que abundan; por ejemplo, el tipo de materiales en el que el ion Al^{3+} sustituye al Si^{4+} porque sus tamaños son similares. Este tipo de sustitución provoca un desbalance en las cargas -se crea un déficit de las positivas- por lo cual son atraídos cationes de otros átomos, como potasio, sodio y calcio (K^+ , Na^+ y Ca^{2+}); entonces se forman materiales llamados feldespatos y feldespatoides.

Entre los tectosilicatos se encuentran las rocas de zeolitas, que son alumino-silicatos cárnicos y alcalinos. Este tipo de rocas ha tenido mucha relevancia a escala global, porque es un material orgánico no contaminante, que se usa como enmienda para potenciar el aprovechamiento de los fertilizantes por parte de los cultivos (PÉREZ, 2017).

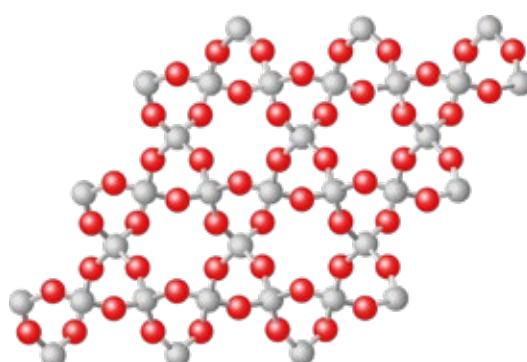


FIGURA 18. ESTRUCTURA INTERNA TRIDIMENSIONAL DE UN CUARZO. Los tectosilicatos presentan una estructura tridimensional formada por una red de tetraedros de SiO_4 . Las esferas rojas representan iones de oxígeno y las esferas grises iones de silicio.

FUENTE: «Kuarts». Archivo: Beta-quartz-CM-2D-balls.png. Ilustración de Ben Mills (2008). Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons.



ATENCIÓN

Los filosilicatos, en conjunto con los aluminosilicatos, son muy necesarios en los suelos, ya que desempeñan un papel sustancial en el intercambio catiónico y, por consiguiente, en su fertilidad natural.

7. FILOSILICATOS

Los filosilicatos son parte sustancial del complejo edáfico y participan en el proceso de cambio del suelo. A este grupo pertenecen las arcillas que, en su mayoría, son minerales secundarios pues representan el producto final de la meteorización, principalmente de silicatos.

Las arcillas son constituyentes esenciales de numerosos suelos y sedimentos del mundo. Generan una mayor área superficial con carga, la cual es capaz de retener iones en el suelo; ahí radica su valor en la fertilidad natural.

En edafología, las arcillas pueden tener dos significados. Según el primero, son toda partícula que tenga menos de 0,002 mm de diámetro, sin importar su composición química o el mineral específico al que pertenezca. De acuerdo con el segundo, todos los materiales arcillosos se forman a partir de inosilicatos o filosilicatos.

Los filosilicatos son minerales cuya composición básica consiste en la unión de una o dos láminas tetraédricas con una lámina octaédrica. Cuando solo existe una capa tetraédrica y otra octaédrica, la estructura se conoce como arcillas 1:1. En el momento que hay una capa tetraédrica extra encima, se conoce como filosilicatos 2:1 o arcillas 2:1 (FIG. 19). Los filosilicatos 1:1 más comunes y abundantes son las caolinitas. En el caso de los filosilicatos 2:1, son los de tipo alumínico y los magnésicos. Su fórmula química tiene el ion $(Si_2O_5^{2-})_n$.

En los vértices de los tetraedros de la lámina octaédrica se ubican grupos OH- o átomos de oxígeno; en los espacios creados al interior del octaedro se hallan cationes de elementos como aluminio o magnesio, los cuales forman enlaces iónicos con los OH-; así se estabiliza la lámina octaédrica. Para unirse con la capa tetraédrica, la capa octaédrica expulsa OH- y neutraliza cargas negativas.

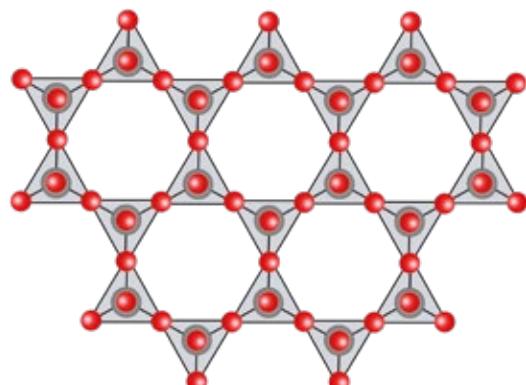


FIGURA 19. FILOSILICATO. La estructura básica de los filosilicatos consiste en la unión de una o dos láminas tetraédricas con una lámina octaédrica. Las esferas rojas representan iones de oxígeno y las esferas grises, iones de silicio.

FUENTE: «Los silicatos» (2015). Químicas.net. Reproducida con fines educativos.



La lámina octaédrica también se llama capa trioctaédrica porque el balance de cargas sucede cuando hay tres octaedros dentro del anillo de tetraedros de silicio.

8. OTROS MINERALES PRIMARIOS

Existen otros minerales primarios que se encuentran en los suelos que son importantes de conocer como los óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfatos, sulfuros y fosfatos de los cuales después de expuesto al intemperismo, se producen reacciones químicas sobre minerales y originan la formación de minerales secundarios.

- a) **Óxidos.** Los óxidos son minerales comunes de las rocas ígneas y metamórficas. Los más abundantes son la magnetita, el corindón, la ilmenita y la pirolusita.
- b) **Hidróxidos.** Los hidróxidos son minerales muy comunes. Provienen de óxidos en los cuales el oxígeno ha sido reemplazado por un grupo hidroxilo.
- c) **Carbonatos.** Los carbonatos son los minerales que tienen en su composición química sales derivadas de los ácidos carbónicos. Los más comunes son la calcita y la dolomita.
- d) **Sulfatos.** Los sulfatos son sales que incluyen el grupo SO_4^{2-} en su estructura, como la anhidrita y el yeso.
- e) **Sulfuros.** Los sulfuros son sales derivadas del ácido sulfhídrico, como la calcopirita, la pirita y la galena.
- f) **Fosfatos.** Los fosfatos son las sales derivadas del ácido fosfórico; el grupo de más interés es el de los apatitos.

C. MINERALES SECUNDARIOS

Los minerales secundarios o deutéricos son formados por alteración química o bioquímica de materiales preexistentes; o sea, los primarios. Esos procesos de nueva formación incluyen la descomposición química y la síntesis de minerales a partir de las soluciones.

Los minerales secundarios se dividen según su origen por herencia, por transformación, por solubilización y por neoformación. Asimismo, se clasifican de acuerdo con su composición química en tres grandes grupos: las sales, los aluminosilicatos o arcillas y los óxidos e hidróxidos de hierro.



1. SALES

Las sales consisten en los minerales secundarios provenientes de soluciones. Son comunes en las zonas áridas con predominancia de evapotranspiración, donde estas sustancias se concentraron dentro del perfil del suelo o en la superficie. Abundan en el noroeste de Argentina. Con tanta concentración de sales, la presión osmótica puede ser tóxica para las plantas; sin embargo, hay vegetación adaptada para esas áreas.

Las sales se dividen en hidrácidos, nitratos, carbonatos, boratos, sulfatos y fosfatos.

2. ALUMINOSILICATOS O ARCILLAS

Los aluminosilicatos o arcillas, como se explicó anteriormente, poseen forma de filosilicatos, pero de tamaño microscópico; por siguiente, las caolinitas, illitas o montmorillinitas corresponden a modelos de arcillas por su estructura, aunque sean materiales diferentes.

Los aluminosilicatos se consideran uno de los grupos que más influyen en las características físicas, químicas y biológicas del sustrato edáfico, por lo que su estudio es muy valioso en edafología. Algunos tipos de arcillas son las caolinitas, las illitas y las montmorillonitas.

Las arcillas se dividen, a su vez, en varias categorías: las interestratificadas, las expansibles o esmectitas y las no cristalinas o alófanas; cada conjunto se describe brevemente, a continuación:

- Arcillas interestratificadas.** Se encuentran integradas por diferentes materiales arcillosos. Este tipo de mezclas no tiene **orientación** definida en su estructura y posee variedad de formas en su interior.
- Arcillas expansibles o esmectitas.** Muestran variación interlaminares, a causa de la hidratación o la desecación. Se conocen también como arcillas 2:1.

Es un grupo de minerales muy amplio; a este pertenecen la montmorillonita, la stevensita, la saponita, la vermiculita, la clorita y la nontronita, entre otras.

- Arcillas no cristalinas, alófanas o filosilicatos amorfos.** Son aluminosilicatos secundarios de difícil identificación. Su composición

EN LA RED...

ARCILLAS

EN COSTA RICA

Revise el artículo «Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el periodo 1931-2014: Historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas», escrito por Alfredo Alvarado, Rafael Mata y Miguel Chinchilla, y publicado en la revista *Agronomía Costarricense* [Vol. 38, n.º 1, 75-106]. Puede accederlo en la siguiente dirección: <https://www.mag.go.cr/rev_agr/v38n01_portada.pdf> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.

Después de una atenta lectura, elabore un cuadro comparativo sobre los tipos de arcilla que se encuentran descritos en la sección anterior; a su vez, indique las principales características químicas y físicas de esos materiales.



CONCEPTO

orientación de una mezcla. Consiste en la forma en la que están colocados sus tetraedros u octaedros.



CONCEPTOS

superficie específica de arcillas. Es la relación de área superficial (en metros cuadrados) que existe por unidad de masa (en gramos) de material arcilloso.

floculación. Proceso químico que aglutina sustancias coloidales mediante la adición de sustancias floculantes. Por ejemplo, en el proceso de determinación de textura del suelo, si no se agrega un agente dispersante a la solución del suelo-agua, las arcillas se empiezan a unir por las fuerzas electroestáticas y forman partículas más pesadas y se sedimenta más rápidamente, por lo que se alteran los valores para determinar la clase textural del suelo.

consta de sílice y aluminio. Dichos átomos se distribuyen en tetraedros y octaedros que forman capas, las cuales carecen de patrones regulares. Las alófanas gozan de mucha porosidad interna y un alto valor de **superficie específica**. Son hidratadas porque absorben mucha agua en el espacio interlaminar.

Los suelos formados por este tipo de material tienen gran capacidad de fijar cationes como el ion zinc y aniones como los fosfatos. Los mecanismos de fijación de fosfato suceden, entre otras causas, por el desplazamiento de silicio estructural y por precipitación. Igualmente, la fijación de fósforo puede ocurrir en la fracción orgánica del suelo, donde el humus forma complejos con metales como el aluminio y el carbono es atrapado por estos complejos e inactivado. Ese hecho da como resultado que los grupos -OH combinados con el aluminio entren en reacciones de intercambio en las que participan los fosfatos, los cuales quedan fijados fuertemente.

La capacidad de intercambio catiónico de tales arcillas es muy cambiante y depende mucho del pH; también su superficie específica varía frecuentemente. Presentan alta floculación y, por eso, les es difícil dispersarse en agua.

Muchos de los filosilicatos amorfos se encuentran compuestos por cenizas volcánicas y abundan en esas zonas. Los suelos volcánicos se originan a partir de la meteorización de piedras como el basalto (tiene pH básico), la andesita (posee pH neutro) y la riolita (es ácida) y de cenizas volcánicas o vidrios (Núñez, 1981).

3. ÓXIDOS E HIDRÓXIDOS

Los óxidos y los hidróxidos provienen de las rocas residuales y se encuentran en la fracción mineral del suelo. Se derivan de suelos constituidos por silicio, hierro, aluminio, magnesio y manganeso. Estas sustancias se pueden hallar tanto en arcillas cristalinas como no cristalinas.

Entre los óxidos se encuentran los de aluminio, como la gibbsita; los de hierro, como la hematita, la goethita y la limonita; y los de magnesio, como la brusita.

En la mezcla de materiales que constituyen el suelo, estos nunca son únicos; sin embargo, algunos dominan sobre otros y



esos son los que generan un tipo de suelo en particular. Este es el caso de los suelos **andisoles**, en los cuales destacan las arcillas amorfas o no cristalinas; pero pueden existir suelos como los **inceptisoles** con **características ándicas**.

IV. *Influencia del trópico en el suelo*

Los trópicos consisten en el área que, según la astronomía, se halla comprendida entre dos círculos invisibles ubicados de manera paralela al ecuador, los cuales están definidos por la inclinación del eje terrestre (FIG. 20).

Geográficamente, los trópicos se encuentran entre las latitudes 23°26'14" N (trópico de Cáncer) y 23°26'14" S (trópico de Capricornio) del ecuador. Esta zona se conoce también como zona intertropical o tórrida y responde más a un modelo matemático de división que a características bioclimáticas; sin embargo, posee muchas similitudes ecológicas.

Las zonas tropicales comprenden 38 % del planeta Tierra y se caracterizan por tener altos valores de humedad y precipitación (Arias, 2001). Además, reciben la máxima cantidad de radiación solar en forma de luz y calor, con muy pocas variaciones durante el año. Cuando el sol se eleva, las temperaturas aumentan rápidamente y es común que el agua del suelo se evapore y forme nubes, estas ocasionan que al atardecer llueva.

La acción de los procesos y los factores formadores del suelo en los trópicos, -la diversidad de condiciones climáticas y geográficas-

CONCEPTOS

andisoles. Suelos de origen volcánico, con presencia de arcillas alófanas o no cristalinas. Los suelos de origen volcánico son altamente productivos y en Centroamérica son considerados como los de más alto rendimiento en producción de hortalizas y pasturas.

inceptisoles. Suelos que están poco desarrollados. Este tipo de suelo es muy común encontrarlo en llanuras aluviales a orillas de ríos.

características ándicas. Corresponden a las de suelos con presencia de arcillas amorfas. Generalmente, luego de erupciones volcánicas hay deposiciones de cenizas en diferentes regiones. Por ende, según la intensidad y la continuidad en el tiempo de estos eventos, dichas cenizas pueden aportar características ándicas a suelos que no necesariamente son clasificados como andisoles.

• CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

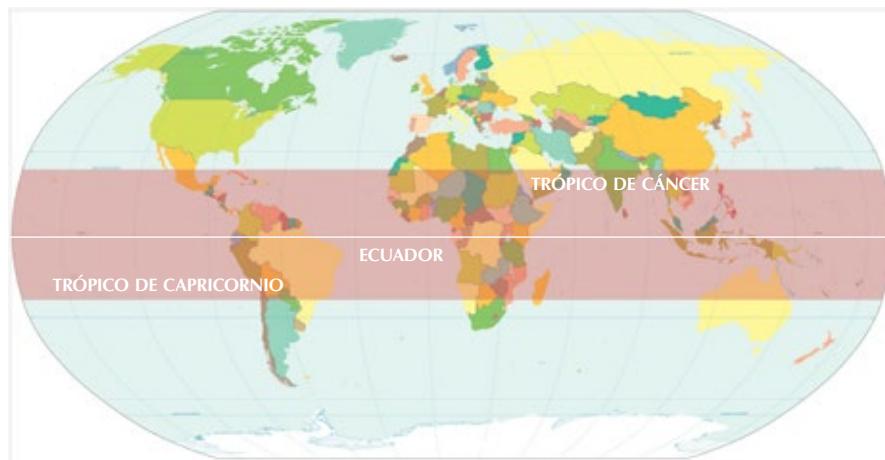


FIGURA 20. ZONA INTERTROPICAL. La zona intertropical se encuentra ubicada entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio.

FUENTE: «Trópico». Archivo: World Map Torrid.svg, en CIA_World Factbook-Political_world.svg. Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons.



ficas y la flora y fauna que en este se desarrollan- generan suelos con gran variabilidad aun en una misma región y, en general, ácidos. Su vegetación se asocia a las diferentes condiciones y al medio edáfico. En la Figura 21, se observa que los suelos tropicales cambian sustancialmente desde la perspectiva espacial, tanto en el plano horizontal como vertical.

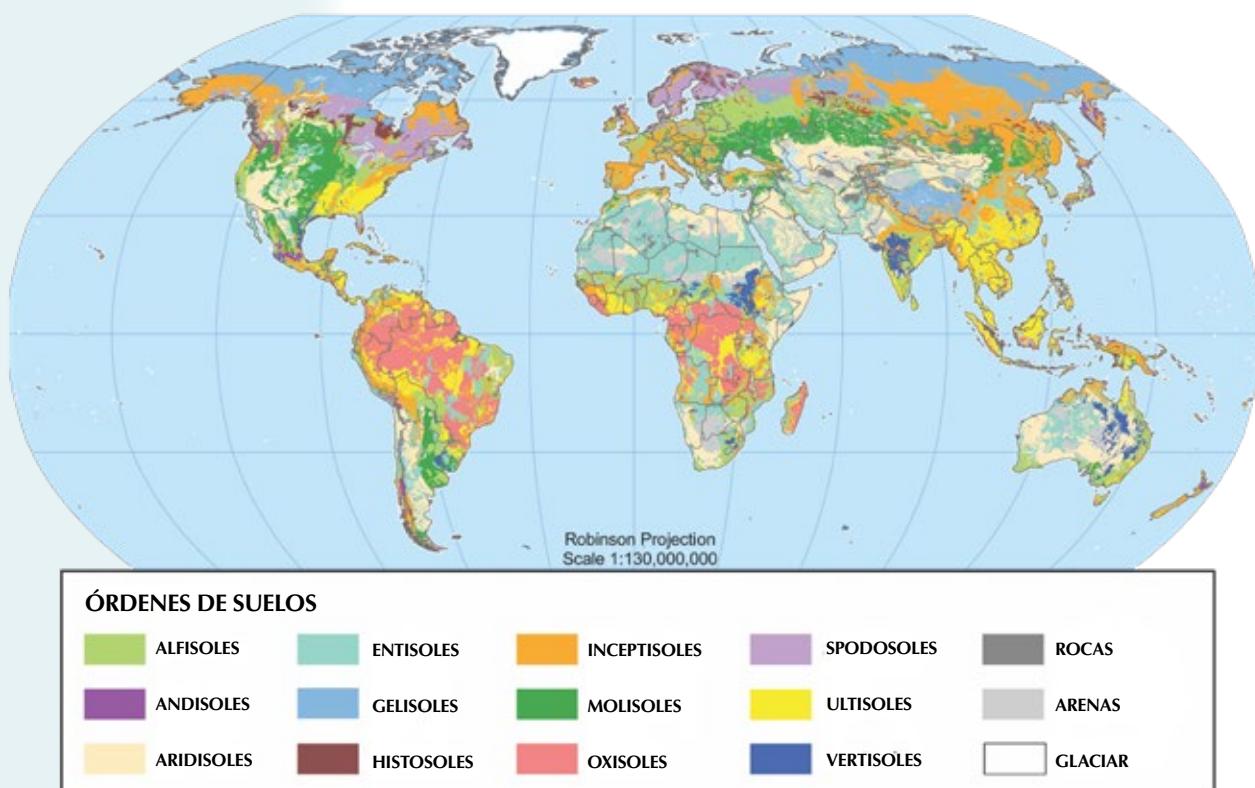


FIGURA 21. SUELOS DOMINANTES EN EL MUNDO. En el mundo existen 12 órdenes de suelo, los cuales están distribuidos de manera heterogénea. En las zonas tropicales dominan los suelos ultisoles debido a las condiciones climáticas que dominan en la región.

FUENTE: *Global Soil Regions*, cortesía del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (USDA/NRCS, por sus siglas en inglés) [Proyección de Robinson, escala 1:130 millones, noviembre 2005]. Reproducida con fines educativos.

En América Central, dominan los **ultisoles**, que son en su mayoría suelos meteorizados; y los andisoles en las cordilleras.

En general, los **suelos no disturbados** tropicales son pobres en nutrientes y por efecto de las altas temperaturas y abundantes precipitaciones, la meteorización es intensa y la lixiviación, profunda. La fertilización natural sobreviene por la gran cantidad de biomasa o material orgánico descompuesto de las primeras capas del suelo. Este material es producido en los bosques, los cuales ocasionan un ciclaje de nutrientes vital en el ecosistema (LAMPRECHT, 1990).

Los suelos tropicales utilizados para la agricultura presentan muchas limitaciones porque, según su manejo, el clima influye significativamente sobre su calidad. En consecuencia, los suelos con



un mal manejo, en conjunto con las condiciones climáticas tropicales, son más susceptibles a la erosión y a la degradación.

v. Suelo ideal

El suelo ideal o el mejor suelo depende de la perspectiva desde la que este se evalúe; sin embargo, se pueden indicar varios componentes que mantienen en equilibrio el ecosistema: un suelo ideal comprende agua y aire en 50%, ubicados en el volumen del espacio poroso; 45% en material mineral, que comprende arenas, limos y arcillas; y 5% de materia orgánica.

El suelo ideal en un medio agrícola; además de la composición recién citada, debe cumplir con indicadores de salud, los cuales se relacionan con la disponibilidad de nutrientes, la facilidad de trabajarlos, la reserva de oxígeno para las raíces, la capacidad de retención de nutrientes, la toxicidad, la salinidad, el buen drenaje y las condiciones de enraizamiento.

La FAO (2015) también indica que la salud del suelo en medios naturales depende del estado de la cobertura.

No todas las funciones se encuentran en un equilibrio perfecto. Pero la relación de la vegetación clímax en un suelo clímax puede indicar un equilibrio ideal. La vegetación clímax es la vegetación que se desarrolla en condiciones ambientales óptimas y, por supuesto, edáficas.

La medición de la salud del suelo abarca elementos de física, química y bioquímica presentes en él.

Desde la perspectiva física, se evalúan los siguientes parámetros:

- ausencia del sellado y encostramiento;
- ausencia de ambas erosiones, las hídricas y las eólicas, y su efecto en la profundidad y
- ausencia de compactación.

Desde la perspectiva química, se evalúan tres elementos:

- agotamiento de nutrientes del suelo,
- exceso de sales o salinización y
- contaminación química.

CONCEPTOS

ultisoles. Se refiere a suelos viejos meteorizados. Los suelos ultisoles, generalmente, son rojizos con presencia de arcillas; en países centroamericanos, son muy comunes y, con un adecuado manejo, muy productivos.

suelos no disturbados. Se trata de suelos no intervenidos por el ser humano o se encuentra en estado de conservación.

• CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

ATENCIÓN

Alrededor de 60 % de los suelos se encuentra degradado a nivel mundial. (FAO, SETIEMBRE 2015).

Los suelos son un recurso no renovable. Su conservación es esencial para la seguridad alimentaria y un futuro sostenible.

Un suelo ideal equivale a un suelo sano, el cual también cumple sus funciones ecosistémicas, tales como infiltración del agua, hábitat para flora y fauna, producción de alimentos para los organismos del ecosistema, conservación de sus características y capacidad de degradar cualquier material orgánico a sus componentes simples (PEÑA CORDERO, 2017).

Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables (FAO, 2015).



EN LA RED...

SUELOS SUPRESORES

Para conocer más del tema de suelos supresores, se recomienda leer el artículo «Inducción de supresividad a fitopatógenos del suelo. Un enfoque holístico al control biológico», escrito por Juan Bautista-Calle, Roberto García-Espinosa, Jesús Pérez-Moreno, Emma Zavaleta-Mejía, Roberto Montes-Belmont y Ronald Ferrera-Cerato, y publicado en la revista *Interciencia* [VOL. 33, N.º 2, 96-102]. Puede accederlo en la siguiente dirección: <http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000200005&lng=es&tlang=es> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.



Desde la perspectiva bioquímica, se valoran indicadores biológicos, entre ellos:

- relación de carbono y nitrógeno;
- mineralización del nitrógeno;
- respiración del suelo;
- conteo microbiano;
- actividades enzimáticas y
- observación de fauna, por ejemplo, las lombrices.

Estas últimas características (las biológicas) son las más sensibles del ecosistema y las que más se alteran en el medio edáfico cuando hay disturbios antropogénicos.

Los ciclos biogeoquímicos y la vida microbiana en el planeta están poco estudiados y entendidos, se estima que se encuentran hasta $4 \cdot 10^6$ diferentes taxones (taxa en latín) de especies bacterianas en el suelo y que se ha obviado el papel que cumplen. En la actualidad, se trabaja el tema en relación con la microbiología del suelo y su relevancia en la salud de este. También, se ha creado el término de suelos supresores (Hernández, Velázquez y Orozco, 2010: son aquellos donde ciertas enfermedades vegetales no progresan, aun cuando el fitopatógeno se halle presente (VAN ELSAS ET AL., 2008, CITADO POR HERNÁNDEZ-LEÓN, VELÁZQUEZ-SEPÚLVEDA Y OROZCO-MOSQUEDA, 2010).

RESUMEN

La edafología tiene por objeto el estudio del suelo. La definición de edafología varía según los límites y las formas de análisis que se le adjudiquen. Por consiguiente, el concepto del término en cuestión ha cambiado con el tiempo, de acuerdo con las corrientes de pensamiento y las escuelas que predominen en una época determinada.

La historia de la edafología se divide en tres etapas: 1) la precientífica, en la que los conocimientos son dispersos y entremezclados con ideas de tipo filosófico-religioso; 2) inicia después de la aparición del método científico y de su aplicación al suelo; en vista de que este se relaciona con todas las ciencias; 3) la etapa de definición de la ciencia (del suelo), basada en la aparición de nuevos instrumentos de trabajo.



El suelo es la capa superficial de la corteza terrestre y se halla compuesto por elementos sólidos, líquidos y gaseosos. Cumple cuatro funciones prioritarias en el ecosistema: filtrar, degradar, servir de hábitat para flora y fauna, y producir alimentos. Se forma por la alteración del material parental, favorecida por cinco factores: la roca madre, los organismos vivos, el relieve, el clima y el tiempo. Además, existen otros procesos de formación, los cuales son: fraccionamiento, alteración, translocación y edición y remoción.

En el fraccionamiento, trabajan los procesos de meteorización física. En la alteración, la meteorización química degrada el material y modifica su estructura y su composición química, lo que termina formando perfiles de suelo variables en cada área, según los factores edáficos que interactúen.

El conjunto de horizontes del suelo forma el perfil del suelo. Cada horizonte o capa posee características físicas, químicas y biológicas diferentes y valiosas.





EJERCICIOS DE AUTOEVALUACIÓN

- I. SELECCIÓN ÚNICA.** En cada ítem, marque la letra de la respuesta que corresponde con el enunciado.
- A. La ciencia que estudia la naturaleza y las condiciones de los suelos en relación con las plantas se denomina:
 - 1. Edafología
 - 2. Ciencias del suelo
 - 3. Agroecología del suelo
 - 4. Pedología
 - B. El concepto de tierra, según la FAO, es:
 - 1. Superficie de la corteza terrestre
 - 2. Parte mineral del suelo
 - 3. Parte orgánica del suelo
 - 4. Superficie terrestre que toma en cuenta el clima, el suelo y las formas del terreno
 - C. La edafización en el suelo se relaciona con la intervención de factores climáticos y biológicos en este. El lugar donde se lleva a cabo ese proceso es:
 - 1. Superficie terrestre solamente
 - 2. Superficie terrestre y en la roca madre
 - 3. Superficie terrestre y disminuye conforme se profundiza
 - 4. Superficie terrestre y aumenta conforme se profundiza
 - D. En Costa Rica, existen diferentes tipos de rocas las cuales se caracterizan por su composición mineral. Las rocas formadas a partir de rocas que sufren procesos de transformación de estructuras y de composición química se denominan:
 - 1. Metamórficas
 - 2. Sedimentarias
 - 3. Ígneas
 - 4. Intrusivas
 - E. Los pares de capas superficiales de suelos característicos de los bosques naturales no disturbados son los siguientes:
 - 1. A y B
 - 2. O y H
 - 3. E y H
 - 4. O y B





II. FALSO O VERDADERO. Escriba en el espacio en blanco una «F» si la afirmación es falsa o una «V», si esta es verdadera. Recuerde justificar brevemente las afirmaciones falsas.

- A. [] La ley del mínimo hace referencia a que un buen rendimiento de un cultivo se puede alcanzar si se dispone de una cantidad adecuada de todos los elementos.
- B. [] Los trabajos de los científicos Charles Darwin y Justus von Liebieg en microbiología de suelos y geografía representan el origen de la edafología como ciencia.
- C. [] La edafización en el suelo ocurre de forma homogénea desde la superficie hasta llegar al material geológico parental.
- D. [] El suelo cumple con varias funciones básicas, las cuales son: capacidad de filtrar, de degradar, de producir alimentos y de mantener un equilibrio ambiental.
- E. [] El perfil del suelo inicia su formación con la acción de tres procesos formadores, los cuales son: tiempo, clima y relieve.

III. RESPUESTA BREVE. Conteste, en forma clara y concisa, lo que se le solicita a continuación.

En el cuadro que se adjunta, incluya el símbolo y la descripción que corresponde a cada horizonte señalado en la figura.

LETRA	DESCRIPCIÓN	HORIZONTE (SÍMBOLO)	HORIZONTE (DEFINICIÓN)
A.	Presencia de material orgánico		
B.	Con presencia de cutanes		
C.	Transición de horizonte anterior con el siguiente		
D.	Roca pura		

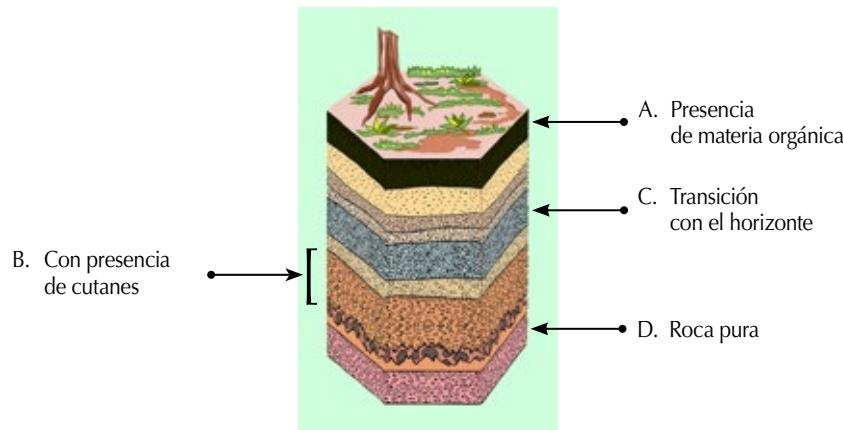


ILUSTRACIÓN de Franco Céspedes



RESPUESTA A LOS EJERCICIOS DE AUTOEVALUACIÓN

I. SELECCIÓN ÚNICA

A	B	C	D	E
1.	4.	3.	1.	2.

II. FALSO O VERDADERO

A	B	C	D	E
V	F Son los de Dokucháyev	F Es de forma heterogénea.	V	F Son cinco factores formadores (clima, tiempo, material parental, organismos, relieve) y uno extra (ser humano), según el ambiente.

III. RESPUESTA BREVE.

 Con base en la figura, el símbolo y el concepto de cada horizonte se muestran en el siguiente cuadro:

LETRA	HORIZONTE (SÍMBOLO)	HORIZONTE (DEFINICIÓN)
A.	Ah	Horizonte A con presencia de humus
B.	AB	Horizonte A con transición de B
C.	Bt	Horizonte B menos desarrollado, con cúmulos de arcilla por migración
D.	R	Roca madre





CAPÍTULO SEGUNDO

PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL SUELO

SUMARIO

- Fertilidad del suelo
- Muestreo de los suelos
- Propiedades físicas del suelo
- Propiedades químicas del suelo
- Propiedades biológicas del suelo

SINOPSIS

Para conocer adecuadamente un suelo se debe de analizar las propiedades físicas, químicas y biológicas y su interacción con las múltiples funciones que este cumple. Al ser el suelo un recurso donde suceden múltiples procesos naturales y estos están en continuo cambio, es necesario conocer e identificar los condicionantes o modificadores de las propiedades de los suelos, a fin atender de mejor forma cómo influyen sobre el desarrollo de las plantas, actividades humanas y comunidades biológicas. El conocimiento que tengamos del suelo podrá ayudarnos a modificar, mantener o recuperar cada una de estas propiedades y así establecer parámetros más claros sobre la calidad de suelos. El monitoreo de cada una de las propiedades debe ser parte de un programa de preventión de degradación de este recurso y, además, parte de la programación de monitoreo de los sistemas productivos que buscan ser más eficientes y sostenibles.





OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

OBJETIVO GENERAL

Analizar e identificar las diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y sus interacciones sobre los factores bióticos y abióticos del ecosistema

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Al finalizar el estudio del presente capítulo, el educando estará en capacidad de:

1. Explicar las propiedades físicas de los suelos.
2. Relacionar las condiciones de los suelos con sus características físicas.
3. Reconocer los principales procesos químicos que suceden en el suelo y su relación con las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.
4. Identificar los factores involucrados en la disponibilidad de nutrientes de las plantas.
5. Describir la incidencia del pH y la acidez de los suelos sobre las plantas.
6. Analizar la participación de la materia orgánica y la actividad microbiana en el suelo.
7. Estimar la importancia de los parámetros biológicos sobre la calidad de suelo.
8. Diferenciar los tipos de abonos orgánicos y sus calidades.
9. Justificar la importancia de los biocontroladores y los bioestimulantes en el suelo.

CONCEPTOS CLAVE

- **fertilidad**
- **agroecosistemas**
- **muestreo de suelos**
- **propiedades físicas**
- **textura del suelo**
- **humedad en el suelo**
- **propiedades químicas**
- **pH**
- **acidez**
- **intercambio catiónico**
- **conductividad eléctrica**
- **evaluación de la fertilidad**
- **propiedades biológicas**
- **microorganismos**
- **materia orgánica**
- **bioestimulantes**
- **biocontroladores**
- **abonos orgánicos**
- **influencia del trópico**
- **suelos no disturbados**
- **suelo ideal**





INTRODUCCIÓN

La Carta Mundial de los Suelos, promulgada por la FAO (2015), recalca que los suelos son fundamentales para la vida en la Tierra, pero las presiones sobre sus recursos alcanzan límites críticos y, solamente, mediante una gestión cuidadosa se podrán salvaguardar los servicios ecosistémicos y la biodiversidad que se desarrollan en ellos.

El conocimiento de este cuerpo natural y sus propiedades químicas, físicas y biológicas son esenciales para la toma de decisiones integrales sobre las prácticas y las actividades implementadas en él. Sus características, además, son relevantes para los estudios de calidad de suelos en las cuencas hidrográficas, así como para los de la relación suelo-planta de ecosistemas y comunidades vegetales y animales particulares. Estas cualidades son inherentes y dinámicas; en consecuencia, la calidad del suelo se halla enlazada a cumplir sus funciones en el ecosistema desde la perspectiva ambiental y humana (FAO, 2015).

Los atributos de los suelos pueden variar mucho de una zona a otra. No obstante, el entendimiento de ellos, de forma conjunta, permitirá plantear un manejo integral de los ecosistemas o hábitats y de los recursos que ahí convergen.

I. **Fertilidad del suelo**

La fertilidad del suelo es parte fundamental en el desarrollo de la vida del planeta Tierra, ya que gracias al ciclo de los elementos en el suelo se permite el desarrollo tanto de las plantas y árboles en los ecosistemas naturales y de los cultivos en los sistemas agrícolas. Por ello, que en este apartado se desarrollará y analizará ampliamente este concepto de forma integral, a fin de ser aplicado como un indicador de salud del suelo y a su vez plantear el manejo pleno de los ecosistemas o hábitats, en adición de los recursos que ahí convergen.

EN LA RED...

DÍA MUNDIAL DEL SUELO

La Unión Internacional de las Ciencias del Suelo (IUSS, por sus siglas en inglés) elaboró una resolución en 2002 para declarar el 5 de diciembre como el Día Mundial del Suelo, «con el fin de resaltar su importancia de este recurso como un componente crítico del sistema natural y su contribución vital al bienestar de la humanidad». Entonces, en la Conferencia de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en junio de 2013, cuando se declaró el día mundial de este recurso.

Para más información, acceda al siguiente sitio: <<https://www.un.org/es/observances/world-soil-day>> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.



**ATENCIÓN**

En la teoría de sistemas, en un contexto agroecológico, el suelo es parte fundamental de un sistema que, el cual, integra el subsistema de los elementos bióticos y abióticos que cumplen funciones en el ciclo del agua, la degradación de la materia orgánica, la disponibilidad, la pérdida o fijación de nutrientes y también en el auge de microorganismos edáficos. La estructura básica de un sistema está compuesto por elementos o componentes, relaciones entre los elementos y los límites. En ellos suceden flujos de materia o energía, relaciones causales entre partes de sistema y hay retroalimentación.

A. FERTILIDAD EN LOS ECOSISTEMAS NATURALES Y EN LOS AGROECOSISTEMAS

Los suelos, por ser un recurso natural imprescindible del ecosistema, desempeñan una función primordial en el reciclaje de los nutrientes necesarios para el desarrollo de la flora en cualquier hábitat de la Tierra.

Como se enfatizó en el primer capítulo, los suelos constituyen sistemas complejos que se forman en la superficie de la corteza terrestre. Gracias a sus propiedades químicas, físicas y biológicas, las cuales contribuyen a la regulación de un sinfín de acciones, albergan gran parte de la biodiversidad del planeta y determinan el desarrollo de la flora terrestre.

A fin de que el desarrollo de las plantas acontezca adecuadamente, la composición del suelo es fundamental pues el suelo proporciona la nutrición necesaria para que prospere el ecosistema terrestre: en otras palabras, ofrece al medio una fertilidad natural.

La fertilidad del suelo se deriva de las acciones de los factores generadores de esta capa de la corteza terrestre. Por lo tanto, en última instancia, depende de las circunstancias que sucedieron en la materia parental sobre la cual se formó. La fertilidad química del suelo varía según sus propiedades físicas y biológicas.

En un ecosistema natural, la fertilidad se basa en los flujos de energía y materia. De forma general, el tema se puede explicar de la siguiente manera: los flujos inician cuando la energía solar es utilizada por los organismos autótrofos, en conjunto con materiales del suelo, y producen alimento para otros organismos como los herbívoros. Estos, a su vez, constituyen el alimento de otros seres vivos como los omnívoros y carnívoros. Los organismos descomponedores actúan sobre los organismos mencionados que concluyeron su ciclo de vida y, en el proceso de degradación, se libera material en forma de minerales. Estos últimos nuevamente, serán aprovechados por los organismos autótrofos con participación de la energía solar: inicia, una vez más, el ciclo. Ese suceso ocurre en un sistema que visualmente no tiene un límite, pero que se puede contextualizar en el planeta Tierra. Veamos un ejemplo:

**ATENCIÓN**

La fertilidad química del suelo se deriva de la combinación de los factores formadores del suelo (material parental, relieve, microorganismos, tiempo y clima) en cualquier tipo de sistemas (ambientes disturbados o no disturbados por el ser humano). Estos conceptos se desarrollaron ampliamente en el capítulo primero.





En un agropaisaje o una zona boscosa, la energía solar crea la biomasa (reserva) y la incrementa (ingresos); esta, una vez terminado su ciclo de vida, deposita material vegetal, el cual se transfiere como material húmico que se mantiene en el horizonte O. El material húmico se puede perder a causa de procesos de erosión y de respiración (pérdidas).

La Figura 22 ilustra la cadena de flujos de entradas y salidas de materiales y también las transferencias de material en un sistema boscoso natural; asimismo, resalta la importancia del ciclaje de nutrientes en los sistemas boscosos, como entradas y transferencias del sistema. En los bosques de Costa Rica, la situación ha sido muy estudiada. Ernesto A. Alfaro, Alfredo Alvarado y Adelaida Chaverri (2001) realizaron una investigación sobre los aportes de nutrientes a los suelos de la región guanacasteca a partir de dos escenarios: un bosque seco tropical seco de 17 años y otro de 13 años, y en comparación con los suelos de pastos de la sabana guanacasteca. Observaron que las entradas y las trasferencias

CONCEPTO

horizonte O. Horizonte orgánico que se desarrolla sobre el horizonte A. Se considera orgánico porque contiene gran cantidad de material orgánico descompuesto en combinación con el material mineral. La descripción de los horizontes fue expuesta ampliamente en el Capítulo 1.

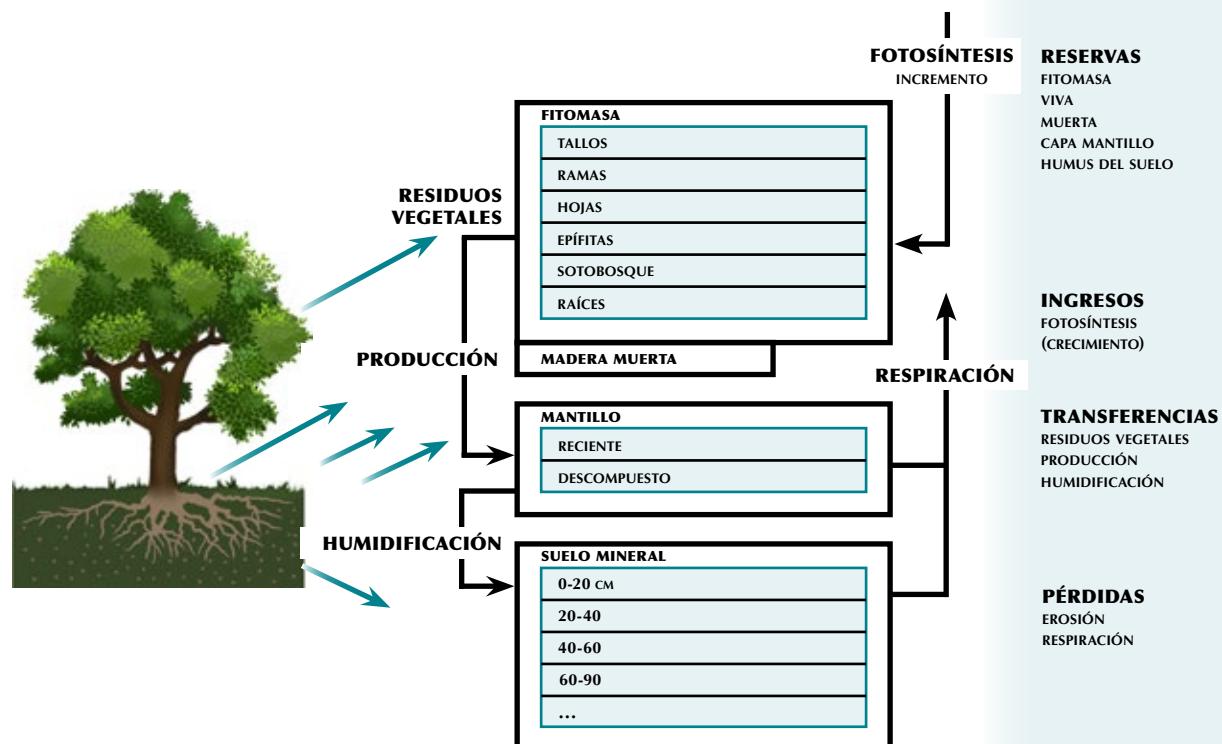


FIGURA 22. ECOSISTEMA NATURAL Y MATERIA ORGÁNICA. Modelo esquemático del material orgánico en un sistema natural que muestra las reservas: representadas por el mantillo, la fitomasa y el humus; los ingresos: la fitomasa que crece mediante el proceso de la fotosíntesis; las transferencias: equivalentes al proceso de producción y humificación de los residuos vegetales; y las pérdidas del material orgánico en un ecosistema natural que salen por erosión o respiración.

FUENTE: basada en *Modelos edafológicos de sistemas agroforestales*, de H.W. Fassbender. Centro Agrónomico Tropical de Investigación (CATIE. 1993, p. 23). Reproducida con fines educativos.

**ATENCIÓN**

El ingreso de material orgánico como la hojarasca es la principal entrada de nutrientes al suelo en un ecosistema natural; por lo tanto, la mayoría de las comunidades vegetales son dependientes del reciclaje de los nutrientes que suceden a partir de la descomposición de este conjunto de hojas.

son mayores en los sistemas naturales, ya que estas permiten un reciclaje de nutrientes constante: el mantillo de ambos bosques contiene más elementos –como nitrógeno, calcio, magnesio y manganeso– que el aporte total de nutrientes en los suelos de pastos de la sabana guanacasteca.

Como ya se mencionó, el planeta tiene entradas y salidas que se mantienen sujetas a los otros componentes abióticos y bióticos del sistema. Las interacciones entre los componentes bióticos son de los siguientes tipos: sinérgicas, antagónicas y neutrales.

Las **relaciones sinérgicas** son aquellas en las que dos poblaciones de organismos se unen para generar o activar procesos que las poblaciones por sí solas no podrían hacer. Los controladores biológicos en un agroecosistema, en general, mantienen este tipo de relaciones (CDR. 6).

En las **relaciones antagónicas** dos poblaciones diferentes interactúan y una de ellas es afectada negativamente; por ejemplo, los hongos que parasitan o los que generan antibiosis sobre otros organismos. Y, por último, las relaciones neutrales son los vínculos en que no hay ningún perjuicio ni beneficio para los organismos involucrados.

FUENTE: Agroecología: teoría y práctica para una agricultura sostenible, de Miguel A. Altieri y Clara I. Nichoells (2000, p. 5).

B. FACTORES QUE AFECTAN LA FERTILIDAD DEL SUELO

En el apartado anterior, se explicó sobre la dependencia que tiene la fertilidad natural del ecosistema: se halla de manera intrínseca ligada al flujo de energías en el interior de este; y en el momento que cualquiera de las entradas, transferencias o pérdidas se disturbe, el sistema deja de funcionar adecuadamente.

El deterioro de la fertilidad del suelo es el efecto de su **degradación**, ocasionada por la erosión que causa carencia de nutrientes en el sistema. A pesar de que la erosión es parte de las transferencias de energía que ocurren de un lado hacia otro en un sistema, cuando los eventos son significativos, los efectos son

**ATENCIÓN**

El deterioro de propiedades físicas, químicas y, en especial, biológicas de un suelo es un indicador de pérdida de fertilidad y de calidad. Las biológicas determinan la asimilación de nutrientes por parte de las plantas y de muchas otras funciones biogeoquímicas primordiales en el ciclo de nutrientes.



catastróficos en términos de pérdida del recurso como tal, especialmente de la materia orgánica y de la fertilidad.

A modo de ejemplo: en suelos andisoles profundos, con texturas franco-arenosas en pendientes de 30%, son muy propensos a perder material ante la ausencia de estrategias de manejo de erosión y escorrentía. Por lo tanto, debería evitarse sembrar hortalizas y tratar de sembrar plantas semiperennes o perennes, en sistemas de contornos con estructuras como terrazas, en aras de evitar el movimiento de tierra. Este tema se ampliará en el Capítulo 4.

Para evaluar el detrimiento en las propiedades de un sistema, es necesario valorar sus elementos en el sistema, como la repercusión de la hojarasca en los ecosistemas; por ejemplo, los mantillos de pino natural en zonas de Argentina y de otro tipo de árboles en países nórdicos: si bien este humus se puede usar en la industria como sustrato, representa una extracción significativa de material, que afecta los flujos de energía del suelo y, por ende, altera la fertilidad natural del medio.

Los modelos actuales de producción y de manejo de suelos y de ecosistemas no han sido los correctos. Es necesaria una readecuación integral de esos sistemas para que las interacciones que en ellos suceden posean menos alteraciones. Los modelos agroecológicos, por su parte, buscan fortalecer ese tipo de relaciones en su sistema.

Aunque los **modelos agroecológicos** no son sistemas que se comporten como ecosistemas naturales porque existe una intervención humana que también ocasiona desbalances, tienden a ser más amigables con el medio ambiente que los sistemas convencionales de producción y permiten que las relaciones bióticas ocurran adecuadamente. En los sistemas convencionales, las salidas de cosechas, la lixiviación de nutrientes del suelo, la contaminación por acumulación de rastrojos, así como la aplicación de cualquier tipo de plaguicida de origen químico u orgánico son causas de desbalances ecológicos. Por ejemplo, la utilización de agroquímicos que combaten plagas insectiles en un campo agrícola no solo acarrean la disminución de los insectos plaga, sino también la de otros insectos y microorganismos que pueden ser los mismos **controladores biológicos** de las plagas que se están combatiendo o aquellos que provocan desbalances en el entorno y generan más



CONCEPTOS

degradación del suelo.

Cambio de una o más de sus propiedades a condiciones de menor utilidad, por medio de procesos físicos, químicos y biológicos. Por ejemplo, un suelo degradado es cuando por acción de labranza intensiva el suelo pierde parte de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, tales como estructura, densidad, disminución de fertilidad o baja población de microrganismos. De la misma forma sucedería por exceso de fertilizantes, los cuales se traducen en reducción de fertilidad del suelo y afectación de funciones.

agroecología. Disciplina científica que enfoca el estudio de la agricultura desde la perspectiva ecológica. Este sistema busca la producción de alimentos de manera sostenible sin la utilización de agroquímicos y también procura la justicia social y la seguridad alimentaria.

controlador biológico. Método de manejo de plagas o enfermedades en sistemas agrícolas con la aplicación de organismos vivos que funcionan como enemigos naturales para reducir las poblaciones de las plagas o enfermedades.



CONCEPTOS

soberanía alimentaria.

Facultad para la toma de decisiones sobre políticas de desarrollo agrario y alimentario. La soberanía alimentaria se relaciona con las decisiones políticas del Estado al decidir cómo y qué va a producir, según los objetivos de desarrollo de su región o nación.

seguridad alimentaria.

Disponibilidad de alimentos, acceso –físico, social, económico– de las personas y aprovechamiento biológico de estos. El término de seguridad alimentaria persigue tener acceso sobre los alimentos sanos e inocuos en todo momento a todo el mundo y, en especial, a grupos de personas vulnerables (en extrema pobreza, mujeres, adultos mayores, entre otros).



ATENCIÓN

Los huertos urbanos o caseros son una forma de adaptarse y disminuir los impactos al cambio climático desde el hogar y de mantener la biodiversidad y la salud del suelo.

Las experiencias y las condiciones que tenemos en la actualidad nos indican que cada país debe trabajar sobre los sistemas de producción de su región, a fin de generar disponibilidad de alimentos para todos, pero bajo una modalidad de agricultura ecológica y sostenible, con adaptación al cambio climático y no dependiente de insumos derivados del petróleo. Todo apoyado en los principios ecológicos, para resguardar la protección de los recursos naturales: agua, suelo, flora y fauna.

susceptibilidad a la planta para combatir plagas y enfermedades. Por lo tanto, para solucionar el problema de las plagas en un sistema productivo, se debe analizar la situación de manera integral, al estudiar el medio donde se desenvuelve la plaga.

Entonces, a medida que se utilicen prácticas leales con el ambiente, el agroecosistema y el ecosistema circundante son menos afectados y, por ello, es posible mantener la productividad de los sistemas.

Lo vital es buscar la estabilidad del sistema, la cual se logra cuando se considera la diversidad en términos de especies, de genética y de funcionalidad en el sistema, además del paisaje, y se explora la heterogeneidad en el espacio y el tiempo del sistema (Gliessmann, 2000). Este tipo de estabilidad también permite desarrollar **soberanía alimentaria** y activar las economías locales que, a su vez, generan menos dependencia externa, al tiempo que logran **seguridad alimentaria** y la protección de los mercados locales.

Es preciso visualizar los paisajes agrícolas y los pecuarios e, incluso, los urbanos como centros de diversidad. Los esquemas de crear diferentes hábitats en los espacios, de rotar cultivos o plantas ornamentales, de utilizar coberturas vegetales en zonas de ladera o en desuso, de fertilización de tipo orgánico, mejorar los corredores biológicos y parques para que alberguen diversidad arbórea y conserven el suelo son dinámicas de mejoras.

II. *Muestreo de los suelos*

El seguimiento del protocolo de muestreo de suelos, en relación con el análisis de propiedades físicas, químicas y biológicas, es fundamental para determinar la calidad de los datos y reducir la incertidumbre o el error proveniente de la metodología, en otras palabras, es prioritario colectar una muestra de campo realmente representativa de la realidad.

La importancia de una buena metodología y ejecución del muestreo de suelo se basa en que a un laboratorio de análisis del suelo se entregan cerca de 500 g de suelo proveniente de una muestra compuesta (unión de submuestras); y de esa cantidad solo se analizan alrededor de 2,5 g de suelo. ¿Por qué razón? Se entregan 500 gramos debido a que los laboratorios tienen protocolos establecidos; las



muestras enviadas generalmente son analizadas hasta tres veces y parte del sobrante del suelo se reserva para garantía del resultado. De los 500 g solo se analizan 2,5 g porque los equipos utilizados, normalmente, solo necesitan cantidades pequeñas. Por lo tanto, debido a que la muestra de suelo que se utiliza para análisis es tan pequeña en relación con la cantidad de suelo de estudio, se necesita realizar un muestreo adecuado para tomar una muestra compuesta que de verdad sea representativa del sitio de estudio.

El protocolo de muestreo le permitirá al investigador colectar muestras de suelos que serán sometidas a análisis físicos, químicos y biológicos en los laboratorios especializados. Para cada uno de esos análisis, existen requerimientos previos al muestreo. De manera general, se solicita que las muestras se conserven en frío o que se transporten rápidamente al laboratorio. Para los muestreos de las propiedades biológicas, como el conteo de hongos, actinomicetos y bacterias, lo ideal es que el suelo se mantenga en un área fresca y no pasen más de 48 horas entre la colecta y el proceso de análisis en el laboratorio.

Normalmente, en la toma de muestras o submuestras se deben considerar varios elementos para definir una metodología de toma de muestras y el número de submuestras por obtener. Entre ellos están los siguientes:

- **Objetivo del estudio.** Definir si el estudio es para describir las propiedades físicas, químicas, biológicas o por horizonte.
- **Grado de especificidad del estudio.** Dependiendo de cuán específicas sean las propiedades edáficas que se quiera analizar, así se debe muestrear el suelo. Por ejemplo, la influencia del carbón orgánico en suelos bajo la copa de diferentes árboles, los muestreos deben ser de solo el elemento de interés, bajo esa misma circunstancia, a la profundidad que se estime.
- **Dimensiones del área.** Concerne si el análisis del suelo está dirigido para una parcela agrícola o para forestales con dimensiones de una hectárea (1 ha) o más, o bien, para suelos contenidos en macetas.
- **Fisiografía del paisaje.** La colecta de muestras va de acuerdo con el relieve de la zona y el número de submuestras.
- **Fertilidad de suelos.** Esto obedece, netamente, del objetivo al investigador y al conocimiento del cultivo, al hallarse de manera general el análisis de pH, acidez, calcio, potasio, magnesio, fósforo, cobre,

EN LA RED...

AGROECOLOGÍA

Si desea ampliar su conocimiento sobre Agroecología, se recomienda leer la siguiente obra: *Agroecología: teoría y práctica para una agricultura sustentable*, de Miguel A. Altieri y Clara I. Nicholls.

Para más comodidad, puede accederlo en la siguiente dirección: <https://www.icia.es/icia/download/Agroecolog%C3%ADa/Material/Teoria_agricultura_sustentable.pdf> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.



ATENCIÓN

El número de muestras debe ser analizado según las características del lugar y según los objetivos del estudio y grado de especificidad que en esta sección se analizan. A manera general, se recomienda que para un área homogénea solo se lleve una muestra de suelo por horizonte o sitio de interés de 500 g, que no contenga piedras o raíces y que esté determinada por al menos 20-30 submuestras.

**ATENCIÓN**

Las submuestras son las muestras de suelo colectado en cada uno de los puntos de muestreo y una muestra compuesta es el conjunto de submuestras de un área homogénea, que son previamente preparadas para ser enviadas a un laboratorio. Generalmente se recolectan entre 20-30 submuestras, con un peso total de 500 g de suelo.

cinc, manganeso y hierro. Si existe el interés de otros elementos y estos son de más movilidad, puede ser que cambie la profundidad de estudio y la solicitud de análisis de laboratorio.

Por ejemplo, si el objetivo de la investigación es caracterizar el sistema edáfico de una zona de manglar, se debe precisar inicialmente a qué profundidad se muestrearán y la necesidad de muestrear por horizontes. Asimismo, hay que conocer las dimensiones del área de manglar y averiguar si hay diferencias entre áreas, ya sea por vegetación, topografía, pendiente, presencia de cuerpos de agua o condiciones microclimáticas sustanciales. Luego, se realiza una inspección para definir las zonas de muestreo y el número de muestras. También se determina la profundidad efectiva y el equipo por utilizar. Para determinar las diferencias edáficas entre áreas se realiza un muestreo con un barreno para ver la variabilidad que se presenta en el área de estudio y definir formalmente las áreas homogéneas.

Para estos casos, lo más conveniente es contar con un mapa o croquis del área de estudio o herramientas de SIG (sistemas de información geográfica) y recorrer el área para explorar los siguientes atributos:

- **Tipos de suelos diferentes**, lo que corresponde a suelos con diferentes características de color, densidad, conformación y drenaje, entre otras.
- **Condiciones topográficas** no visibles en un mapa o en una hoja cartográfica, como por ejemplo los microrelieves en una llanura por variaciones de pendiente.
- **Diferencias en la fisiografía del área**; es decir, diferencias en el paisaje por vegetación o influencia humana.
- **Clases de texturas de suelo**, las cuales son variaciones en cambios de la composición de arenas, limos y arcillas.
- **Tipo de vegetación o cultivos**, especialmente en zonas donde se cultivan distintos productos o donde existe distinta composición vegetal en ecosistemas naturales. Se deben hacer diferencias por **etapa sucesional** de estadio de bosque (madurez de bosque, zona de vida, tipos de vegetación), por historial de manejo y por uso de suelo; por presencia de rodales o condiciones específicas de la vegetación en estudio. En el caso de cultivos, también es necesario contar con el historial de manejo del suelo y la edad del cultivo para valorar el número de muestras por edad y su historial de uso.

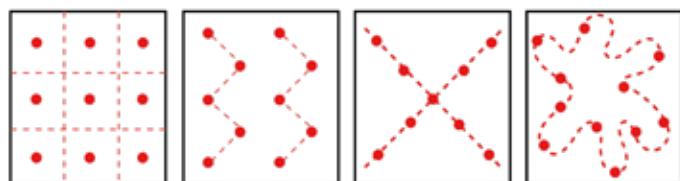
**CONCEPTO****etapa sucesional.**

Descripción de la fase de progresión del estado de una comunidad biológica; en el caso de las comunidades vegetales, se enfoca a estados de madurez de un bosque.

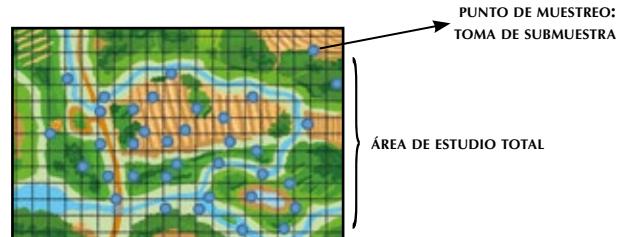


- **Riesgos de inundación**, al diferenciar zonas de anegamiento temporal o permanente. Además, se debe inspeccionar los drenajes internos y externos, así como la profundidad del nivel freático.
- **Pedregosidad, referente** a la cantidad de roca observada en el terreno. Se hace énfasis en la cantidad y el tamaño de piedra observada en el terreno.
- **Compactación**, vinculado con problemas de compactación en zonas por exceso de mecanización o área de carga o descarga de maquinaria pesada.
- **Presencia de pendientes pronunciadas** u ondulaciones del terreno, las cuales se asocian con cambios bruscos (+ de 30 %) en la topografía en el terreno.
- **Fertilidad aparente**, que se relaciona con áreas más o menos productivas, según observaciones de propietarios de terreno o por estudios de suelos anteriores.
- **Afectación por clima**, la cual puede variar por efectos de vientos o neblina, especialmente en áreas muy grandes.

El muestreo de suelo en el terreno se puede llevar a cabo de diferentes formas: sistemáticas o aleatorias. La primera define una línea por seguir dentro de la unidad de estudio (FIG. 23).



La segunda, el muestreo de forma aleatoria, por el contrario, es totalmente al azar y los puntos son representativos del área de muestreo, como se observa en la Figura 24.



Una vez definida la forma de muestreo, se indica el número de submuestras por área homogénea y el número de muestras totales, que se fija con base en los puntos antes comentados también y en relación con el objetivo y el presupuesto económico (FIG. 25).

ATENCIÓN

Se puede realizar un muestreo detallado mediante el uso de cuadriculas como se ve en la figura 24. Se deben tomar muestras puntuales en las áreas previamente definidas y georreferenciadas. Esta estrategia se utiliza en programas de agricultura de precisión, apoyados en sistemas de información geográfica; sin embargo, se debe considerar que el muestreo es más intensivo.

FIGURA 23. MODELOS SISTEMÁTICOS PARA MUESTREO DE SUELOS. Una buena metodología de muestreo define previamente la forma de llevar a cabo el muestreo, el cual puede ser de formas sistemáticas: tipo cuadrícula, en zig-zag, por líneas diagonales o sinuosa.

FUENTE: «Análisis de suelos: Guía Práctica de muestreo», I&D (Investigación y Desarrollo) 12 (5), de Juan M. Aloé y Mirta Toribio (2007). *Profértil*. Reproducida con fines educativos.

• PROPIEDADES DEL SUELO

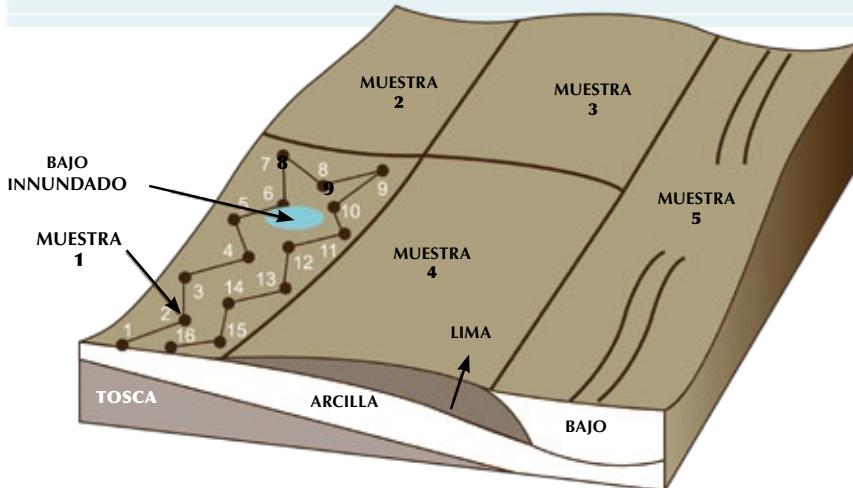
FIGURA 24. MUESTREO ALEATORIO EN SUELOS. El muestreo aleatorio es una forma de establecer una metodología de muestreo, en la cual los puntos se definen al azar por toda el área de estudio.

FUENTE: propuesta de Paola Brenes Rojas, en 2019.



FIGURA 25. ESQUEMA DE MUESTREO DE SUELOS. En un terreno de forma irregular, se deben de identificar las áreas homogéneas previamente para definir el número de muestras y submuestras. En el caso de fincas de cultivos agrícolas o forestales divididas por lote, se hacen muestreos individuales por área de producción con características homogéneas.

FUENTE: «Determinaciones en suelos: Instrucciones para tomar una muestra de suelo», de Olivero Duggan (2009). *Laboratorio SUELOFÉRIL*. Reproducida con fines educativos.



Cuando los muestreos son de áreas muy grandes y el objetivo es analizar variabilidad de suelos, como por ejemplo el estudio de los tipos de suelos presentes en un cantón, provincia o en un área de conservación, la determinación de los puntos de muestreo se define luego del montaje de fotografías aéreas y curvas de nivel, en un sistema de información geográfica (SIG). La profundidad del punto de muestreo va de acuerdo a la metodología definida de previo, según los manuales de taxonomía de suelos.

El **barreno**, la **pala** y el **palín** son parte del equipo necesario para el trabajo de campo de colección de las muestras de suelo. Adicionalmente, se recomienda llevar una cuerda y un nivel de albañil (o un clinómetro) para calcular la pendiente y un sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés) para estimar la posición geográfica y la altitud. Además, una zaranda o malla, para eliminar piedras o raíces de la muestra, un balde, una bolsa plástica grande y varias de tamaño pequeño que sirvan para colectar las submuestras de suelo, realizar el cuarteo y el empaque (Fig. 26).

Para determinar el porcentaje de pendiente en el campo se utiliza una cuerda y un nivel de albañil. Se mide la diferencia de alturas en una distancia determinada y se calcula la pendiente con la siguiente fórmula: **Porcentaje de pendiente = (diferencia de altura/longitud) • 100**. La determinación de las pendientes será discutida ampliamente en el Capítulo 4.

La profundidad del punto de muestreo se precisa según el cultivo y el objetivo del estudio, factores que determinan el nivel de especificidad que se requiera en esta característica. Para cultivos hortícolas, normalmente, se muestrea de 0 a 15 cm o de 0 a 20 cm;



CONCEPTOS

barreno. Herramienta con forma cilíndrica utilizada para extraer muestras de suelo de forma manual. Se usa especialmente para muestreos profundos y, en particular, permite obtener muestras sin alteración.

palín. Herramienta en forma de pala, hecha de acero, de forma alargada y cóncava, la cual es utilizada para recolectar o extraer materiales como suelo. Se usa especialmente para muestreos superficiales (0-20 cm)

cuarteo. Método que permite homogenizar las muestras de suelo. Se coloca toda una porción de suelo sobre un plástico limpio, para luego dividirlo en cuatro partes iguales. Se separa una o dos de ellas, preferiblemente las opuestas, hasta llegar a obtener una muestra de 500 gramos.



FIGURA 26. HERRAMIENTAS RECOMENDADAS PARA EL MUESTREO DE SUELOS:
A) barreno: utilizada para tomar muestras de suelo de los horizontes sin disturbar el suelo de la superficie; B) pala: para tomar muestras de suelo superficiales; C) palín: para tomar muestras de suelo superficiales; D) cuerda: hilo de nylon utilizado para colocar el nivel; E) nivel: guía establecer la horizontalidad o verticalidad de un elemento; F) Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés): instrumento tecnológico que permite ubicar la posición global satelital de un punto de ubicación; G) balde: recipiente utilizado para depositar las submuestras de suelo; H) maya o zaranda: para quitar piedras o raíces de las submuestras de suelo; I) bolsas de varios tamaños: envolturas utilizadas para depositar las muestras que van a ser transportadas al laboratorio.

FUENTE: propuesta de Paola Brenes Rojas, en 2019.

sin embargo, hay cultivos arbóreos en los que las raíces penetran más y, por lo tanto, se requiere fraccionar muestras de suelo por horizonte. Para suelos forestales, se recomiendan, como mínimo, las siguientes profundidades:

- Superficial: de 0-20 cm
- Zona intermedia del perfil de suelo: de 20-50 cm
- Zona profunda del perfil: mayor que 50 cm

La profundidad del punto de muestreo en suelos, para estudios generales asociados a un cultivo o planta, puede variar según la dinámica de crecimiento radicular y el tipo de estudio. Juan M. Aloé y Mirta Toribio (2007) hacen una compilación de valores de profundidad por grupo de cultivo para la toma de muestras (*CDR. 7, P. SIG.*). De manera general, las hortalizas y los pastos presentan crecimientos radiculares muy superficiales y bastantes ramificados, por consiguiente, la interacción, entre la raíces y el suelo, sucede en los primeros 20 cm.



CUADRO 7

PROFUNDIDAD DE MUESTREO
SEGÚN USO U OBJETIVO

USOS DEL LOTE-OBJETIVO DEL ENSAYO	PROFUNDIDAD
Praderas y pastos bajos	0-10 cm o 0-15 cm
Hortalizas	Solo la capa arable 0-15 cm o 0-20 cm
Cultivos con siembra directa Estudios de rutina Estudios detallados por horizonte	Evaluar por horizontes 0-10 cm, 10-20 cm o 20-40 cm.
Árboles frutales o fores- tales y cultivos de palma, entre otros	Suelo y subsuelo en 2 o 3 capas: 0-30 y 30-60 cm; 0-20, 20-40 y 40-60 cm; u otros intervalos de interés.

FUENTE: «Análisis de suelos: Guía práctica de muestreo», de Juan M. Aloé y Mirta Toribio. en *I&D* (investigación y desarrollo). Profértil.com.



CONCEPTO

autoecología. Estudio de las adaptaciones de una especie de manera individual a los factores externos (bióticos y abióticos) y las relaciones que suceden. Un ejemplo de la aplicación de la autoecología son los estudios edáficos que se realizan en el entorno donde se desarrollan las especies silvestres o autóctonas de un área de interés en aras de comprender las necesidades nutricionales o factores para su desarrollo en una etapa de análisis para su futura reproducción en vivero.

En el caso de las plantas arbóreas sus sistemas radiculares presentan una raíz principal bastante alargada que domina sobre las raíces secundarias; por eso, este tipo de plantas tiende a explorar más el subsuelo.

Para estudios más específicos es importante conocer la dinámica radicular de la especie en observación porque en este proceso la competencia por agua y nutrientes, así como las limitaciones en el subsuelo pueden influir en la distribución radicular y, en especial, de las raíces finas de los árboles en el suelo. Todo investigador debe conocer la **autoecología** de las especies es parte del conocimiento previo a un estudio

de la relación especie-suelo, ya que los factores genéticos son afectados por el medio ambiente en el que se desarrollan (Moreira y Fournier 2003). Es importante tomar en cuenta para valorar la profundidad, como es el caso del nitrógeno o el azufre; la movilidad de los nutrientes en sistemas agrícolas, se recomienda evaluar entre 60-80 cm de profundidad.

Como regla general, para los muestreos de suelo en terrenos de usos agrícolas o forestales no se recomienda incluir: sitios con acumulación de material vegetal, depósitos de excretas o aguas residuales de procesos industriales, zonas cercanas a inundaciones o drenajes, zonas contiguas a entradas de potreros, terrenos con huellas de tractor o de paso de animales y áreas limítrofes con cercas debido a que estos factores pueden alterar las propiedades químicas y físicas de los suelos y no representan el área en estudio como tal.

Las herramientas deben estar limpias y sin residuos de suelo u otro material, así como afiladas para que el corte sea más limpio. La muestra se toma siempre a la misma profundidad y en forma inclinada. Hay que tener presente lo siguiente: tomar todas las submuestras a la profundidad designada y limpiar los bordes externos del corte a nivel del suelo. Durante la recolección de la muestra, la limpieza se realiza con la finalidad de tener un muestreo más representativo y homogéneo (FIG. 27).

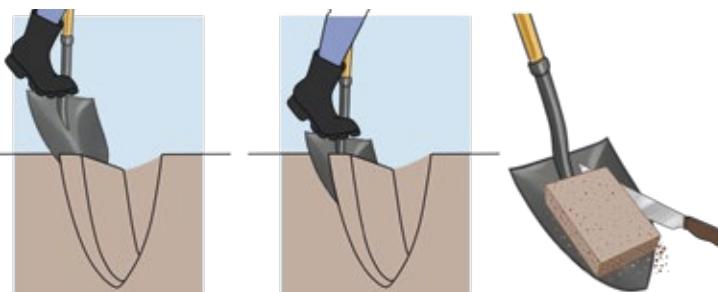


FIGURA 27. MÉTODO DE TOMA DE MUESTRA DE SUELO CON PALÍN. A) La forma adecuada de tomar una muestra de suelo se realiza al inclinar el palín, a fin de obtener un modelo en forma de «V» (uve). B) Una vez introducida la herramienta a la profundidad deseada, se realiza la limpieza de los extremos de la muestra.

FUENTE: adaptada de «Análisis de suelos: Guía Práctica de muestreo», &D (Investigación y Desarrollo) 12 (5), de Juan M. Aloé y Mirta Toribio (2007). Profertil. Reproducida con fines educativos.

Para un área homogénea, el número de submuestras recomendadas es de alrededor de 16-20 y se aconseja que el área máxima, por unidad homogénea, no sea superior a diez hectáreas (10 ha). Luego se colocan en un balde, se homogenizan y se les retiran piedras, raíces o cualquier otro material vegetal. Seguidamente, se tamizan por medio de mallas o zarandas. Ya preparadas, cada una se divide en cuatro partes; luego, hay que eliminar dos de ellas (la mitad de esa submuestra) al azar. El proceso continúa hasta obtener 500 g de suelo (FIG. 28).

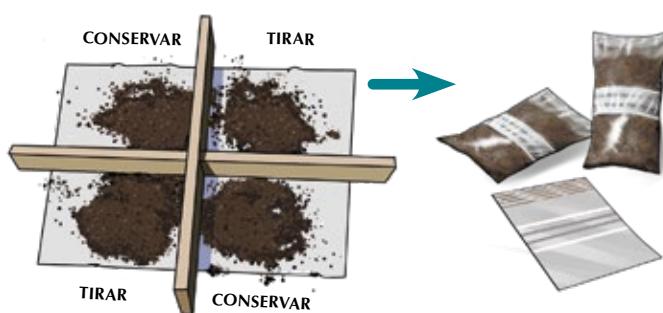


FIGURA 28. CUARTEO DE LA MUESTRA. Una vez unificadas todas las submuestras del área homogénea, se procede a realizar el cuarteo; el suelo se divide en cuatro partes para luego eliminar dos de ellas (la mitad de esa submuestra) al azar hasta llegar a obtener 500 g de suelo.

FUENTE: adaptada de «Muestreo de suelos» Artículo de divulgación, de De Bustos (2013). INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Reproducida con fines educativos.

Cada submuestra se almacena con la identificación del contenido; lo ideal es que se empaque en doble bolsa y que en el intermedio de ambas se agregue el papel con la referencia de la muestra y escrita con lápiz: código designado en la plantilla, nombre del investigador, sitio de la toma, cultivo, agroquímicos u otros datos que se requieran. Las submuestras y la muestra deben conservarse en un lugar fresco, en el campo; por lo tanto, se debe evitar su permanencia al sol, no debe esperarse más de 24 horas para ser enviada al laboratorio.

En el caso de ser muestras para estudio de microrganismos, se debe tener presente que son organismos vivos y lo ideal es que las muestras se lleven rápidamente; en caso de análisis químicos, lo ideal es que no pasen de 36 horas.

Generalmente, para el análisis químico de suelos, los muestreos solo se realizan en la capa arable; sin embargo, como se ex-

EN LA RED...

MUESTREO DE SUELOS

Observe el video «Análisis de Suelos: Muestreo de Suelos», producido por Audiovisuales UNED, para la Cátedra de Gestión Sostenible de Suelos (GESS) de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales (ECEN), en donde se hace una demostración sobre los procesos de toma de muestras de campo.

Accédalo en la siguiente dirección <https://www.youtube.com/watch?v=2aw-orlwWQw&list=PLeIX_dGDBCryE3Vt2Cbhl23XaNUXRH-q&index=4&t=0s> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.



• PROPIEDADES DEL SUELO



ACTIVIDAD

Realice un diagrama de flujo de actividades necesarias para la toma de muestras suelos para ser llevadas a un laboratorio.

**CONCEPTO**

calicata. Técnica utilizada en los estudios de suelo para conocer la génesis y exhibir de mejor forma los perfiles del suelo. Las dimensiones mínimas de una calicata son 1,5 m de ancho • 1,5 m largo • 2,0 m de profundidad. Además, se acostumbra realizar escalones para lograr ingresar a la fosa y, de esa manera, apreciar mejor los perfiles. Es conocido como el perfil modal o pedón.

plicó, si el objetivo del estudio es determinar el perfil edafológico, con fines de clasificación del suelo y conocer su génesis, es necesario construir una **calicata**.

La calicata es una de las técnicas utilizadas para conocer el génesis de los suelos y consiste en realizar una excavación en la superficie, con el fin de exhibir de mejor forma los perfiles del suelo y los cambios a través de él. A este método también se le llama «fosa de inspección», pedón o «perfil modal». Este tipo de concavidad proporciona una imagen de los tipos de suelos y de horizontes de suelo presentes en el terreno de trabajo. Con una calicata, se visualiza mejor el perfil de un suelo en su estado natural. Lo ideal es determinar ese perfil según sus variaciones de textura, densidad, color y material; para eso, se muestrea cada horizonte y una vez diferenciadas las capas u horizontes, se toman muestras para el laboratorio con la intención de evaluar las propiedades físicas, químicas y biológicas que se necesiten. Hay que realizar una descripción inicial, a partir de las características observadas en el sitio; a esa descripción se le llama popularmente «leer la calicata» y comprende la descripción del sitio, la toma de todos los parámetros de estudio y las características de cada capa. Con esta descripción, podemos clasificar taxonómicamente un suelo.

La ubicación de la calicata debe ser derivada del estudio previo del suelo para definir adecuadamente el lugar más representativo.

Las dimensiones aproximadas mínimas de una calicata son 1,5 m de ancho y largo y 2,0 m de profundidad o hasta llegar al material parental, a aguas subterráneas o a alguna limitante. En muchas ocasiones, se realizan escalones en la fosa para adecuar el ingreso a la fosa y mejorar la visión de los perfiles. Es indispensable considerar la posición del sol o de sombras por cobertura vegetal ya que dichos factores puede obstaculizar la visibilidad de los perfiles del suelo para su análisis. (FIG. 29).

En algunas ocasiones, por motivos de costos y de objetivo de estudio, no es necesario abrir una calicata de las dimensiones descritas anteriormente. Por tal razón, se recomienda realizar microcalicatas (fosas más pequeñas, entre 60 • 60 • 60 cm) para lectura e interpretación de los primeros horizontes. Posteriormente se hacen lecturas de los horizontes con el barreno para ver cambios en



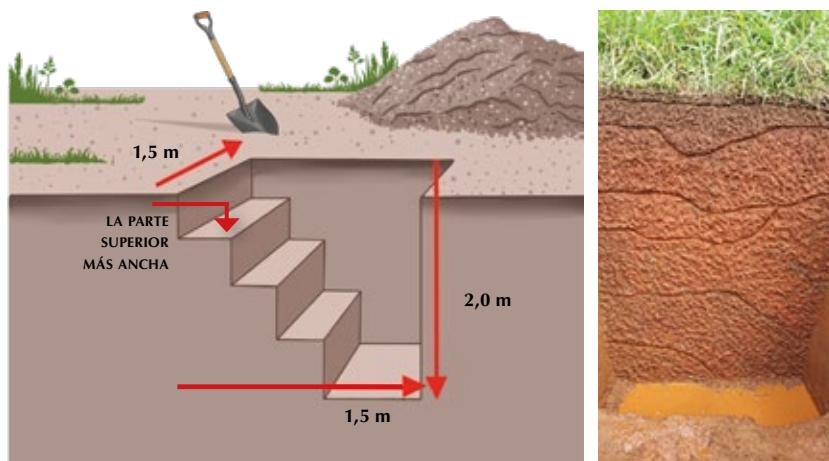
el suelo después de los 60 centímetros. La inspección por medio de este tipo de calicatas es ideal para identificar una zona homogénea, en estudios de suelos en territorios más grandes. Posteriormente, por medio de la interpretación de los puntos de muestro, se determina dónde se hace la apertura de la calicata, con el objetivo de determinar los órdenes de suelo en una provincia o cantón.

En esos casos, por medio del barreno se hacen determinaciones de puntos de muestreo y análisis de las descripciones de los horizontes y se abren microcalicatas para cada área homogénea o en cada cambio en especial. La determinación de los puntos de muestreo, de este tipo de estudios, deben de realizarse inicialmente por medio de un SIG, al delimitar marcas al azar de la región y precisar sitios de puntos de muestreo. Luego de las inspecciones de campo y de la colecta de muestras, se van adecuando los lugares de apertura de las distintas fosas.

A fin de documentar las observaciones en campo, durante un mapeo de suelos, se requiere llevar un documento, previamente elaborado, con la lista de datos a considerar. Entre las valoraciones se encuentran las características generales del lugar como la ubicación geográfica: dirección exacta, longitud, latitud y altitud (m s.n.m.) del área del muestreo.

Además, se debe realizar una descripción del perfil, en la unidad fisiográfica que se encuentra, con las siguientes consideraciones:

- a) pendiente (%) y dirección pendiente; b) topografía vecina (descripción general); c) temperatura edáfica y ambiental (°C); d) nivel freático (m); e) material parental principal por el cual está formado;



EN LA RED...

LA CALICATA

Observe el video «Clasificación de Suelos: La Calicata», producido por Audiovisuales UNED, para la Cátedra de Gestión Sostenible de Suelos (GeSS) de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales (ECEN), en donde se expone una reseña del proceso de la técnica de la calicata como procedimiento para conocer la génesis del suelo.

Accédalos en la siguiente dirección https://www.youtube.com/watch?v=qAAo23yeqRQ&list=PLeIX_dGDBCcryE3Vt2CbhL23XaNUXRH-q&index=1 o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.



FIGURA 29. DIMENSIONES DE LA CALICATA. Las dimensiones aproximadas mínimas de una calicata son 1,5 m de largo y ancho con una profundidad de 2,0 m o hasta llegar al material parental, a aguas subterráneas o a alguna limitante. La parte superior es más ancha para permitir la entrada a la calicata.

FUENTE: *Simple Methods for Aquaculture - Version 2*. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2006). Reproducida con fines educativos. Fotografía: cortesía de José Carlos Lacayo, Cobano, Puntarenas, perfil de suelo del orden Ultisol y se clasificó como un *Ustic Palehumults*.



f) material geológico; *g)* vegetación natural circundante (descripción general); *h)* uso actual de la tierra e intensidad; *i)* evidencias de erosión; *j)* limitantes en profundidad; *k)* presencia de drenajes (cauces de agua); *l)* inundaciones visibles; *m)* pedregosidad; *n)* régimen de humedad; *ñ)* zona de vida; *o)* clima (temperatura ambiental, viento, neblina); *p)* temperatura del suelo.

Después de realizar la descripción general, se debe efectuar una especificación del suelo que, para el caso del estudio de cada uno de los horizontes, genere una descripción que incluya: nomenclatura (nombre del horizonte); espesor (en metros); textura; color Munsell; estructura (tipo, clase, grado); consistencia (seco, húmedo o mojado); porosidad (tamaño de los poros y cantidad); presencia de raíces (tamaño y cantidad); existencia de manchas (color y cantidad); elementos (cantidad y tamaño); grietas (descripción); presencia de oxidación; existencia de acostamientos; cementación; limitantes y actividad microbiológica (presencia de microorganismos). Para una mejor comprensión, todos estos parámetros descriptivos van a ser estudiados, posteriormente, en este mismo capítulo.

En el campo también se realizan pruebas especiales para determinar la presencia de algunos elementos o compuestos, como es el caso del carbonato de calcio, el manganeso o la presencia de arcillas alófanas o metales pesados de interés.

En el caso del carbonato de calcio se utiliza ácido clorhídrico al 110 %, el cual, según la efervescencia, funciona como un indicador de la presencia de dicho elemento. Para la determinación del manganeso se utiliza peróxido de hidrógeno (agua oxigenada) al 15 % y esta, al mostrar borboteo, indica la presencia del componente. En el caso de la prueba de presencia de arcillas alfanas, se utiliza fenolftaleína o fluoruro de sodio al 1 M. Mediante su aplicación, indicará presencia del componente cuando se observe un color entre morado-rosado intenso o rojo fucsia durante, al menos, los primeros dos minutos.

Generalmente, estas pruebas se realizan sobre papel filtro colocado sobre el suelo o el material que se quiera analizar; luego, hay que documentar las reacciones. Los desechos generados durante el muestreo (papel filtro con reactivos) deben ser deposita-



dos en basureros. Para un análisis más profundo, en el caso de la presencia de arcillas alófonas, las muestras se envían al laboratorio a fin de determinar la retención de fósforo, así como el análisis de presencia de hierro y aluminio amorfo.

Utilizar el «Formulario para documentar las observaciones en campo, durante un mapeo de suelos» (*v. ANEXO 1, AL FINAL DE LA OBRA*) puede servir de guía para registrar todas las percepciones y, a la vez, realizar una descripción más detallada por cada horizonte.

III. **Propiedades físicas del suelo**

Las propiedades físicas de los suelos son aquellas características que describen el tipo de suelo de acuerdo con su composición. Cada particularidad está ligada principalmente a los materiales que lo conforman y, en sistemas muy disturbados, estas pueden variar de acuerdo con el manejo que se le dé al suelo. Su estudio es muy importante porque permite realizar un análisis del comportamiento del suelo ante la presencia de agua, maquinaria agrícola, fertilización o el establecimiento de especies vegetales y la dinámica de comunidades vegetales en entornos naturales.

De seguido, se analizarán las distintas propiedades físicas del suelo: textura, estructura, densidad (aparente o real), porosidad, agua y color. Estas son las propiedades que se deben analizar por horizonte al abrir una calicata. Algunas no pueden ser evaluadas en campo y deben colectarse muestras para ser llevadas al laboratorio, como el caso de: porosidad, movimiento del agua y densidad aparente y real.

A. TEXTURA

La textura es una de las propiedades físicas y básicas del suelo. Ocupa el primer lugar en el grupo porque determina o infiere las características subsiguientes.

Como se expuso en el capítulo primero, las clases texturales de los suelos dependerán de los materiales parentales que los formaron.

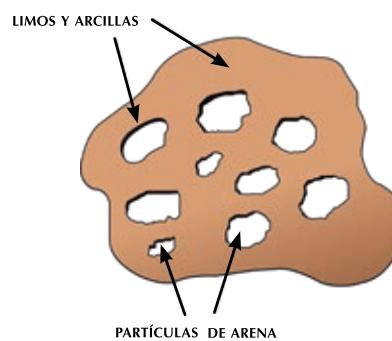
Los minerales y el humus conforman la fracción coloidal del suelo; no obstante, los materiales minerales que la componen se localizan en diferentes proporciones, razón que da origen a las di-

**CONCEPTO****textura del suelo.**

Proporción, en porcentaje, de los componentes minerales con partículas de diámetro menor de 2 mm, los cuales se encuentran representados por arenas, limos y arcillas.

FIGURA 30. PARTÍCULAS MINERALES DEL SUELO. Las partículas de arena, limo y arcilla; forman la parte mineral del suelo que, según sus proporciones, determina la textura del suelo.

FUENTE: «Estructura del suelo». FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2006). Reproducida con fines educativos.



versas texturas, como derivación de los porcentajes de arena, de limo y de arcilla.

La composición del suelo influye tanto en sus propiedades como en la capacidad de intercambio de cationes (en adelante CIC), de adsorción de elementos y de retención de humedad, en la plasticidad y en el área superficial; por esta razón, los contenidos de arcilla repercuten, en su mayoría, sobre las propiedades químicas y físicas del suelo (FIG. 30).

La **textura del suelo** es una de sus propiedades que varía con el tiempo: debido al efecto de los procesos de meteorización sobre el material parental, estos promueven un mayor contenido de arcillas a lo largo de los años. Empero, la textura cambia en períodos muy extensos; por lo tanto, en el caso de un área de estudio particular, solo

es necesario definirla al inicio de un estudio.

Las clases texturales son determinadas por medio de diferentes procedimientos. El más utilizado, a nivel de laboratorio, es la técnica de Bouyoucos. Este método utiliza el hidrómetro de Bouyoucos para analizar el tamaño de las partículas. La metodología es la siguiente: se toma la muestra de suelo, se dispersa en un cilindro con agua y se pone en movimiento. Una vez que se termina de realizar la actividad anterior, la solución se empieza a asentar, circunstancia que facilita medir la cantidad de material asentado y el tiempo transcurrido. Para reportar los resultados, se incorpora también la densidad de las partículas de la suspensión (agua y suelo) y la temperatura del agua. Para esto existe un protocolo previamente establecido en los laboratorios, el cual prevé los tiempos para realizar las mediciones.

En el campo se puede determinar la clase textural por medio de la técnica del tacto, que consiste en tomar una porción del suelo y humedecerla luego, con la intención de realizar una pasta (se recomienda realizarlo con la mano izquierda, si es una persona diestra). Posteriormente, se forma una cinta con el suelo humedecido; para ello, se presiona el suelo con la palma de la mano y el



pulgar hacia arriba hasta que se forme una especie de banda sin que se quiebre; luego, hay que diagnosticar si esta, al tacto, es lisa o áspera. Si no se forma la cinta, se indica que es un suelo arenoso franco; si se forma; pero esta es débil, se dice que corresponde a un suelo franco arenoso; o franco, si la banda no es suave o áspera. Si esta misma cinta se forma, pero muy suave, es un suelo con textura franco limosa. Ahora, si se logra formar un anillo con ella, de forma tal que no se quiebre con la pasta de suelo húmeda, se determina que corresponde a un suelo arcilloso por ser un material plástico y adhesivo. Al tratarse de suelos con arena, la sensación al tacto es más gruesa y áspera; contrario al caso del limo, el cual se percibe como si se tratara de harina o talco. Las gravas no se toman en cuenta como parte de la definición de la clase textural; pero se perciben fácilmente, ya que son materiales más gruesos que quedan en la palma de la mano cuando esta es lavada.

En la mayoría de los estudios se realizan agrupaciones texturales para clasificar los suelos. Tal actividad, como se mencionó párrafos atrás, depende de los porcentajes de los minerales que los componen. Estas divisiones, que se pueden observar en el Cuadro 8, fueron definidas según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) (USDA, 2006).

CUADRO 8
CLASES TEXTURALES DE ACUERDO CON LOS PORCENTAJES DE MINERALES

FUENTE: *Claves para la Taxonomía de Suelos* (Soil Survey Staff), del USDA/NRCS [Departamento de Agricultura de los Estados Unidos/Servicio de Conservación de Recursos Naturales] (2006).

NOMBRES VULGARES DE LOS SUELOS SEGÚN TEXTURA GENERAL	ARENOSO	LIMOSO	ARCILLOSO	CLASE TEXTURAL
	PORCENTAJE (%)			
Suelos arenosos (textura gruesa)	86-100	0-14	0-10	Arenosa
	70-86	0-30	0-15	Franca arenosa
Suelos fracos (textura moderadamente gruesa)	50-70	0-50	0-20	Franca arenosa
Suelos fracos (textura mediana)	23-52	28-50	7-27	Franca
	20-50	74-88	0-27	Franca limosa
	0-20	88-100	0-12	Limoso
Suelos fracos (textura moderadamente fina)	20-45	15-52	27-40	Franca arcillosa
	45-80	0-28	20-35	Franca arenosa arcillosa
	0-20	40-73	27-40	Franca limosa arcillosa
Suelos arcillosos (textura fina)	45-65	0-20	35-55	Arcillosa arenosa
	0-20	40-60	40-60	Arcillosa limosa
	0-45	0-40	40-100	Arcillosa

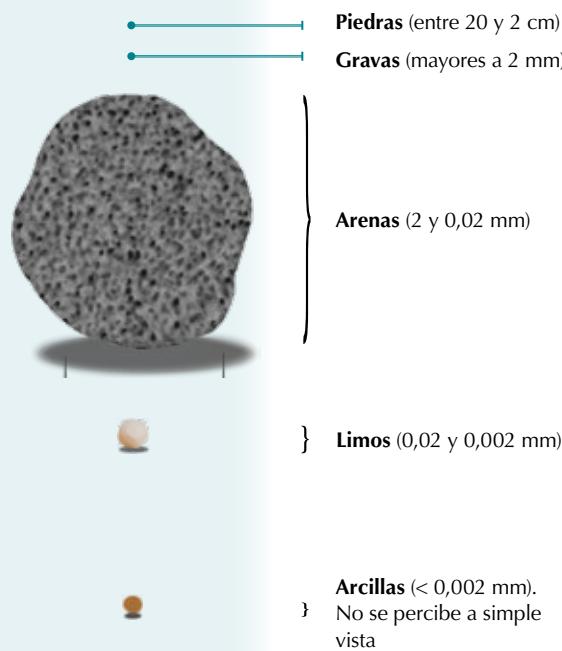


FIGURA 31. COMPARACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS MINERALES. Las piedras y las gravas son los materiales más gruesos del suelo y corresponden a las arenas mayores (de 2mm hasta los 20 cm), por razones obvias no se muestran en la figura. Los granos de arena son las partículas de mayor tamaño en la fracción mineral del suelo, los cuales oscilan entre 2 y 0,02 mm de diámetro. Los limos son fracciones intermedias, que pueden variar en tamaño, entre 0,02 y 0,002 mm de diámetro y, finalmente, las arcillas son las partículas más pequeñas, con un diámetro menor a 0,002 milímetros y, por lo tanto, no se captan a simple vista.

FUENTE: investigación y propuesta de Paola Brenes Rojas, en 2019.

En la fracción mineral del suelo se clasifican las partículas según su diámetro y, de acuerdo con lo dicho, para definir las clases texturales únicamente se toman en cuenta las menores a 2 milímetros.

En un orden de mayor a menor diámetro, los minerales del suelo tienen los siguientes nombres: piedras (entre 20 y 2 cm), gravas (arenas mayores de 2 mm), arenas (entre 2 y 0,02 mm), limos (entre 0,02 y 0,002 mm) y arcillas (menores de 0,002 mm) (FIG. 31).

El sistema de la USDA coloca las clases texturales en un triángulo, el cual ubica los porcentajes de arcillas, arenas y limos de una muestra, con la finalidad de definir la clasificación textural (FIG. 32).

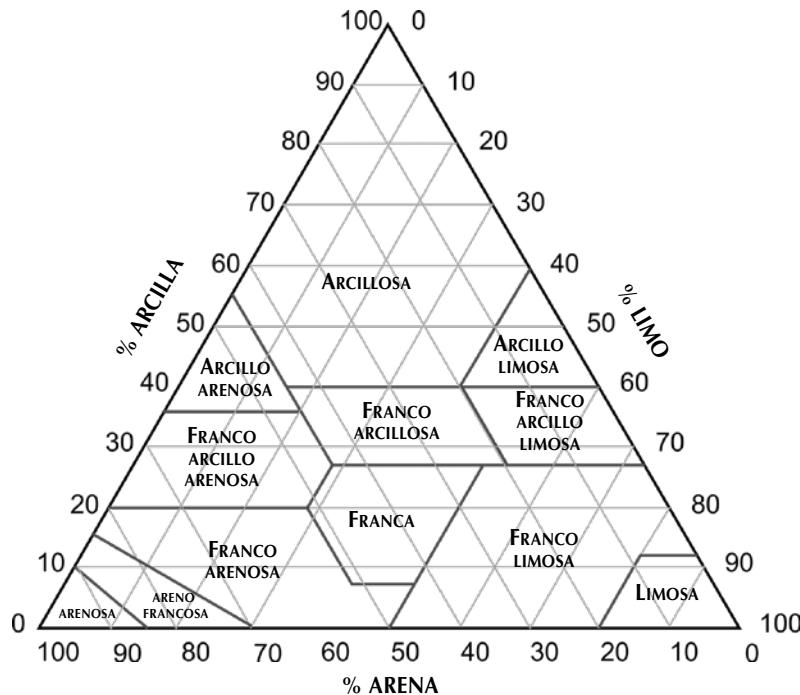


FIGURA 32. TRIÁNGULO DE CLASIFICACIÓN TEXTURAL SEGÚN EL DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE LOS ESTADOS UNIDOS (USDA, por sus siglas en inglés). Las clases texturales pueden ser determinadas mediante este triángulo, el cual ubica los resultados de análisis de textura de arcillas, arenas y limos de una muestra para definir si el suelo presenta las siguientes texturas: arcillosa, arcillo arenosa, arcillo limosa, franco arcillo arenosa, franco-arcillosa, franco arcillo limosa, franco arenosa, franca, franco limosa, limosa, arenofrancosa y arenosa.

FUENTE: «Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo», de D. Gabriels y D Lobo. Revista Venesuelos (2011, 14, 43). Reproducida con fines educativos.



Para determinar la clase textural por medio del triángulo, hay que contar con los porcentajes de arena, limo y arcilla reportados por el laboratorio de suelos. Posteriormente, una vez obtenidos, se debe:

1. Ubicar el porcentaje de arena en la base del triángulo y seguir la línea inclinada ascendente hacia la izquierda.
2. Ubicar el porcentaje de arcilla en el lado izquierdo del triángulo y seguir la línea horizontal hasta encontrar la línea de la arena.
3. Ubicar la clase textural en la figura, donde se encuentra la intersección de ambas líneas. Sin embargo, es necesario comprobar si el reporte de limo también se correlaciona con la clase textural obtenida; para hacerlo, se sigue la línea del lado derecho que desciende a partir del porcentaje de limo, a fin de determinar si llega al punto donde cruzaron las otras dos líneas en la clase textural elegida (v. «ESTUDIO DE CASO 1»).

EN LA RED...

SOIL TEXTURE CALCULATOR

Las páginas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) y del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS, por sus siglas en inglés) proveen una calculadora (*Soil Texture Calculator*), para facilitar la determinación de la clase textural. El estudiante o el lector puede utilizar dicha herramienta para hacer sus propios cálculos.

Para ello se les invita a acceder al siguiente sitio: http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167 o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.



ESTUDIO DE CASOS 1

PLANTEAMIENTO

Un empresario desea desarrollar una finca para el establecimiento de ornamentales en la zona de San Carlos. Necesita conocer el estado de los suelos; inicialmente, se le pide realizar un análisis de suelo para determinar la clase textural.

Los datos resultantes fueron los siguientes: arena 28%, limo 30% y arcilla 42%.

PROBLEMA: ¿A cuál clase textural pertenece la muestra?

DESARROLLO

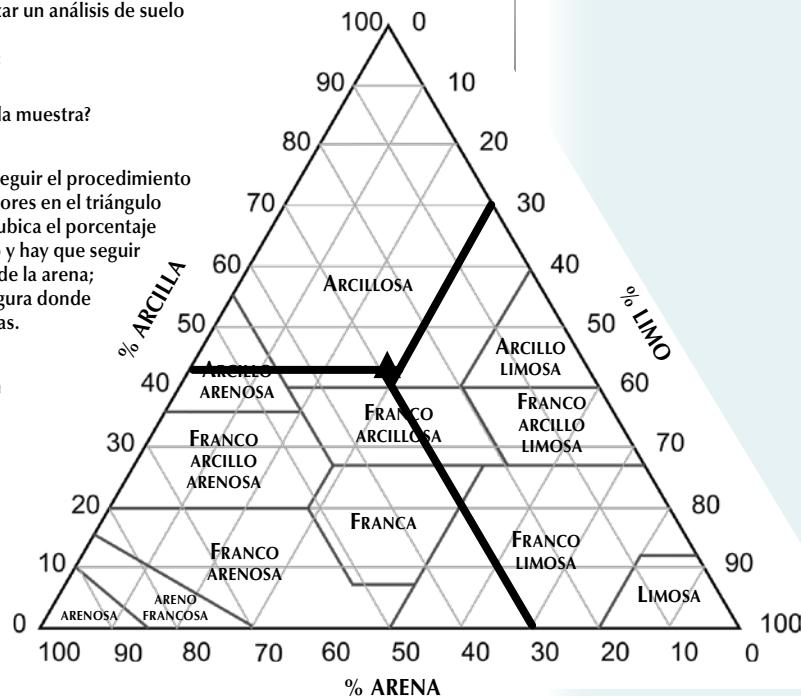
Para determinar la clase textural, se debe seguir el procedimiento recién descrito. Primero, se colocan los valores en el triángulo textural de la cantidad de arena; luego, se ubica el porcentaje de arcilla en el lado izquierdo del triángulo y hay que seguir la línea horizontal hasta encontrar la línea de la arena; de último, se ubica la clase textural en la figura donde se encuentra la intersección de ambas líneas.

RESPUESTA

Según los datos presentados y ubicados en triángulo textural de la USDA, este suelo, según la muestra presentada, se ubica dentro de la clase textural de tipo arcillosa.

ESTUDIO DE CASO

CLASE TEXTURAL ARCILLOSA





Si bien es cierto que muchos trabajos utilizan las clases texturales para caracterizar el suelo, existe actualmente una tendencia por parte de los investigadores a emplear solo los porcentajes de cada mineral, en lugar de la clasificación textural, para relacionar esos valores con las otras propiedades físicas, químicas y biológicas.

En la mayoría de los documentos de descripción de suelos, los suelos con alto contenido de arenas se conocen como ligeros, debido a que la presencia de espacios más grandes entre partículas favorece la percolación o el movimiento del agua.

Asimismo, existen otros tipos de adjetivos utilizados en documentos que indican que los suelos pesados tienen alto contenido de arcillas porque se asocian con alta plasticidad y cohesión y, además, alta densidad aparente. Tales condiciones también dificultan las acciones para trabajarlos, a causa de la susceptibilidad a la compactación de los suelos arcillosos; por el contrario, los suelos arenosos son menos densos y estructurados.

Desde la perspectiva química, se adjudican condiciones de menor fertilidad a los suelos arenosos en relación con los arcillosos, en razón de la baja cohesión y capacidad de retención de humedad y por la menor capacidad de intercambio catiónico. Los suelos arenosos pueden ser ácidos o alcalinos, lo que depende del material parental y del manejo.

Las arcillas poseen mayor área superficial, en consecuencia, mayor extensión donde absorber cationes de la solución del suelo, gracias a la estructura laminar que poseen, lo que se traduce en mayor fertilidad. En cambio, la estructura de las arenas no favorece la retención de elementos. Arcillas como las caolinitas tienen menos área superficial (de 3 a 7 m²/g) que las vermiculitas (de 600 a 800 m²/g) lo cual se traduce en que las vermiculitas tienen más capacidad de intercambio catiónico que las caolinitas (CDR. 9, P. SIG.).

Un balance ideal granulométrico sería la combinación de las tres partículas (arena, limo y arcilla); en ese caso, serían suelos con texturas francas; no obstante, «lo ideal» se convierte en un término subjetivo porque dependerá del manejo del suelo y, en el caso de un suelo agrícola, el suelo ideal dependerá del cultivo.



ATENCIÓN

En términos de volumen y de espacio, los suelos arcillosos tienen más poros que los arenosos, debido a que los suelos arcillosos son ricos en microporos, cualidad que les adjudica una alta capacidad de retención de agua, mientras que los arenosos son ricos en macroporos, con una capacidad baja para retener agua.



ATENCIÓN

Recuerde que el término de suelo ideal es muy subjetivo, generalmente se busca que un suelo pueda cumplir todas sus funciones sin verse afectado por factores antropológicos y al mismo tiempo sea productivo según cultivo o sistema ecológico que en el desarrolle.



CONCEPTO

B ESTRUCTURA

La estructura del suelo se relaciona con el estado de agregación de los minerales, o sea, la forma en que los minerales se encuentran unidos en el suelo. Desde esta perspectiva, el suelo presenta facilidad para compactarse o desintegrarse, lo cual afecta directamente las propiedades físicas del suelo como la infiltración y la porosidad. La estructura básica es un arreglo de partículas llamado **ped**; la unión de varias de dichas partículas forma, a su vez, agregados denominados, comúnmente, terrones. Los *ped*s pueden estar formados por minerales como arenas, limos y arcillas, poros y material orgánico y este es el resultado de procesos pedogenéticos.

El estado de agregación o de unión es producido por fuerzas intermoleculares y electrostáticas o iónicas de los componentes del suelo, tanto de origen orgánico como mineral. La estructura, o el estado de agregación, puede deteriorarse de varias formas, en especial

ped. Son agregados de suelo formados por las partículas minerales básicas del suelo y humus; las uniones de varias de estas partículas forman los terrones. La separación entre un ped y otro está dada por microgrietas producidas a causa de poros o canales llenos de agua o aire.

CUADRO 9

PROPIEDADES DE LOS SUELOS QUE SE INFIEREN SEGÚN DOMINANCIA GRANULOMÉTRICA

PROPIEDAD	MINERAL PREDOMINANTE		
	ARENA	LIMO	ARCILLA
Susceptible a compactación	Baja	De media a alta.	Alta.
Aireación	Excelente	Buena	Pobre
Porosidad	Baja	Media	Alta
Intercambio catiónico	Bajo	Medio	Alto, depende del tipo de arcilla y del manejo.
Infiltración del agua	Alta	Moderada	Lenta
Permeabilidad	Alta	Moderada	Baja
Susceptibilidad a erosión hídrica	Alta	Alta	Media, depende del manejo. Cuando el suelo se satura por mucho tiempo las arcillas se suspenden y hay movimiento de material.
Temperatura del suelo	Se calienta rápidamente, varía según color.	Se calienta moderadamente.	Se calienta lentamente.
Labranza del suelo	Fácil de labrar, pero la estructura no se mantiene.	Media	Difícil
Capacidad de retención del agua	Baja	Media	Alta
Densidad aparente	Media	Media	Media a alta, tiende a ser más densa si el manejo es inapropiado.

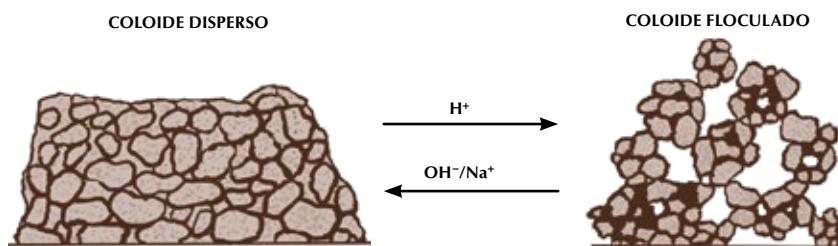
FUENTE: investigación y propuesta de Paola Brenes Rojas, en 2019, con base en las siguientes obras: *Introductory Soil Science: a Study Guide & Laboratory Manual*, de León J. Johnson (1979); «Evaluación de la susceptibilidad de la compactación en cuatro series de suelo bajo uso agrícola», de William J. Reyes (2010); y *Edafología del trópico*, de Wagner Peña Cordero (2017).



FIGURA 33. ESTADO DE LOS COLOIDES DEL SUELO. El estado ideal del suelo es un coloide floculado; sin embargo, cuando hay desbalances químicos, en especial por los excesos de sales minerales, se produce una dispersión del coloide y no favorece el movimiento del agua ni la aireación del suelo.

FUENTE: «Estructura del suelo». FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2006). Reproducida con fines educativos.

debido al mal manejo de los suelos, en relación con el exceso de fertilizantes o malas prácticas de preparación de suelos. Verbi gracia, excesos de sales en suelo como el ion sodio (Na^+) favorece la dispersión de las partículas de arcillas, o sea, la formación del coloide disperso o sin estructura (Fig. 33). En cambio, cuando aumenta la concentración de hidronios (H_3O^+) en solución, el equilibrio del suelo se perturba y la reacción química cambia a coloide floculado. Si en la solución existe un exceso de iones hidroxilo (OH^-), estos neutralizan los hidrogeniones y el equilibrio se desplaza: lo anterior produce que el coloide se disperse, o sea, otra vez sin estructura.



Lo ideal es que los coloides del suelo se encuentren en un estado de floculación, en el cual la materia orgánica provee un efecto cementante que proporciona estabilidad a los agregados, además de una mejor aireación y un mejor movimiento del agua.

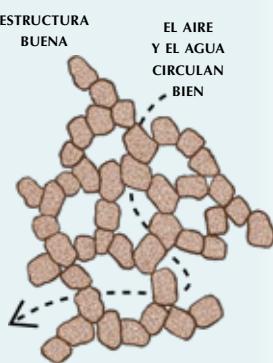


FIGURA 34. DIAGRAMA DE UNA BUENA ESTRUCTURA DEL SUELO. Una estructura de suelo adecuada permite una buena circulación de aire en el suelo y también del agua, ya que hay suficientes espacios porosos que permiten la buena canalización de los gases y los líquidos.

FUENTE: «Estructura del suelo». FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2006). Reproducida con fines educativos.

Según estudios de Enrique Meza Pérez y Daniel Geissert Kientz (2003), las arenas y los contenidos de carbono están directamente correlacionados con la estructura y la forma de agregación de los suelos y, por ende, también con la porosidad. Dichos autores manifiestan que la degradación de la estructura del suelo se traduce en una disminución de la estabilidad de los microagregados, la cual resulta en efectos combinados de pérdidas de material orgánico, de porosidad y de densidad y, por lo tanto, en erosión.

En conclusión, lo mejor, desde el punto de vista de recurso natural, es que el estado de agregación del suelo sea «migajoso» porque presenta mayor infiltración y oxigenación.

El estado de agregación del suelo influye, igualmente, en el movimiento del agua, la densidad, la actividad biológica y otras propiedades; por lo tanto, se puede afirmar que una buena estructura de suelo permite la buena circulación del agua y del aire (Fig. 34).



Según la USDA, la estructura de un suelo se halla en función del grado de agregación y la clase; esta última se define por el tamaño y el tipo de agregado. Idealmente, la estructura debe identificarse cuando el suelo está seco o ligeramente húmedo para permitir determinar las diferentes clasificaciones.

Los grados de la intensidad de agregación se definen de la siguiente forma:

- a) **Sin estructura.** No existen agregados visibles o no es visible un ordenamiento claro, como cuando se observa una gran masa cementada o las partículas del suelo en un suelo netamente arenoso.
- b) **Estructura débil.** Apenas se aprecian agrupaciones, pero son deficientes.
- c) **Estructura moderada.** Los agregados del suelo están bien formados y diferenciados, aunque se desintegran.
- d) **Estructura fuerte.** Los agregados bien formados y diferenciados son duraderos y evidentes en suelos no alterados (*SCHOENEBERGER, WYSOCKI, BENTHAM Y SSS, 2012*).

La clase de la estructura describe el tamaño de los agregados. Se conocen cinco clases: muy fina, fina, mediana, gruesa y muy gruesa.

La estructura también se diferencia según la forma o el tipo (*FIG. 35*). La clasificación, basada según USDA, es la siguiente:

- a) **Granular o migajosa.** Formada por partículas individuales o en agregados muy pequeños. Es característica del horizonte A y en suelos poco disturbados.
- b) **En bloques angulares o subangulares.** Las partículas se agrupan en forma de bloques casi cuadrados como los angulares o un poco asimétricos y subangulares. Es propia del horizonte B: cuando hay arcillas en suelos no disturbados.
- c) **Prismáticas y columnares.** Forman columnas definidas. El movimiento del agua se ve limitado y su drenaje es deficiente.
- d) **Laminares.** Forman láminas o capas una sobre otra. Estas se traslanan, lo que al mismo tiempo dificulta el movimiento del agua y del aire. Es típica de suelos arcillosos o de suelos boscosos.
- e) **Masivas.** Forman bloques cementados sin ningún tipo de arreglo u orden en los terrenos. No hay movimiento de agua o aire (*SCHOENEBERGER, ET AL., 2012*). La USDA indica que la condición masi-



va no es una estructura como tal, sino más bien un suelo sin consolidar.

- f) **Lenticular.** Forma láminas delgadas en forma de lente; es decir, en forma cóncava, lo cual dificulta el movimiento del agua y aire.
- g) **De cuña.** Forma agregados de manera similar a la prismática, sin embargo, la base superior es en forma de cuña. Dicha estructura es característica de suelos con arcillas expandibles.

Los suelos arenosos como los que se encuentran en la zona costera no poseen estructura, ya que este tipo de suelo se forma solo por partículas de minerales sueltas.

En resumen, gracias a los estados de agregación o de arreglo de las partículas minerales del suelo, ya sea por tipo, clase o grado, es posible inferir las características del movimiento del agua y estabilidad del suelo. En un suelo utópico, la estructura tipo granular presenta el mejor movimiento de agua en el horizonte y una estabilidad superior.

ACTIVIDAD

Elabore un mapa conceptual en el cual se relacionen las características físicas de un suelo según los diferentes tipos de estructuras.

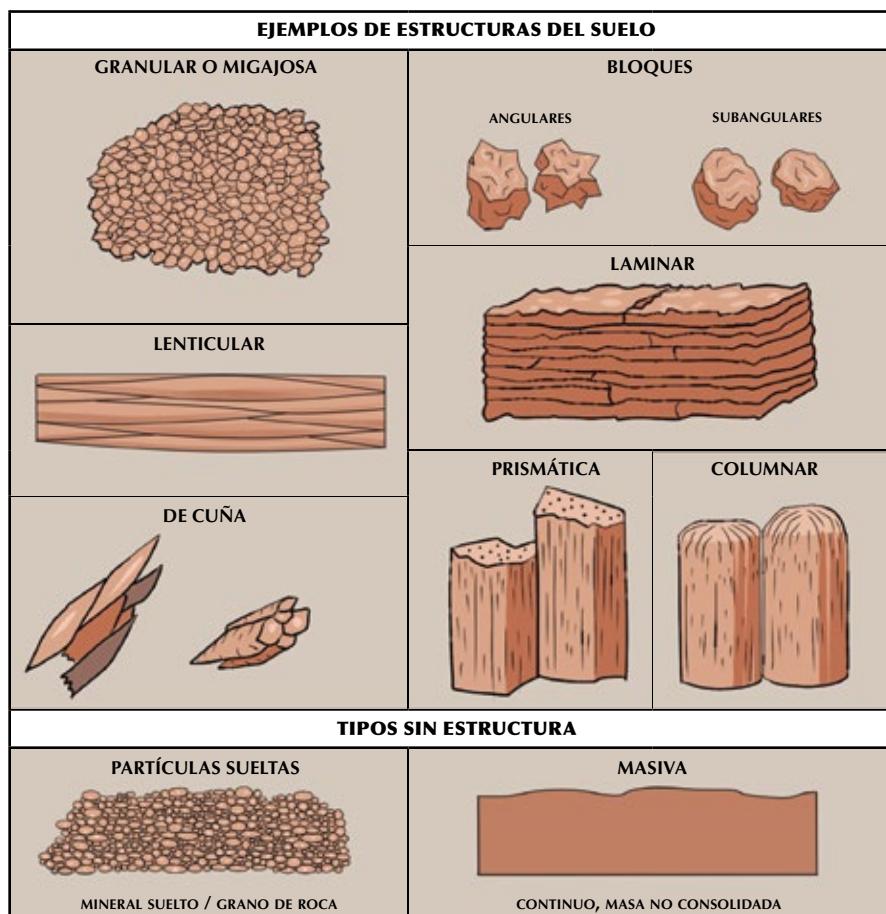


FIGURA 35. TIPOS DE ESTRUCTURAS DEL SUELO. El suelo puede presentar varios tipos de estructuras, es decir, varias formas de arreglos entre partículas, dentro de las cuales destacan: granular o migajosa; disposición ideal de un suelo, bloques angulares o subangulares; prismática; laminar; masiva.

FUENTE: adaptada de *Field Book for describing and sampling soils*. Vers. 3.0, de National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Services, U.S. Department of Agriculture. (2012). Reproducida con fines educativos.



c. DENSIDAD DEL SUELO

Después de analizar la granulometría del suelo y su arreglo de partículas, se puede hacer referencia a la densidad del suelo, la cual está estrechamente vinculada con esas propiedades.

La densidad del suelo es la relación entre la masa de las partículas minerales y orgánicas de un suelo seco y un volumen determinado. Por supuesto, tal relación también toma en cuenta los espacios porosos del suelo para el movimiento del agua o aire. Su símbolo es ρ y, comúnmente, se expresa en g/cm^3 .

Los suelos arcillosos presentan mayor masa en un volumen específico que los arenosos en igual volumen; al mismo tiempo, en los primeros los espacios porosos son abundantes, pero pequeños. Por el contrario, los suelos arenosos poseen menor masa en un volumen determinado que la de los arcillosos y los espacios porosos son más amplios, aunque en menor número que en los arcillosos.

Por lo tanto, podemos indicar que los suelos arcillosos tienen a tener mayor densidad aparente que los suelos arenosos. De la misma forma sucede con los suelos con alto contenido de material orgánico en procesos de mineralización, ya que estos suelos tienen a tener una densidad aparente más baja que un suelo mineral.

1. DENSIDAD APARENTE

La densidad del suelo se clasifica en densidad aparente y densidad real (densidad de partículas). La relación entre la densidad aparente del suelo y la densidad real define la porosidad del suelo.

La densidad aparente puede estar determinada por los siguientes factores, entre otros:

- a) Material parental (granulometría) y grado de meteorización.
- b) Agentes cementantes (carbonatos o materia orgánica).
- c) Compactación del suelo.
- d) Historial de uso y manejo de suelos (maquinaria pesada, sobrepastoreo, deforestación, deposición de materiales por efecto de movimientos de suelo).
- e) Profundidad (a mayor profundidad, mayor densidad).



- f) Orden de suelo, según sistemas de clasificación de suelos (composición mineral).
- g) Migración de materiales como las arcillas a otros horizontes.

El equipo utilizado para tomar muestras y medir la densidad aparente, generalmente, incluye un martillo y un cilindro muestreador con un tubo, a fin de evitar contacto con el borde del muestreador (FIG. 36).

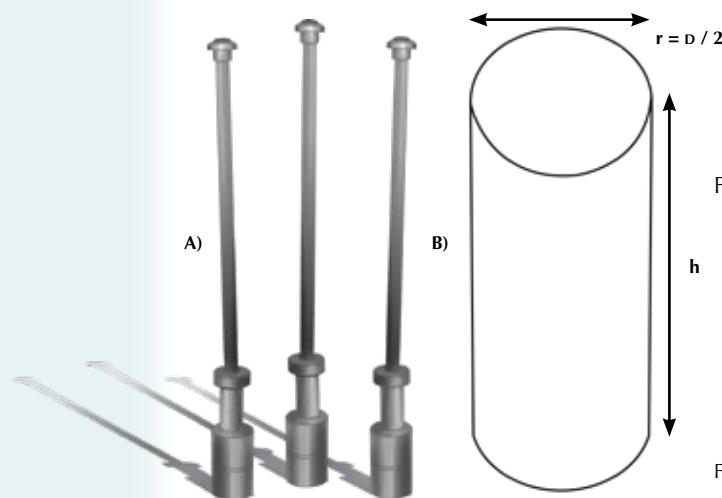


FIGURA 36. EQUIPO NECESARIO PARA LA TOMA DE MUESTRAS DE DENSIDAD. La imagen A) representa el equipo utilizado para tomar las muestras de densidad, el cual contiene un cilindro muestreador y un cilindro extra con peso, que es el que hace la presión para que se introduzca el cilindro en el suelo. El bosquejo B) muestra la forma del cilindro y la fórmula utilizada para realizar el cálculo del volumen del cilindro.

FUENTE: adaptada de *Edafología del trópico*, de Wagner Peña Cordero (2017, p. 78).



ACTIVIDAD

Usted puede realizar sus propios cilindros muestreadores comprando tubo EMT o de acero galvanizado de 2,5-3" de diámetro y cortarlos a 10 cm de altura. Afíle uno de sus bordes y utilice un mazo para poder realizar el trabajo de campo al introducir el cilindro en el suelo.

Para determinar la densidad aparente de un suelo, se mues-
tra el terreno con un cilindro de dimensiones conocidas (cilindro muestreador). Este se introduce en el suelo de tal manera que se colecte la porción sin disturbar el contenido, su forma y su compactación. Con ese fin, se empuja con suavidad el cilindro en po-
sición vertical hasta que su base quede a ras del suelo; se debe recordar no compactar la muestra y tener cuidado de no perder suelo en el proceso de empacar la muestra.

Posteriormente, se coloca el cilindro que contiene la muestra de suelo en un horno a 105 °C durante 48 horas; y luego se saca y se determina la masa del suelo seco por medio de una balanza. El valor de esta masa se relaciona con el volumen del cilindro, me-
diante la siguiente expresión:

$$\rho_{ap} = m / V$$

Donde: ρ_{ap} = densidad aparente (g/cm^3)

m = masa seca del suelo (g)

V = volumen del cilindro (cm^3)



Para determinar el volumen del cilindro, se aplica la ecuación

$$V = h \times \pi \times r^2$$

Donde: h = altura del cilindro

π = pi (3,141)

r = radio del círculo de la base del cilindro

La densidad de los suelos varía conforme a las clases texturales, y estos valores pueden cambiar según dominancia de minerales. Por ejemplo, los suelos con textura franca poseen densidades aparentes de alrededor de 1,75 g/cm³; con textura arena franca, 1,50 g/cm³; con franco limosa, 1,40 g/cm³ y con franco arcillosa, 1,20 g/cm³ (UNAD, 2016).

La USDA ofrece una aproximación del valor de la densidad aparente a partir de la clase textural, según se observa en el Cuadro 10. Y en este caso podemos apreciar que clases texturales más gruesas (arenas) propensas a ser más densas.

Los valores de densidad son fundamentales para la descripción de los suelos y de la calidad de estos, así como para la toma de decisiones en cuanto a implementar planes de descompactación y al consiguiente desarrollo radicular. La descompactación de los suelos integra todas aquellas actividades realizadas en el campo para disminuir la densidad del suelo que ha sido compactado por acciones antropogénicas, por ejemplo, la aplicación de abonos orgánicos y la diminución del uso de maquinaria agrícola. Al descompactar los suelos, también se promueve un aumento del crecimiento de las raíces, tanto de forma horizontal como vertical al suelo.

Además, por medio de la densidad se puede estimar la masa del suelo por hectárea (v. «ESTUDIO DE CASO 4»), el espacio poroso (v. SUBAPARTADO «D. POROSIDAD»), la humedad gravimétrica y la humedad volumétrica (v. SUBAPARTADO «E. AGUA EN EL SUELO»/«I. PROPIEDADES DEL AGUA»); de esa manera, es posible establecer rangos de densidades para ver compactación en suelos y poder comparar con otros sistemas.

ATENCIÓN

Los valores de densidad aparente según la clase textural son muy variables en el campo por factores como contenido de material orgánico y el uso y manejo de suelo, así como la migración de materiales como arcillas a otros horizontes. Ante esto, lo más recomendable es realizar muestreos de densidad para los sitios de estudio y no tomar los datos aproximados

CUADRO 10

DENSIDAD APARENTE SEGÚN CLASE TEXTURAL

CLASE TEXTURAL	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)
Arena	1,55-1,7
Franco-franco limosa	1,50-1,6
Limo Franco arcillosa Arcillo limosa	1,4-1,5
Arcillosa (35-50% de arcillas)	1,35-1,40
Arcillosa (mayor a 50% de arcillas)	1,25-1,35

FUENTE: Claves para la taxonomía de suelos (Soil Survey Staff), del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (USDA-NRCS) (2016).

**ACTIVIDAD**

Para comprender y conocer más sobre las necesidades nutricionales y programas de fertilización en cultivos, se recomienda leer los capítulos 7 y 8 de la obra *Fertilidad de suelos*, de Donald C. L. Kass (1998, pp. 202-233).

El valor de la densidad es imprescindible para los técnicos en programas de fertilización en cultivos porque con tal cifra se puede determinar la cantidad de nutrientes por hectárea de suelo.

El valor de la densidad aparente (pap) también es útil para calcular la masa de un terreno, como se expone en el Estudio de Caso 4 (*P. SIG.*).

ESTUDIO DE CASO 2**PLANTEAMIENTO**

A usted, como técnico en ciencias del suelo, se le solicita realizar un estudio de la relación de la densidad aparente de los suelos en Costa Rica, de acuerdo con su taxonomía. Para su análisis, se colectan los siguientes datos:

ORDEN DE SUELO	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)
Entisol	0,87-1,62
Andisol	0,67-1,79
Inceptisol	0,55-1,46
Molisol	0,88-1,70
Alfisol	0,60-1,78
Ultisol	0,53-1,83
Vertisol	0,92-2,00

PROBLEMA: ¿A qué se deben las diferencias de las densidades aparentes entre los distintos órdenes de suelo?

DESARROLLO

Para resolver este planteamiento, es importante remitirse a la taxonomía de los órdenes de suelo, descrita de forma general en el Capítulo 3; y apoyarse en los conocimientos adquiridos en el Capítulo 1 para determinar que los distintos factores formadores de suelo, en relación con los minerales edáficos, propenden a marcar diferencias entre los suelos. Por lo tanto, el desarrollo de este problema debe estar orientado a investigar el tipo de material que componen los distintos órdenes de suelo colectados y sus características principales.

RESPUESTA

Ahora, basados en los datos, se puede observar que los suelos inceptisoles, andisoles y entisoles se decantan a presentar valores de densidad aparente menores, cuya inclinación obedece al material parental de formación que, en el caso de los inceptisoles y entisoles, son los suelos con menor grado de meteorización. En lo que respecta a los andisoles su relación obedece a su composición mineralógica (arcillas amorfas asociadas a materiales húmicos), aunque puede variar, según los contenidos de arenas que tenga el suelo y el grado de meteorización.

Caso contrario ocurre con los vertisoles y los ultisoles, que presentan valores de densidad más altos, dada su relación con el alto contenido de arcillas.

También se puede observar que los rangos de los datos son muy amplios pues eso depende de la estructura del suelo: suelos con dominancia de arcillas y con estructura adecuada, puede manejar valores más bajos (1,05-1,10 g/cm³), pero suelos arcillosos, sin estructura y compactados, pueden acercarse a valores de 2,00 g/cm³, según Alfredo Alvarado y Warren Forsythe (2005).

A modo de conclusión, la densidad aparente, según los órdenes de suelo, se asocia a factores como el material parental que lo compone y a los tipos arcilla.

FUENTE: Edafología del trópico, de Wagner Peña Cordero (2017, p. 79) y «Variación de la densidad aparente», de Alfredo Alvarado y Warren Forsythe (2005, pp. 87-93).



ESTUDIO DE CASO

ESTUDIO DE CASO 3

PLANTEAMIENTO

La finca Las Margaritas, en Poás de Alajuela, se dedica a la producción de leche bajo sistemas de pastoreo. En la mayoría de los lotes que la conforman ha tenido problemas de compactación, por lo que se realizó una toma de muestras de densidad aparente.

Las dimensiones de un cilindro muestreador son las siguientes: $h = 5,0 \text{ cm}$ y $r = 2,5 \text{ cm}$. Y la muestra del lote 114 obtuvo una masa de 115,3 gramos.

PROBLEMA: ¿Cuál es la densidad aparente de esta muestra?

DESARROLLO

Primero, se utiliza la fórmula de volumen del cilindro:

$$\text{Volumen de un cilindro: } V = h \cdot \pi \cdot r^2$$

Si se sustituyen los valores que corresponden en la ecuación, la fórmula quedaría de la siguiente manera:

$$V = 5 \text{ cm} \cdot 3,141 \cdot (2,5 \text{ cm})^2$$

$$V = 98,17 \text{ cm}^3$$

A partir de este resultado, se determina que la densidad aparente de un suelo seco contenido en el cilindro, con la siguiente fórmula y el dato de la masa del suelo (115,3 g):

$$\text{Densidad aparente: } \rho_{ap} = m/V$$

$$\rho_{ap} = 115,3 \text{ g}/98,17 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{ap} = 1,17 \text{ g}/\text{cm}^3$$

RESPUESTA

La densidad del suelo de la muestra 114 es de 1,17 g/cm³

IMPORTANTE: Si no se conoce la densidad de un suelo, se le asigna el valor de 1 g/cm³.



ATENCIÓN

Factores de conversión:

$$1 \text{ cm}^3 \text{ o cc} = 1 \text{ ml}$$

$$1 \text{ g}/\text{cm}^3 = 1 \text{ kg}/\text{L}$$



ESTUDIO DE CASO

ESTUDIO DE CASO 4

PLANTEAMIENTO

En la finca La Margarita, en Poás de Alajuela, el lote 114 mide 100 m • 100 m (una hectárea) y la densidad aparente fue de 1,17 g/cm³, la cual fue tomada a una profundidad de 20 centímetros.

PROBLEMA: ¿Cuál es la masa del terreno, en kilogramos, a esa profundidad?

DESARROLLO

Primero, se calcula el volumen del terreno a la profundidad establecida (20 cm, que equivalen a 0,20 m):

$$V_{\text{de la hectárea}} = 100 \text{ m} \cdot 100 \text{ m} \cdot 0,20 \text{ m} = 2000 \text{ m}^3$$

Luego, se averigua la masa del terreno (suelo seco, ss) a partir de la densidad aparente (1,17 g/cm³) y de su volumen ($2 \cdot 10^3 \text{ m}^3$). Como el volumen se encuentra en metros cúbicos y la densidad en centímetros cúbicos, se aplica el factor de conversión correspondiente; lo mismo se hace con el valor de la masa pues se pide en kilogramos.

$$mss = V \cdot \rho_{ap}$$

$$mss = \frac{2 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \cdot 1,17 \text{ g}/\text{cm}^3 \cdot 10^6 \text{ cm}^3/1 \text{ m}^3 \cdot 1 \text{ kg}}{10^3 \text{ g}}$$

$$mss = 2340000 \text{ kg} \text{ o } 2,34 \cdot 10^6 \text{ kg}$$

RESPUESTA

La masa suelo seco (ss) de 1 ha del terreno a una profundidad de 20 cm con una densidad de 1,17 g/cm³ es de $2,34 \times 10^6$ kg.



2. DENSIDAD REAL O DE PARTÍCULAS

Las partículas de los suelos presentan diferentes tamaños y para conocer el volumen de los sólidos del suelo es necesario determinar la densidad real. La densidad de las partículas o la densidad específica relativa (ρ_r) es una medida de la densidad específica de los sólidos del suelo. Con base en este parámetro, se determina la cantidad de espacios vacíos ocupados por aire o agua. Generalmente, los valores típicos de la densidad de partículas varían entre 2,5 y 2,8 g/cm³; sin embargo, 2,65 g/cm³ es el valor promedio de la ρ_r de los suelos. Una excepción es el humus, cuya ρ_r oscila alrededor de 1,4 g/cm³.

Para analizar la densidad real se utiliza un **picnómetro** o un matraz volumétrico. En primer lugar, este recipiente limpio y seco se pesa. Despues, la muestra de suelo se introduce en el picnómetro y tambien un líquido de densidad conocida [tolueno ($\rho = 0,86$ g/cm³) o agua destilada ($\rho = 1$ g/cm³)] hasta saturar la solución (se disuelve totalmente la muestra de suelo). Se calienta el picnómetro sin llevar a ebullición su contenido y se deja enfriar hasta lograr la temperatura ambiente. El siguiente paso es llenar el picnómetro con el líquido, agua destilada en este caso, hasta la marca de aforo y taparlo. Se seca el picnómetro por fuera con papel de filtro y, una vez seco, se pesa en una balanza de precisión.

Posteriormente, se trasvaza la disolución a otro recipiente limpio y se lavan las paredes del picnómetro con ayuda de la **piseta**. Se vuelve a aforar el picnómetro con agua destilada, se tapa, se seca y se pesa (en este punto es cuando se estima el volumen del picnómetro). Se mide la temperatura del agua destilada dentro del picnómetro (Muñoz, 2016). Para finalizar, se seca la muestra, se pesa y se procede a realizar los cálculos.

La densidad real de partículas se determina mediante la siguiente formula

$$\rho_r = m_s \cdot \rho_{líquido} / m_a$$

Donde: m_{ss} = masa de la muestra de suelo seco

$\rho_{líquido}$ = Densidad del líquido

$m_{líq}$ = Masa del líquido



D. POROSIDAD

La porosidad de un suelo es el volumen de su espacio ocupado por aire o por agua. Cuando se determina este parámetro, se expresa en porcentaje.

La porosidad se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Porosidad} = \frac{1 - \rho_a}{\rho_r} \cdot 100$$

o,

$$\text{Porosidad} = \frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r} \cdot 100$$

Esta característica del suelo toma en cuenta aspectos básicos como la densidad aparente (ρ_a) y la densidad real del suelo (ρ_r), los cuales, a su vez, se relacionan con otras propiedades como la textura, la estructura, la materia orgánica, los cultivos y la forma de labranza. Asimismo, la porosidad se vincula estrechamente con la compactación pues cuanto mayor sea la compactación, menores son los espacios porosos.

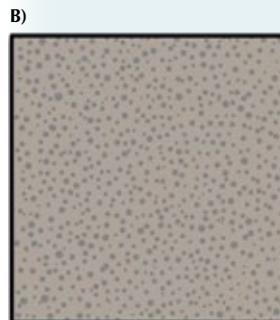
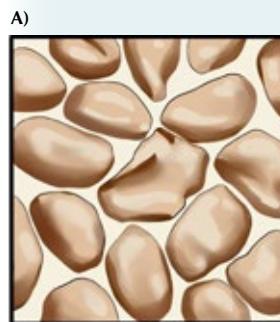
La influencia de la porosidad es fuerte en los ámbitos agrícola y ecológico porque a partir de ella se pueden inferir propiedades del suelo, de manejo y de uso.

Los suelos arenosos tienen espacios más grandes entre las partículas, pero no necesariamente tiene mayor porosidad. Caso contrario sucede con los suelos arcillosos, donde el volumen total de poros en estos últimos es mayor. Esto se debe a los tipos de poros que lo conforman: en los arenosos dominan los marcoporos y en los arcillosos los microporos (FIG. 37).

Esta diferencia en porcentaje (%) de poros, en un volumen determinado, debe tenerse claro para comprender sobre el movimiento del agua en el suelo. Por ejemplo, los suelos con mayor proporción de poros pequeños se saturan más fácil que los suelos con mayor proporción de poros más grandes. Asimismo, se puede explicar que no siempre que hay más poros significa que un suelo este bien aireado. Por tanto, un aumento en espacios entre los poros no implica más porcentaje de porosidad en un suelo.

FIGURA 37. POROSIDAD EN SUELOS ARENOSOS Y ARCILLOSOS. Los suelos arenosos, por tener partículas más grandes, presentan espacios más grandes, pero presentan menor volumen de poros que los arcillosos. En cambio, los suelos arcillosos presentan espacios más pequeños en un volumen determinado: a) suelo arenoso, poros más grandes; b) suelo arcilloso, poros más pequeños.

FUENTE: «Interpretación de resultados de textura y humedad del suelo». Fertilab. Adaptación con fines educativos.





Existen diferentes tipos de poros en los suelos, los cuales les generan características y funciones particulares. Según el tamaño, se pueden clasificar en microporos, mesoporos y macroporos. De acuerdo con las dimensiones, estos cumplen diferentes funciones, en especial con la retención del agua y la aireación. Los microporos retienen más agua, pero las plantas no la pueden usar; en el caso de los mesoporos, sí permiten el movimiento del agua y del aire en el suelo. Los macroporos son los canales realizados por la biota del suelo y estos permiten un movimiento más rápido de los gases y del agua (*CDR. II*).

CUADRO 11

**TIPOS DE POROS EN EL SUELO.
TAMAÑO, CLASIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN**

TAMAÑO DE POROS (DIÁMETRO EN MICRAS)	CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
< 0,2-10	Microporos	Retienen agua, la cual no puede ser usada por las plantas.
10-50	Mesoporos	Permiten el movimiento del agua y del aire.
> 50	Macroporos	Canales de lombrices o nidos de hormigas. Hay un movimiento libre de raíces, de agua y de aire.

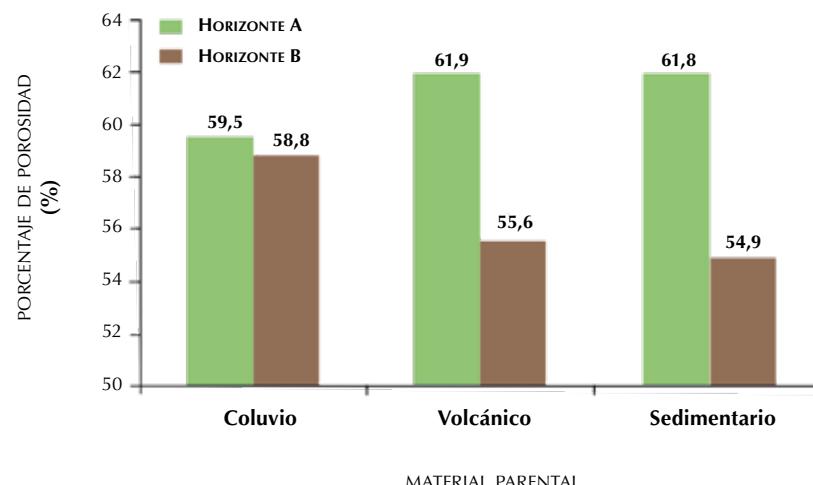
FUENTE: investigación y propuesta de Paola Brenes Rojas, en 2019, con base en las siguientes obras: *Proyecto PmaCO*, de R. Campos, I. Barrios y A. González (2013, p. 23) y *Edafología del trópico*, de Wagner Peña Cordero (2017, p. 84).

La porosidad de los suelos varía mucho en zonas boscosas (de 44 a 91 %) donde, generalmente, es mayor en los horizontes superficiales (65 %) que en los subsuperficiales (56 %). En comparación con las primeras, las zonas de cultivo ostentan una reducción de los macroporos, por lo que la porosidad disminuye (Meza y Geissert, 2003). En un suelo poco disturbado o para fines agrícolas, se busca que los suelos tengan porosidades de 40 a 60 %.

En la Figura 38 se registra cómo varía la porosidad del suelo con respecto al material de partida y a los horizontes, según un estudio efectuado en la zona de Talamanca, Costa Rica.

FIGURA 38 POROSIDAD EN LOS HORIZONTES A Y B DE ULTOSOLES CON DIFERENTE MATERIAL PARENTAL (TALAMANCA, COSTA RICA). En el gráfico se puede observar que, independientemente del material por el cual están formados, hay mayor porosidad en los horizontes A del suelo. La porosidad disminuye en el horizonte B debido a la compactación de este tipo por el peso del material.

FUENTE: «Caracterización de la densidad de algunos suelos ultosoles en la zona de los Santos, Talamanca, Costa Rica», de Miguel Chinchilla, Rafael Mata y Alfredo Alvarado (2011, p. 71).





De acuerdo con el resultado del estudio graficado en la Figura 38, el porcentaje de porosidad disminuye en el horizonte B en relación con el A: el A tiende a ser más poroso porque posee un mayor contenido de materia orgánica y de raíces, así como más actividad biológica. También se observa que los suelos del mismo orden (ultisoles) con diferente material parental de formación divergen en la porosidad: los coluviales son los menos porosos con respecto a los suelos con materiales volcánicos o sedimentarios.

Se deben diferenciar dos conceptos: porosidad e infiltración de agua pues el hecho de que existan más poros no siempre significa que la infiltración sea más rápida: porque esta última depende del tamaño de los espacios entre las partículas y no necesariamente de la porosidad. Los espacios entre las partículas del suelo sirven de depósito de agua y de aire. El agua en el suelo es afectada, además del tamaño de los poros, por la fuerza de gravedad, la tensión superficial y la fuerza de adhesión que actúe entre estos, en especial en los microporos y mesoporos; y la humedad del suelo. Algunos de esos conceptos se explican en el siguiente subtema.

E. AGUA EN EL SUELO

En la Tierra, más de 97,5 % del agua es salada y 2,5 % restante es agua dulce. Alrededor de 68,7 % del agua dulce se encuentra en estado sólido (congelada) y 31,3 % complementario se queda en el suelo. De este último, solo 1,2 % del agua se halla en la superficie, depositada en lagos, ríos, humedales y represas (BOGGIANO, 2015, p. 18).

El agua es primordial para la productividad del ecosistema. En el sector agrícola se patentiza la escasez de este recurso porque la agricultura se vincula a 70 % de la extracción de agua dulce del mundo y la mayor parte de esta se evapora o es descargada en el mar, donde una porción también se evapora. Por el ciclo del agua, esta regresa en forma de lluvia. Con el desarrollo económico, el aumento de la población y la expansión industrial, junto con el cambio climático y el desabastecimiento y la contaminación de aguas, el manejo del tema del agua es vital.

La FAO (2013) hace referencia a la necesidad de luchar intensamente contra la desertificación y en pro de la seguridad alimentaria. Costa Rica y otros países, por medio de comisiones como



CADETI (Comisión Asesora sobre Degradación de Tierras), han trabajado esa propuesta a través de un Programa de Acción Nacional, el cual articula las acciones institucionales y las normativas del Gobierno y la sociedad civil, que trabajan para mitigar la degradación de tierras mediante el ordenamiento territorial por cuenca (CADETI, 2004).

Conocer las fases del ciclo del agua en su paso por el suelo es indispensable para determinar pautas de calidad y de manejo de este recurso. El ciclo hidrológico se puede sintetizar de la siguiente forma: cuando llueve, una parte del agua que llega al suelo se evapora y la otra se escurre en la superficie por arrastre o se infiltra en el subsuelo. De la parte que no se evapora, una cantidad se queda retenida en los poros medios o en los finos; otra es absorbida por las plantas (almacenan cerca de 0,003 % de agua dulce disponible) y la otra fluye por los drenajes profundos. Todos los movimientos del agua mencionados en la trayectoria de la lluvia -su evaporación y su paso a través del suelo en forma de escorrentía o infiltración- cumplen funciones vitales en los mantenimientos de los ecosistemas terrestres y acuáticos, lo mismo que en la regulación de la temperatura y del clima en general (FAO, 2013).

El agua en el suelo se encuentra en solución con cationes y aniones provenientes de otros compuestos y se genera una sustancia (la cual puede presentarse en estado gaseoso, líquido o sólido) esencial en muchas funciones, tales como:

- Nutrición de las plantas
- Formación del suelo
- Evapotranspiración del suelo
- Ciclos biogeoquímicos de las plantas y los animales del planeta y sus interacciones

En los poros del suelo, el agua puede quedar atrapada en los más pequeños, por las fuerzas de adhesión y las capilares; o en los más grandes puede mantenerse en movimiento.

1. PROPIEDADES DEL AGUA

La molécula de agua (H_2O) presenta una estructura asimétrica: a nivel de distribución espacial, los tres átomos forman un ángulo de 105°, cuyo vértice es el oxígeno y, por la influencia de



los dos pares de electrones que posee este átomo, el resultado es un tetraedro (FIG. 39).

Los dos enlaces O-H son covalentes polares por la diferencia de electronegatividad (afinidad por los electrones) entre el hidrógeno y el oxígeno. En estado líquido, los dipolos eléctricos ocasionan que las moléculas de agua se unan mediante un enlace denominado **enlace de hidrógeno**, el cual se forma entre un par de electrones del oxígeno de una molécula y el hidrógeno de otra. Los enlaces de hidrógeno provocan cohesión entre las moléculas.

Las propiedades del agua en su estado líquido son un alto punto de ebullición (paso de la fase líquida a la de vapor), baja conductividad eléctrica y alta constante de polaridad, ya que una parte de la molécula tiene carga positiva y otra negativa. Las moléculas de agua tienen una acción solvente, gracias a la capacidad de formar enlaces con otros compuestos. La propiedad como solvente del agua beneficia a la flora, ya que a partir de diferentes soluciones acuosas las plantas toman, por absorción, los elementos del suelo (NÚÑEZ SOLÍS, 1981).

El agua ejerce varios tipos de fuerzas en el suelo como la tensión superficial y la interfacial. La **tensión superficial** es la fuerza ejercida por cada unidad de longitud en el borde de una superficie libre de un líquido. El fenómeno se debe a que las moléculas de la superficie son retenidas por fuerzas que ejercen las moléculas del interior. Se manifiesta, por ejemplo, si un líquido entra en contacto con un sólido y una parte de uno queda adherida al otro, como cuando una flor flota en el agua. La tensión superficial contribuye a formar las soluciones en el suelo de las cuales las plantas absorben los nutrientes.

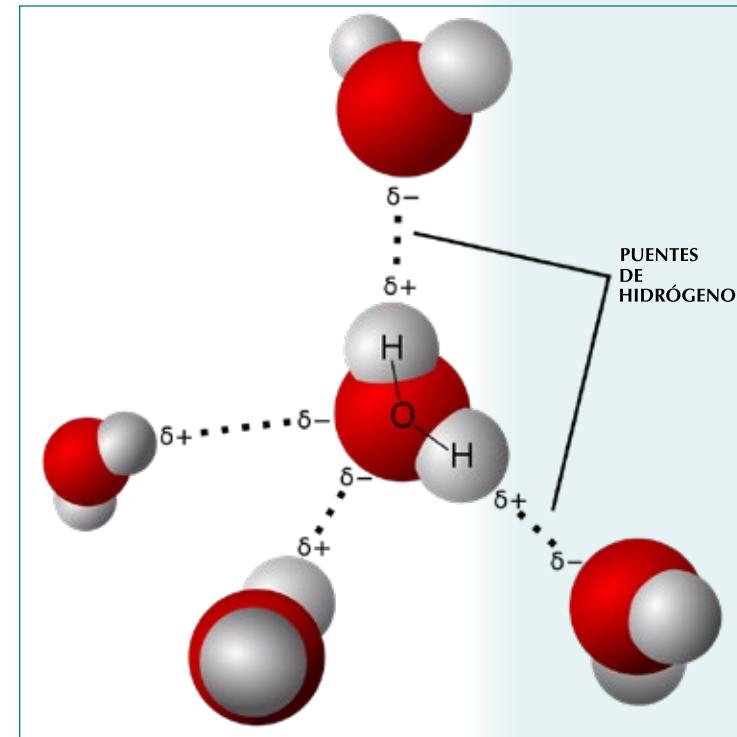


FIGURA 39. PUENTES DE HIDRÓGENO ENTRE MOLÉCULAS DE AGUA. La figura representa la estructura del agua, la cual posee tres átomos, los cuales forman un ángulo de 105°, cuyo vértice es el oxígeno.

FUENTE: Hydrogen bond. Archivo: 3D model hydrogen bonds in water.svg., ilustración de Magasjukur2. Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons.



El **potencial del agua** desde el punto de vista de la relación con el suelo se define como «el trabajo requerido para transportar una cantidad de agua unitaria desde un nivel dado con potencial cero hasta una nueva posición con un potencial definido» (NUÑEZ SOLÍS, 1981, p. 70). De acuerdo con la misma fuente, para que el agua se mueva a través del suelo, se desarrollan cuatro tipos de trabajos (potenciales), los cuales se describen brevemente a continuación:

- a) **Potencial químico.** Se relaciona con la composición química de la solución del agua en el suelo. El agua pura tiene un potencial químico igual a cero, pero como en el suelo hay elementos disueltos en ella, el potencial del agua disminuye y se vuelve negativo, por efecto de las fuerzas del vapor de agua.
La presión de vapor de una sustancia es la que ejerce el vapor o la fase gaseosa sobre la fase líquida en una temperatura determinada.
- b) **Potencial gravitacional.** Es el trabajo ejercido por la gravedad, el cual se relaciona con el peso del líquido. El potencial gravitacional junto con el potencial de presión se denomina potencial hidráulico; el cual es muy utilizado para estudiar el movimiento del agua en los suelos.
- c) **Potencial hidráulico.** Es la suma potencial gravitacional junto con el potencial de presión
- d) **Potencial de presión.** Este potencial está referido a las fuerzas combinadas que atraen y retienen el agua; es decir, las de adhesión y las de cohesión. Tales fuerzas retienen el agua y la presión en el agua del suelo se reduce, comparada con la presión atmosférica. Al respecto, Jorge Núñez Solís (1981) manifiesta lo siguiente:

Esta disminución de capacidad de movimiento se ve afectada por la presión de aire que rodea al sistema y a la matriz coloidal del suelo (el material parental y humos con agua y aire contenidos en los poros) y sus características; ya sea en adsorción y absorción y la presión atmosférica (p. 72).

Mediante la **fuerza de adsorción**. Un elemento o molécula es atrapado por un material a nivel de superficie; por ejemplo, la fuerza con que una arcilla retiene el calcio. Mediante la **fuerza de absorción**, un elemento penetra en el interior de otro material y se constituye una solución (Fig. 40).



CONCEPTOS

adsorción. Proceso en el que moléculas, iones o átomos de una fase se adhieren sobre la superficie de otra fase, generalmente sólida.

absorción. Proceso en el cual las moléculas, los iones o los átomos de una fase penetran en otra fase y se distribuyen uniformemente en esta; como resultado, se constituye una solución (v. Fig. 40).



- e) **Potencial osmótico.** Cuando una membrana semipermeable divide dos soluciones acuosas con diferente concentración de sales, las moléculas de agua se mueven desde la solución de menor concentración hacia la de mayor concentración. La variación de la actividad de la molécula de agua ante la presencia de sales se debe a que estas reducen la presión del vapor de agua y, por lo tanto, crean diferencias de presión de difusión (movimiento aleatorio que hacen las partículas de las sales al mezclarse en el agua).

La cantidad de agua contenida en el suelo se estima por medio de índices de humedad. Una vez que el agua es retenida en el suelo por las fuerzas de adhesión, capilaridad y la matriz coloidal, se forma el potencial matricial. Para determinar los índices de humedad de los potenciales matriciales del agua, se requiere utilizar equipo en el campo, como los densímetros nucleares, los tensímetros y los medidores de resistencia.

El primero es un equipo que utiliza iones radioactivos, por ejemplo, cesio y americio, para precisar por medio de rayos gamma el porcentaje de humedad que hay disponible en el suelo. Los dos últimos revelan la fuerza, en bares o en atmósferas, que ejercen las raíces para extraer del suelo la humedad que necesita el cultivo.

En el caso de los tensímetros, una vez se instalados, la humedad del suelo entra en un equilibrio con la zona de la capa porosa (punta de cerámica) del instrumento; cuando exista una disminución de agua se ejercerá más tensión. Las lecturas puntuales se hacen mediante un manómetro, en el caso de los tensímetros; o de una pantalla, en los medidores de resistencia. Ambos pueden estar conectados a sistemas inalámbricos y a un ordenador que puede indicar, de forma remota, la necesidad de riego en los campos o en los invernaderos.

Existen diferentes grados de tensión ejercida (atm) por el agua en una masa de suelo, después de que el suelo ha drenado completamente, los cuales son conocidos como coeficientes hídricos. De seguido, se resume la información sobre los tres coeficientes hídricos:

- i. **Capacidad de campo (CC).** Es la cantidad de agua retenida en el suelo después de que ha drenado el agua gravitacional y cuando la velocidad del movimiento descendente del agua dis-



minuye sustancialmente. El valor de la presión atmosférica a la que se retiene el agua es 1/3 atm. (PEÑA CORDERO, 2015).

- ii. **Punto de marchitez permanente (PMP).** Es el contenido de agua de los suelos en el cual las plantas no alcanzan a absorberla, a causa de la imposibilidad de vencer la presión con que el líquido se encuentra retenido (alrededor de 15 atm de presión). En este punto, las plantas empiezan en estrés hídrico que provoca su desecación.

El contenido de agua en el suelo varía con la textura; por ejemplo, el coeficiente de marchitez permanente en suelos de textura arcillosa es superior que en los de textura franca (Silva, 2002), debido a la mayor capacidad de retención de humedad de los arcillosos.

- iii. **Coeficiente higroscópico (CH).** Coeficiente en el cual la cantidad de agua que tiene el suelo varía conforme la humedad atmosférica o la humedad del suelo se equilibra con la del medio. Ocurre cuando la presión sobre el agua contendida es 31 atm; esta agua no es biológicamente útil.

CUADRO 12

COEFICIENTE HÍDRICO
SEGÚN PRESIÓN ATMOSFÉRICA

PRESIÓN (ATM)	COEFICIENTE HÍDRICO
De 0,0001 hasta 0,1	Agua gravitacional.
De 0,3333 hasta 1	Agua a capacidad de campo.
15	Punto de marchitez permanente.
De 15 hasta 10 000	Agua higroscópica.

FUENTE: *Fundamentos de edafología*, de Jorge Núñez Solís (1981, p. 76).

En resumen, la interpretación del contenido del agua en el suelo dependerá de la presión atmosférica (CDR. 12).

En el suelo, existen también diferentes clases de agua, las cuales puede diferenciarse según su ubicación en el medio. Por ejemplo, pueden estar retenidas, absorbidas o en escorrentía. Los términos técnicos

para cada una de las clases de agua se explican seguidamente:

- **Agua gravitacional.** Cuando el suelo se satura con agua por medios naturales y artificiales, esta ocupa todo el espacio poroso. Los potenciales de presión y osmóticos en este punto no existen; es decir que se considera agua no disponible, ya que se mueve rápidamente por gravedad.
- **Agua capilar.** La retenida por las fuerzas resultantes de la tensión superficial del agua. Esta agua está biodisponible para las plantas, donde una parte se encuentra fuertemente adherida a los materiales.
- **Agua higroscópica.** Es la retenida en los poros más finos. Se halla inactiva y atrapada por las fuerzas electrostáticas del suelo. Por eso, esa agua no es provechada por los poros.



En la Figura 40 se aprecian las distintas condiciones de humedad en el suelo. Idealmente, en campos agrícolas, es necesario mantener el riego hasta llegar a capacidad de campo para que las plantas tengan la posibilidad de aprovechar la humedad del agua (Ha); por eso, se monitorea el contenido de agua y se evita llegar a punto de marchitez permanente, donde el agua higroscópica no podrá estar disponible para las plantas.



FIGURA 40. CONDICIONES DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO. El volumen ocupado por un suelo está conformado por el espacio conformado por los materiales minerales y por los poros. Los poros pueden estar ocupados por agua y estos representan el agua volumétrica. Cuando un suelo está en estado de saturación, parte de esa agua se pierde en el drenaje a través del perfil de suelo y, una vez que se drena todo el líquido, el suelo se encuentra en capacidad de campo. En esa capacidad de campo todavía queda agua retenida en los poros del suelo y la planta puede aprovechar el agua para sus procesos fisiológicos. Si un suelo se encuentra en el punto de marchitez permanente es resultado de que el agua se presenta de forma higroscópica; es decir, el agua no se encuentra disponible para las plantas debidas que se incrementa la fuerza con que el agua es retenida.

ABREVIATURAS: E: porosidad; Sat: saturado; CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente; HA: humedad aprovechable.

FUENTE: adaptada de «Dinámica del agua en el suelo». Archivo: Humedad en el suelo.jpg. ilustración de Diego Márquez (2010). Reproducida con fines educativos bajo licencia Wikimedia Commons.

2. DETERMINACIÓN DE HUMEDAD EN EL SUELO

En el suelo se determina la humedad de forma gravimétrica y volumétrica.

Para calcular la humedad gravimétrica del suelo, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\omega = \frac{(P_{sh} - P_{ss})}{P_{ss}} \cdot 100$$

Donde: ω : humedad gravimétrica, expresada en porcentaje

Psh: peso del suelo húmedo

Pss: peso del suelo seco

La humedad volumétrica se determina en relación con la densidad aparente del suelo y se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$\theta = \% \omega \cdot \delta_a / \delta_{\text{agua}}$$

**CONCEPTO****conductividad hidráulica.**

Propiedad que refleja el nivel de drenaje de un suelo. Esta propiedad refleja la facilidad del agua para movilizarse en distintas direcciones. Esta facilidad es determinada o analizada según la velocidad en que se da este movimiento.

**EN LA RED...****CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA**

Observe el video «Análisis de Suelos: Llueve sobre mojado», producido por Audiovisuales UNED, para la Cátedra de Gestión Sostenible de Suelos (GESS) de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales (ECEN), que trata sobre la descripción del proceso de toma de muestras de conductividad hidráulica en el suelo.

Accédelo en la siguiente dirección <https://www.youtube.com/watch?v=DxYLOaXtGBU&list=PLelX_dGDBCryE3Vt2Cbh123XaNUXRH-q&index=5&t=459s> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.

**ACTIVIDAD**

Para indagar sobre la conductividad hidráulica del suelo, busque información sobre la Ley de Darcy, en relación con la determinación de esta particularidad.

Donde: θ : humedad volumétrica

ω : humedad gravimétrica (en porcentaje)

δ_a : densidad aparente (g/cm^3)

δ_{agua} : densidad del agua ($1 \text{ g}/\text{cm}^3$)

3. MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO

El movimiento del agua y su dirección se conocen como la permeabilidad de un suelo, esta depende de la viscosidad del agua, de la **conductividad hidráulica** y del potencial gravitacional.

Dicho movimiento depende del estado de saturación del líquido en el suelo. Cuando un suelo no se halla saturado, el agua de lluvia o de riego se absorbe y se mueve por los horizontes superiores, o sea, se infiltra.

Luego, se aprecia un descenso del agua hasta los horizontes más internos o inferiores: esta se percola y llega al nivel freático, cuya profundidad varía de acuerdo con el perfil del suelo. Si el suelo se encuentra saturado o está muy compactado, la mayoría del agua corre superficialmente, por escorrentía.

El movimiento del agua y la dirección en la que se desplaza varían con las características del suelo y pueden medirse gracias a la conductividad hidráulica. La conductividad hidráulica es lenta o muy alta, ya que la perjudican los siguientes factores:

- Textura del suelo: porcentaje de porosidad, tipo de poros predominantes y la continuidad que tengan estos.
- Grietas en el suelo por actividad biológica, raíces, entre otras.
- Estructura del suelo.
- Contenido de materia orgánica.
- Existencia de horizontes con mucha permeabilidad: horizontes B o E con altos contenidos de arcillas, conocidos como argílicos.
- Presencias de un horizonte duripan: capas cementadas que impiden el movimiento del agua.

Un ejemplo de cómo influye la textura del suelo en la conductividad hidráulica es la diferencia que se observa en el bulbo húmedo, espacio (volumen) de suelo húmedo que se crea por algún sistema de riego localizado; el movimiento del agua en el suelo se



determina según la forma y el tamaño del bulbo húmedo. En suelos con clase textural arenosa, el agua circula con más facilidad hacia abajo; mientras que, en suelos arcillosos, el líquido se extiende con más facilidad hacia los lados (FIG. 41).

Otra propiedad física que influye sobre el movimiento del agua es la estructura. En estructuras «migajosas» o granulares, la infiltración es rápida y en condiciones de bloques o prismas es moderada. En las estructuras laminares o masivas, el movimiento del agua es más lento.

En suma, las propiedades físicas del suelo más relevantes, por su interacción con el aspecto nutricional de las plantas que ahí se desarrollan, son:

- **Textura.** La textura gruesa tiene menos capacidad de intercambio de aniones que las texturas livianas, por lo que influye en la fertilidad del suelo.
- **Estructura.** Las estructuras inciden sobre el desarrollo y, además, en la aireación y circulación del agua.
- **Profundidad de la capa arable.** La profundidad de esta capa es vital para el desarrollo radicular y así aumentar el área de exploración.
- **Densidad/compactación.** En los suelos que presentan una capa dura (capa de acumulación de arcillas en el sub suelo), se dificulta la penetración física de las raíces e inhibe su desarrollo por falta de oxígeno.
- **Contenido de humedad.** En cuanto a que propicia la falta de oxigenación y modifica la disponibilidad de los elementos sensibles a las reacciones de reducción y oxidación (redox); dicho tema se estudia, posteriormente, en esta unidad didáctica.

F. COLOR DEL SUELO

El color del suelo es una de las propiedades físicas más fáciles de determinar y que, según la morfología, permite notar cambios a través de los horizontes.

La coloración de los suelos es muy variable. Tres de los factores que influyen en ella son: el estado de evolución, donde intervie-

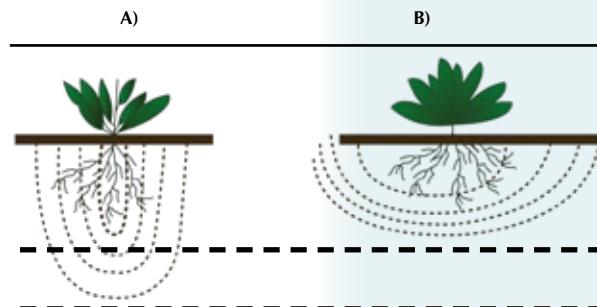


FIGURA 41. FORMA DEL BULBO HÚMEDO EN EL SUELO, SEGÚN LA CLASE DE TEXTURA: A) La ilustración representa cómo el agua que escurre de forma perpendicular corresponde a suelos con texturas más gruesas como las arenas, esto se debe a que el líquido drena más fácil por el perfil del suelo; B) observe en la imagen cómo el bulbo de acción del agua es más ancho porque a mayor presencia de arcillas, los líquidos se extienden con más facilidad hacia los lados.

FUENTE: «El riego por goteo a nivel familiar», de Héctor Amilcar Rodas Ruiz y Patricia I. Cisneros de Ramírez (2000). MAG (Ministerio de Agricultura y ganadería) Reproducida con fines educativos.



ATENCIÓN

Las pruebas de conductividad son útiles en los procesos de detección de problemas de inundación o mal drenaje. Como ejemplo en el caso de instalación de fosas sépticas son de mucha utilidad para valorar el adecuado funcionamiento de los drenajes sanitarios.



nen los agentes formadores del suelo, la presencia de humus y la productividad del suelo. Por ejemplo, matices negros se asocian a altas concentraciones de ácidos húmicos; tonos rojizos corresponden a una alta meteorización, en la que predominan los procesos de oxidación; los amarillos y marrones se relacionan con óxidos de hierros hidratados, y las coloraciones blancas o diluyentes de color se emparentan con la presencia de materiales cálcicos o con un alto contenido de yeso o sílice (MUÑOZ, 2016).

En la determinación del color de un suelo inciden diversos aspectos como la luz y la humedad de la muestra. Generalmente, se colecta la muestra de suelo en húmedo y es comparada con las matrices (tablas de color) del sistema Munsell. Este sistema caracteriza todos los posibles colores con base en tres coordenadas: i) el matiz o hue, que mide la composición cromática de la luz que alcanza el ojo; ii) la claridad, conocida como value, la cual corresponde a la luminosidad de un color en relación con una escala de gris neutro; y iii) la pureza o chroma, que es el grado de saturación del gris neutro (OVALLES, 2003).

IV. *Propiedades químicas del suelo*

Muchos factores inciden en el desarrollo de las plantas y uno de los más importantes está relacionado con las propiedades químicas del suelo. El estudio de estas propiedades es esencial para la compresión de los sistemas naturales y los sistemas productivos. La fertilidad natural de un suelo a nivel de ecosistemas naturales ejerce gran importancia en la diferenciación de especiación de la vegetación y de plantas endémicas y, en el caso de sistemas productivos, representa la obtención de un adecuado rendimiento, que no afecte sobre el ingreso económico por los costos de aplicación de fertilizantes.

Estas propiedades varían en el tiempo y la meteorización es uno de los procesos que más influye sobre esta propiedad. El estudio de tales propiedades permitirá reconocer cambios químicos o reacciones que alteran el sistema edáfico y problemáticas que se derivan de estas y, con ello, plantear soluciones adecuadas en términos de mejora de la calidad de los recursos.



A. ELEMENTOS DEL SUELO

Las rocas afectadas por los factores formadores del suelo y la meteorización química del suelo liberan los minerales utilizados en la nutrición de las plantas y en procesos biogeoquímicos de microorganismos, ya sea como catalizadores o para formar estructuras proteicas.

La meteorización química hace que los elementos alcalinos y alcalinotérreos se separen de la estructura aniónica de los compuestos; en la solución acuosa ácida del suelo, son sustituidos por hidrógenos; así se originan las arcillas. Posteriormente, gracias a los procesos de hidrólisis, se produce un intercambio iónico del mineral al medio acuoso (*CDR. 13*).

CUADRO 13
PROPORCIÓN DE CONSTITUYENTES SEGÚN EL MATERIAL PARENTAL

CONSTITUYENTE	ROCAS ÍGNEAS PROMEDIO %	SUELO VOLCÁNICO RECIENTE %	SUELO MEDIANA- MENTE METE- ORIZADO %	SUELO ALTAMENTE METEORIZA- DO %	ROCA VOLCÁNICA %
SiO_2 Óxido de silicio	59,1	49,2	31,4	3,3	62,0
Al_2O_3 Óxido de aluminio	15,3	20,0	25,3	18,5	19,5
Fe_2O_3 Óxido de Hierro (III)	7,3	17,5	1,3	63,0	4,5
TiO_2 Óxido de titanio (IV)	1,0	1,7	1,1	0,8	0,8
MnO Óxido de manganeso (II)	0,1	nd	nd	0,4	0,6
CaO Óxido de calcio	5,1	1,0	0,1	0,1	5,0
MgO Óxido de magnesio	3,5	1,0	0,1	0,3	2,1
K_2O Óxido de potasio	3,1	0,6	0,5	0,1	1,8
Na_2O Óxido de sodio	3,8	1,3	0,1	0,5	4,3
P_2O_5 Óxido de fósforo (III)	0,3	nd	nd	nd	0,2
SO_3 Óxido de azufre (VI)	0,1	nd	nd	nd	0,0

nd: no hay datos

FUENTE: *Química de los suelos con énfasis en América Latina*, de Hans W. Fassbender y Elemer Bornermisza (1987, p. 12).



CONCEPTO

plantas C₄. Se refiere a plantas que poseen estructuras foliares de doble capa concéntrica, alrededor de los haces conductores donde se localizan las células con clorofila. Se diferencian de las plantas C₃ (las cuales son la mayoría) porque las reacciones que necesitan luz y el ciclo de Calvin suceden en lugares diferentes de la planta. Además, aumenta la concentración del CO₂ para su fijación, lo que facilita cerrar sus estomas; caso contrario a las C₃ que no lo pueden realizar. Esto también permite mayor retención de agua en las plantas C₄, pues son características de plantas localizadas en zonas calientes, aunque no específicas de estas.

En conjunto, la capacidad de intercambio catiónico (retención de estos entre láminas) y la de adsorción de los elementos (retención de estos en la superficie) funciona el equilibrio de la solución del suelo y de la fertilidad natural del suelo. En la superficie, se reconocen 17 elementos esenciales para el desarrollo y la productividad de las plantas, los cuales son:

Carbono [C], hidrógeno [H], oxígeno [O], nitrógeno [N], fósforo [P], potasio [K], calcio [Ca], magnesio [Mg], sodio [Na], azufre [S], hierro [Fe], manganeso [Mn], boro [B], cobre [Cu], cinc [Zn], molibdeno [Mo] y cloro [Cl].

Cada uno de estos elementos es fundamental en la naturaleza. Se dividen en tres grupos:

1. **Elementos esenciales para la vida.** Carbono, hidrógeno y oxígeno, localizables en altas concentraciones en la naturaleza.
2. **Macronutrientos primarios.** Nitrógeno, fósforo y potasio, y los macronutrientos secundarios, como calcio, magnesio, sodio y azufre. El elemento sodio, algunos investigadores no lo toman como macronutriente secundario; recientemente, se ha enlistado por su importancia en las **plantas tipo C₄** y halofitas.
3. **Micronutrientos.** Hierro, manganeso, boro, cobre, cinc, molibdeno, níquel y cloro.

Existe una nueva propuesta de integrar algunos componentes en un cuarto grupo llamado «elementos traza esenciales», a saber: aluminio, bromo cobalto, cobre, flúor, hierro, yodo, rubidio, silicio, titanio y vanadio (KABATA-PENDIAS Y PENDIAS, 2001).

Otros elementos pueden ser o no ser necesarios para el desarrollo de las plantas, eso depende de los requisitos nutricionales específicos. Igualmente, existen elementos asociados más a la formación de compuestos orgánicos, como es el caso del nitrógeno o del azufre.

Los elementos en el suelo no solo se hallan participando en compuestos iónicos o en moléculas, sino en diferentes arreglos químicos (compuestos químicos), los cuales son las formas en que los absorbe la planta (*CDR. 14, P.SIG.*).

Los coloides del suelo, tanto las arcillas como la materia orgánica, atraen cationes, por ejemplo, los iones potasio, sodio, hidrógeno, calcio y magnesio y los retienen. También en el suelo hay



CUADRO 14
ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES EN EL SUELO

TIPO DE ELEMENTO	ELEMENTO QUÍMICO	ION PRESENTE EN LA SOLUCIÓN DEL SUELO	CARACTERÍSTICAS ATÓMICAS		
			Z	A (UMA)	RADIO (Å)
macronutrientos primarios	Nitrógeno	NO_3^- , N_2 , NH_4^+	7	14	0,92
	Fósforo	PO_4^{3-} H_2PO_4^- HPO_4^{2-}	15	31	1,28
	Potasio	K^+	19	39	2,35
Macronutrientos secundarios	Calcio	Ca^{2+}	20	40	1,97
	Magnesio	Mg^{2+}	12	24	1,60
	Sodio	Na^+	11	23	1,86
	Azufre	SO_4^{2-}	16	32	1,27
Microelementos	Hierro	Fe^{2+} ; Fe^{3+}	26	56	1,26
	Manganese	Mn^{2+} ; Mn^{3+} ; Mn^{4+}	25	55	1,26
	Cobre	Cu^{2+} , CuCl^+ , CuOH^+	29	64	1,28
	Cinc*	Zn^{2+}	30	65	1,39
	Boro	H_3BO_3 , BO_3^-	5	11	0,98
	Silicio	Si^{4+} , H_4SiO_4	14	28	1,32
	Aluminio	Al^{3+}	13	27	1,43
	Molibdeno	MoO_4^{2-} , MoO_4^{2-}	42	96	1,39
	Cobalto	Co^{2+} ; Co^{3+}	27	59	1,25
	Níquel*	Ni^{2+} ; Ni^{3+}	28	59	1,24
	Cromo	Cr^{2+}	24	52	1,27
	Plomo*	Pb^{2+}	82	207	1,75
	Cadmio*	Cd^{2+}	48	112	1,54
	Selenio	SeO_4^{2-} ; SeO_4^{2-}	34	79	1,16
	Cloro	Cl^-	17	35	1,81

compuestos con cargas negativas (aniones), como los cloruros, los nitratos, los sulfatos y los fosfatos. Los nitratos, por ser compuestos de carga negativa débil, no son retenidos por el suelo y se pierden fácilmente por lixiviación, al igual que los carbonatos, bicarbonatos y sulfatos.

Sin embargo, estos no se mueven solos en el suelo, sino que se comportan como acompañantes de los cationes, que permite la movilidad del calcio, el potasio y el magnesio (ACON, ALPÍZAR Y WINGCHIN, 2013). Los fosfatos también se pierden, pero muchos quedan fijados por las arcillas y en especial por las no cristalinas, características de los suelos volcánicos.

Z = número atómico;

A = peso atómico

* Son considerados metales pesados, según su concentración.

FUENTE: adaptado de *Edafología del trópico*, de Wagner Peña Cordero (2017, p. 114).



ATENCIÓN

Los suelos de montaña se asocian a la forma oxidada del hierro Fe^{2+} , debido a la meteorización y a la madurez del ecosistema.



Cada elemento cumple diferentes funciones en la planta y es primordial para que esta pueda desarrollarse la ausencia de alguno de ellos puede impedir completar el ciclo de la planta; a continuación, se describen esas funciones, de forma general, con base en las recopilaciones de Jorge Núñez Solís (1985), Donald C. L. Kass (1998) y Ana Cecilia Arias Jiménez (2001).

- **Nitrógeno.** Es el elemento más escaso en el suelo y, por ende, el más limitante en sistemas productivos a causa de la lixiviación, volatilización y escorrentía que ocurre en los suelos. Forma parte de la clorofila, por lo que se relaciona con las coloraciones verdes de las hojas. Constituye uno de los componentes principales de los aminoácidos y abunda en las hojas jóvenes. En los suelos se presenta como nitratos (NO_3^-) y como amonio (NH_4^+). En estos suelos alcalinos, el nitrógeno se pierde con más facilidad, por volatilización, ya que el amonio se transforma en gas amoniaco NH_3 , compuesto que, a la vez, es tóxico para las plantas. Los procesos de nitrificación, realizados por las nitrobacter y las nitrósonomas, se inhiben en pH ácidos inferiores a 4,5.
- **Fósforo.** Se encuentra presente durante todo el ciclo de vida de una planta. Se absorbe, principalmente, como ion HPO_4^{2-} . Es parte fundamental de la fotosíntesis, de la respiración y del almacenamiento y la transferencia de energía. La disponibilidad de fósforo está condicionada al pH del suelo y a la materia parental predominante. En condiciones de acidez, el fósforo es fijado y no se encuentra disponible para las plantas; lo mismo sucede en presencia de arcillas amorfas o no cristalinas. En suelos alcalinos, puede reaccionar con CaCO_3 y tiende a fijarse.
- **Potasio.** El potasio es el más conocido como activador de procesos enzimáticos; es esencial para la formación de frutos y en el llenado de los tubérculos. Es necesario en la respiración, en la fotosíntesis y en los procesos del metabolismo y balance hídrico de las plantas, como turgencia de la planta y uso eficiente de agua. Este elemento es absorbido en su forma iónica K^+ . En pH ácidos, se inhibe su absorción por competencia con el calcio.
- **Calcio.** Es básico en el desarrollo de las raíces y de las hojas, activa procesos enzimáticos sustanciales, neutraliza los ácidos orgánicos en las plantas e influye en el balance hídrico de las células y de la pared celular. En la solución del suelo, se encuentra como ion Ca^{2+} . En el intercambio catiónico del suelo, es desplazado por hidronios (H_3O^+) cuando hay mucha concentración de estos. A causa de los procesos de desplazamiento, la concentración de calcio también es condicionada por la concentración de magnesio. En pH ácidos se inhibe su absorción.



- **Magnesio.** Forma parte de la clorofila y de la síntesis de carbohidratos, de proteínas y de lípidos. Se absorbe, igual que lo hace el calcio, como ion Mg^{2+} . Es parte de la composición de las arcillas y se encuentra en la solución del suelo. Se comporta de forma similar al calcio en cuanto a movimiento en el suelo y en que su absorción se inhibe por pH ácidos.
- **Azufre.** Dicho elemento puede provenir del material parental y del aire por **difusión gaseosa** orgánica como fuentes inorgánicas, y del material vegetal como fuente orgánica; este último es el de más importancia. Las plantas lo absorben en forma de sulfato y constituye una parte considerable de los aminoácidos. Este elemento puede ser fijado en condiciones ácidas y se inhibe su absorción. En las leguminosas, el azufre estimula la formación de los nódulos, colonizados por la bacteria del género *Rhizobium*.
- **Hierro.** Está presente en la estructura de las enzimas y participa en los procesos de respiración y de fotosíntesis de las plantas. Es un componente esencial de la hemoglobina en los nódulos colonizados por la bacteria *Rhizobium*. Su disponibilidad depende del pH y se solubiliza en más proporción en condiciones ácidas. Este elemento es absorbido en forma de ion Fe^{2+} .
- **Manganoso.** Desempeña una función vital en la producción de clorofila y en la respiración de la planta. En el suelo, se presenta en forma iónica como Mn^{2+} , Mn^{3+} y Mn^{4+} . El Mn^{3+} se halla en suelos mal drenados y el Mn^{2+} , en suelos ácidos. El manganoso no se encuentra disponible en pH básicos.
- **Boro.** Participa en los procesos de división celular de las plantas, en la germinación del polen y en la formación del fruto, ya que es el encargado de transferir los azúcares del resto de la planta al fruto. También interviene en el metabolismo de los carbohidratos. La planta lo absorbe en forma de H_3BO_3 o H_2BO_3 . En el suelo, el boro se deriva de la mineralización de la materia orgánica y de la meteorización del material parental.
- **Cinc.** Activa enzimas de las plantas, como las que aceleran la síntesis de proteínas. Se disuelve mejor y está más disponible a pH ácidos. Este elemento es adsorbido por la materia orgánica del suelo y por las arcillas en forma de catión (Zn^{2+}). Existe una relación inversa entre la concentración del fósforo y la del cinc en el suelo.
- **Cobre.** Es parte fundamental de los cloroplastos; participa en los procesos de oxidación y reducción (redox). Se absorbe como Cu^{2+} , $CuOH^+$ y $CuCl^+$. La cantidad de cobre en el suelo es muy baja; sin

CONCEPTO

difusión gaseosa. Paso de moléculas gaseosas a través de aberturas que las plantas tienen en las hojas. Un ejemplo claro de este proceso es el paso del CO_2 a través de los estomas de las plantas, el cual marca el inicio al proceso de la fotosíntesis.

ATENCIÓN

La interacción de nódulos existentes en las plantas o formados por la infección de *Rhizobium* en leguminosas es una de las más conocidas, gracias al aporte de las bacterias en el proceso de fijación biológica de nitrógeno y es, agronómicamente, la más importante porque permite establecer sistemas de producción más eficientes en el uso de recursos o insumos y minimizar la dependencia a fertilizantes sintéticos.

**CONCEPTOS**

caldo bordelés. Solución acuosa de sulfato de cobre y cal hidratada, utilizada desde tiempos antiguos para combatir enfermedades de las plantas, puesto que cumple la función de fungicida y acaricida.

ósmosis. Proceso de transporte pasivo en el que dos líquidos o gases se pueden mezclar gracias a una membrana semipermeable; ambas sustancias tienden a llegar al equilibrio al igualar sus concentraciones.

ósmosis. Proceso de transporte pasivo en el que dos líquidos o gases se pueden mezclar gracias a una membrana semipermeable; ambas sustancias tienden a llegar al equilibrio al igualar sus concentraciones.

embargo, se registran excesos de este elemento en zonas bananeras de América Latina por uso de **caldo bordelés** para el control de plagas, como se documenta en el trabajo de Ramón Rigoberto Hernández-Colorado, Ana L. Alvarado y Rosaura M. Romero (2012).

- **Molibdeno.** Es básico en la asimilación de los nitratos y en los procesos de fijación biológica de nitrógeno porque es un componente estructural de la enzima nitrogenasa. Asimismo, forma parte del nitrato reductasa. Responde a la variación del pH y su disponibilidad es menor cuando la solución del suelo es ácida.
- **Cloro.** Es un activador osmótico dentro de las células de las plantas y, combinado con el potasio, aumenta el potencial **osmótico**; así, permite que ingrese más cantidad de agua a la célula. El cloro es absorbido como ion cloruro (Cl^-) (NÚÑEZ SOLÍS, 1981).
- **Sodio.** Dicho elemento se encuentra como catión de sodio (Na^+) en el suelo y existen especies que acumulan gran cantidad de este elemento como las halófitas. En sistemas de producción en algunas plantas, puede ser usado como sustituto parcial de potasio ya que participa en la apertura y cierre de estomas. En plantas tipo C_4 el sodio está en las células del mesófilo donde participa en la conversión de piruvatos a fosfo-piruvato.
- **Níquel.** Este elemento, hasta el 2003, era casi desconocido dentro de las funciones de la planta y, por lo tanto, poco usado en la agricultura. Ahora, se sabe que forma parte de la composición de la enzima ureasa y que participa apreciablemente en la producción de etileno. Además, aumenta la resistencia de la planta a enfermedades, debido a que genera toxicidad para hongos, por ejemplo, la roya. Es absorbido en su forma iónica Ni^{2+} . Su solubilidad y, en consecuencia, sus absorciones por parte de la planta dependen del pH: ambas características son mayores en rangos ácidos (RODRÍGUEZ, WURR, FERRARI Y FERREIRA, 2014). El níquel es transportado por la xilema como complejos o quelatos orgánicos aniónicos.
- **Silicio.** Es parte de la composición de las arcillas, sin embargo, no todos los suelos de clase arcillosa tienen silicio soluble. Elemento primordial en la estructura de la mayoría de las **angiospermas**, ayuda a formar una planta más robusta, la cual se enfrenta mejor al estrés biótico y a las enfermedades. El silicio es absorbido por las plantas en pequeñas proporciones en forma de ácido monosilícico: $\text{Si}(\text{OH})_4$.
- **Cobalto.** Se encuentra comúnmente en rocas ígneas y en rocas sedimentarias. Forma parte de un grupo proteico asociado a un nucleótido de la vitamina B que funciona como coenzima; de ahí la



importancia de la fijación biológica de cobalto, ya que, por ejemplo, el *Rhizobium* necesita de la vitamina B12 para que se sintetice. El cobalto es absorbido como ion Co^{2+} y tiende a acumularse en los márgenes y las puntas de las hojas (ORTEGA Y MALAVOLTA, 2012).

- **Selenio.** En bajas concentraciones, es vital para la actividad del nitrato reductasa de *Escherichia coli*. Integra el ARN mensajero y, en consecuencia, desempeña un papel relevante en la síntesis de proteínas. Ingresa a una planta como ion seleniato (SeO_4^{2-}) o ion selenito (SeO^{2-}).

En resumen, los elementos se dividen, por su función bioquímica, en

- Elementos formadores de compuestos orgánicos: nitrógeno y azufre.
- Elementos relacionados con la conservación de la energía y con compuestos estructurales: fósforo, boro y silicio.
- Elementos involucrados en procesos redox: hierro, cobre, cinc, molibdeno y níquel.

Los elementos poseen mucha o poca movilidad en la planta, lo cual es útil para detectar deficiencias. De acuerdo con esta característica, Eimil, Sánchez y Rodríguez (2012) los clasifican en móviles, con movilidad variable e inmóviles, como se expone a continuación:

- **Elementos móviles:** nitrógeno, potasio, magnesio, fósforo, cloro, sodio y níquel. Los síntomas de deficiencia son visibles en primera instancia en las hojas viejas.
- **Elementos con movilidad variable:** azufre, cobre, cinc y molibdeno. Los síntomas de deficiencias son principalmente visibles en las hojas nuevas, ya que tienen a ser inmóviles.
- **Elementos inmóviles:** calcio, manganeso, hierro, boro y cobalto. Los síntomas de deficiencias son más visibles en las hojas nuevas.

En la naturaleza, existen elementos menores, adjetivados así porque las plantas los requieren en pequeñas cantidades, estos son los micronutrientos. Se consideran menores -o elementos traza- si su concentración máxima es 0,005 ppm. Cuando se encuentran en exceso en el medio y, además, tienen alta densidad y alta reactividad, entonces son metales pesados, tóxicos para algunos organismos si son consumidos.

En general, los metales pesados que se hallan en el suelo son plomo, cadmio, cromo, mercurio, cinc, cobre y plata. Pueden acumularse en el suelo y contaminar el agua y el suelo.



larse en los sistemas, en especial cuando se utilizan aguas negras para riego agrícola y plaguicidas o si existen proyectos de minería a cielo abierto. Quedan retenidos en el suelo de las siguientes maneras: disueltos en la solución, apresados en las arcillas, adsorbidos en la parte inorgánica y contenidos en la materia orgánica. También, a veces, se precipitan y se convierten en sólidos puros o mixtos. Por último, pueden ser absorbidos por las plantas e incorporarse a la cadena trófica (PRIETO, PRIETO, GUTIÉRREZ Y RAMÍREZ, 2009).

Existen plantas que pueden acumular más metales pesados que otras. Se conocen como hiperacumuladoras y son utilizadas, actualmente, como fitorremediadoras; es decir, son plantas con la posibilidad de brindar un servicio de almacenamiento biológico de metales pesados. De forma alternativa, semillas de especies como trigo, sorgo, cebolla, rábano, arroz y remolacha, entre otras, son empleadas para evaluar posibles contaminaciones y descubrir riesgos de sustancias peligrosas en el ambiente.

Recientemente, se identificó que también puede haber contaminación a nivel de antibióticos o metales de los antibióticos en el suelo: los coloides del suelo, sobre todo las arcillas, por su capacidad de cambiar las estructuras laminares (expandirse y contraerse), crean poros a nanoscala que atrapan a los antibióticos y los mantienen en su lugar (ARISTILDE, LANSONB, MIÉHÉ-BRENDLÉC Y CHARLET, 2016).

Para la determinación de los elementos químicos del suelo, es necesario llevar una muestra de este a un laboratorio de suelos donde, mediante técnicas de espectrometría de masas, entre otras, se especifica el tipo de elemento.

El nitrógeno y el carbono en el suelo se estiman en término de porcentaje; las bases como calcio, magnesio, sodio y potasio se reportan en centimoles por litro o por kilogramo de suelo seco (cmol (+) / kg_{ss}).

La cantidad de cada uno de los siguientes elementos: azufre, hierro, manganeso, boro, cobre, cinc, molibdeno, cloro, vanadio, silicio y cobalto se calcula en concentración de partículas por millón (ppm).

Cada laboratorio tiene un paquete de análisis de suelos llamado químico completo; generalmente, este análisis incluye los elementos



ATENCIÓN

La evaluación de contaminaciones, por medio de especies vegetales, consiste en realizar siembras en suelos contaminados o con posible contaminación y luego realizar los estudios a las plantas que se desarrollaron en el suelo. Estos estudios pueden ser evaluaciones de germinación (viabilidad, elongación radicular), desarrollo de brotes, evaluaciones químicas en las hojas mediante análisis foliares. Dicho análisis se hace para valorar el suelo contaminado y el proceso de la remediación aplicada a este. Tales pruebas se pueden hacer directamente en el campo o en el laboratorio, bajo diluciones de agua o de suelo y se deben establecer en condiciones controladas y con pruebas de laboratorio específicas.



como calcio, magnesio, potasio, fosforo, manganeso, hierro, cobre y cinc. La determinación de cualquier otro elemento debe solicitarse por aparte, como es el caso del nitrógeno o carbono. También podría determinarse la cantidad de elementos químicos a nivel foliar, al llevar muestras de hojas de la planta a un laboratorio especializado. Para cada cultivo existe una metodología en específico para la toma de la muestra foliar, generalmente se toman las hojas de edad intermedia, es decir, las hojas de las ramas ubicadas entre las más nuevas y las más viejas.

B. pH Y ACIDEZ DEL SUELO

La acidez, en los suelos de origen tropical, representa una problemática a nivel productivo, ya que tal parámetro influye sobre otras propiedades químicas del suelo que interrumpen el desarrollo adecuado de las plantas. Este se puede ver afectado, tanto por factores naturales (material parental, tiempo, clima, vegetación y topografía), por los efectos antropogénicos, como por un mal manejo de los suelos. El análisis del pH y la acidez del suelo son medidas que expresan el estado de la calidad del suelo, aspectos que se estudian con detalle a continuación:

1. CONCEPTO DE pH

El pH es una medida de la acidez o de la alcalinidad de una solución. Un ácido es cualquier sustancia que, en solución, tienda a entregar iones hidrógeno o hidronios al medio. El pH se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$$

$[\text{H}_3\text{O}^+]$ es la concentración molar (M) de hidronio. En la ecuación del pH, se representa también como la concentración de ion hidrógeno (H^+)

La molaridad (M) de las soluciones es la concentración que expresa el número de moles de soluto por litro de solución; $M = \text{moles}_{\text{sóluto}}/\text{L}_{\text{solución}}$.

Existe una escala de pH que se utiliza para establecer si una sustancia en solución es ácida o es alcalina, según el valor de su pH o unidad de pH. La escala es adimensional, se basa en la constante de disociación del agua pura y varía de 0-14, donde las soluciones con valores inferiores a 7 son ácidas; el valor 7 indica neutralidad


EN LA RED...

EL pH DEL SUELO

Observe el video «Análisis de Suelos: El pH del Suelo (Química en acción)», producido por Audiovisuales UNED, para la Cátedra de Gestión Sostenible de Suelos (GeSS) de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales (ECEN), donde se describe el proceso de toma de muestras de suelos para la medición de pH y acidez en los suelos.

Accédelo en la siguiente dirección <https://www.youtube.com/watch?v=AgFA4Qz2luY&list=PLeIX_dGDBCcryE3Vt2CbhI23XaNUXRH-q&index=6> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.





y las soluciones con valores superiores de 7 son alcalinas (Fig. 43). Por ejemplo, si la $[\text{H}_3\text{O}^+]$ de una solución es $6 \cdot 10^{6-} \text{ M}$, esta es ácida porque su pH es 5,22.

Para averiguar el pH, se usan instrumentos como el potencímetro de pH o pH-metro y cintas de papel con indicadores; entre estas, el papel de litmus o papel tornasol.

En la determinación del pH, primero, el extracto acuoso del suelo se disuelve en agua destilada y, en el caso de la acidez intercambiable, se utiliza KCl 1 M. El concepto de acidez intercambiable se explica unos párrafos más adelante.

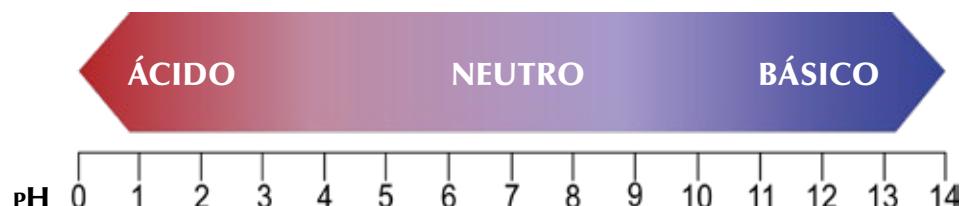
La molaridad (M), o concentración molar, es el número de moles de soluto por cada litro de disolución [mol/l].

Para evitar problemas en las lecturas, se aconseja tener en cuenta lo siguiente:

- La agitación de la solución de la muestra debe ser constante.
- La muestra debe estar diluida, según las condiciones que se explicaron.
- En los suelos con tendencia a concentrar sales, el pH se mide en una solución a la que se agrega CaCl_2 .

FIGURA 42. ESCALA DE pH. La escala de pH indica que mientras menor sea el valor, más ácido es el extracto; y mientras más alto sea el valor el pH es más básico. En el campo agrícola, generalmente, se busca que el suelo se encuentre entre valores entre 5,5-6,5.

FUENTE: adaptada del archivo: Escalaph.png. Ilustración de PatriciaR (2007). Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons.



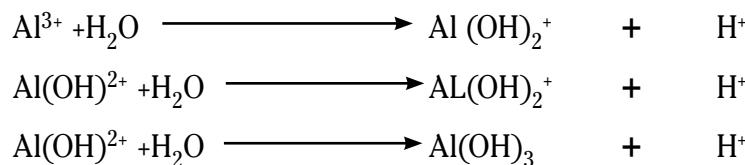
2. ACIDEZ DEL SUELO

La acidez en el suelo se suele reportar en la escala de pH y, como se mencionó, la acidez estrictamente se refiere a la cantidad de protones (H^+). La acidez del suelo se compone de acidez activa, la de cambio o intercambiable y la no intercambiable.

Los tipos de acidez del suelo se ilustran en la Figura 44. Ese diagrama involucra la **acidez activa**, que es medida y representada por la escala de pH, o sea, la concentración de iones hidrógeno (H^+), en la solución del suelo.



También en la figura se incluye la **acidez intercambiable**, la cual se asocia a un elemento muy conocido, el aluminio, que influye en la acidez de las arcillas en la solución del suelo: los iones de aluminio (Al^{3+}) son desplazados de las arcillas por otros cationes que, al hidrolizarse o hidratarse, forman moléculas compuestas por hidroxialuminio (ESPINOSA Y MOLINA, 1999, p. 4), como se observa en la siguiente fórmula química, la hidrolisis ocurre debido al desplazamiento de los iones (Al^{3+}), que reaccionan con una molécula de agua.



Este desplazamiento contribuye a la acidez en el suelo. La acidez intercambiable se suma a la generada por los iones de H^+ retenidos en los coloides del suelo por las fuerzas electrostáticas.

Fórmula acidez intercambiable:

% Saturación de acidez =

$$\text{Acidez (Al)} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} [\text{cmol (+) /L}] / \text{CICe} \times 100$$

Además, se encuentra la **acidez no intercambiable**: se origina cuando los hidrógenos unidos por enlaces covalentes a la superficie de los minerales presentan carga variable (carga tanto positiva como negativa), como el caso del humus.

La **acidez potencial** corresponde a la suma de la acidez intercambiable más la acidez no intercambiable (ESPINOSA Y MOLINA, 1999, p. 4).

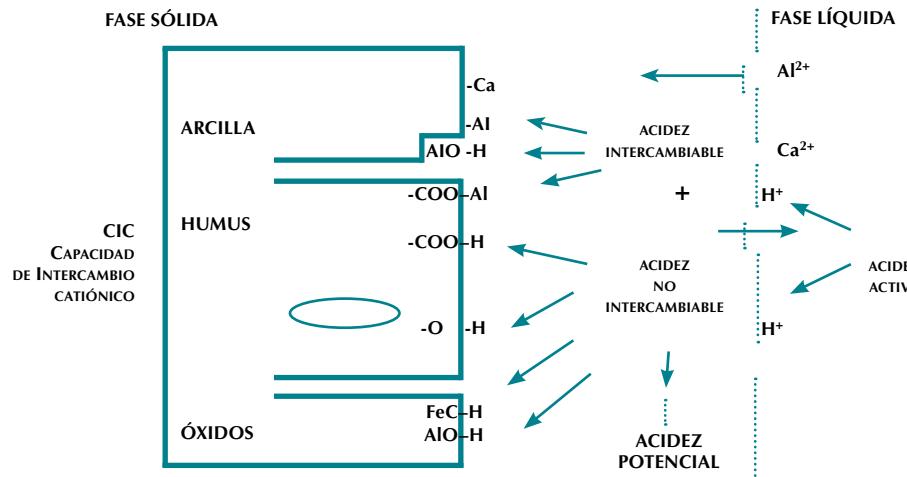


FIGURA 43. TIPOS DE ACIDEZ EN LA SOLUCIÓN DEL SUELO. En el diagrama se aprecia que la acidez activa corresponde a los hidrógenos que están en la solución del suelo y que provienen de fuentes como materiales parentales, lluvia, entre otros. La acidez intercambiable procede de los aluminios e hidrógenos que se retienen en el coloide (arcillas/humus) y la no intercambiable se identifica con aquellos hidrógenos que están en enlaces covalentes con óxidos de hierro o aluminio. La acidez potencial corresponde a la suma de la acidez intercambiable y no intercambiable.

FUENTE: «Acidez del suelo y uso de enmiendas», de Eloy Molina (2014). Reproducida con fines educativos.



Los valores del pH en el suelo oscilan entre 3,5 (muy ácido) y 9,5 (muy alcalino); en Costa Rica y países con condiciones similares, cerca de 20 % de los suelos son ácidos, lo cual causa serios problemas a nivel nutricional para la producción agropecuaria (BERTSCH, 1986).

La acidez natural de un suelo depende, primordialmente, de los procesos naturales que ocurren en este y, luego, del tipo, del origen, del cultivo y de la flora, así como del manejo del terreno. Esto es parte natural de los procesos de la formación de los suelos, por lo que podemos dividir fuentes naturales de acidez y procesos antropogénicos que afecta la acidez.

Las fuentes naturales de acidez se resumen de la siguiente forma:

- a) **Exudados de ácidos orgánicos generados por raíces de plantas.** Se originan porque la mayoría de las plantas utilizan los cationes del suelo para la producción de biomasa y, por balance de cargas interno (raíz) con el medio externo, libera H⁺ para establecer el equilibrio.
- b) **Material parental.** Los cambios del material parental, por acción de la meteorización, producen reacciones de hidrólisis de los minerales solicitados. La tendencia de suelos ácidos, según el material, es más común en suelos tropicales, los cuales buscan la estabilización del componente, que, de acuerdo con el grado de concentración de SiO₂, los suelos se vuelven más ácidos. Desde la perspectiva mineralógica también se pueden afectar la acidez, ya que los materiales de tipo arcillas 1:1 o 2:1, o los compuestos por óxidos de hierro y aluminio, con el tiempo, contribuyen a la acidez del suelo.
Además, en periodos determinados, los suelos se vuelven ácidos, debido a que con el paso del tiempo las raíces van absorbiendo los cationes, lo que convierte al sistema más ácido, si los nutrientes no se vuelven a incorporar.
- c) **Respiración microbiana.** Se atribuye a los procesos metabólicos que generan CO₂ y ácidos solubles acidificantes, que contribuyen, por lo general, a la acidez en el suelo.
- d) **Lluvia ácida.** Por naturaleza, el agua de lluvia es ácida, dado el proceso de hidroxilación, el CO₂ y el cloro. Esta agua se puede acidificar aún más en áreas cercanas a volcanes: acidez por efecto del dióxido de azufre y ácido sulfhídrico.



- e) **Intensidad de lluvia.** En sitios donde las lluvias son más intensas existe una mayor posibilidad del lavado de las bases, por lo que el suelo se vuelve más ácido, aparte de favorecer la meteorización química sobre el material parental.
- f) **Temperatura.** Fuente natural que acelera los procesos de meteorización química.
- g) **Inundación del terreno.** Después de un proceso de inundación, las condiciones de anoxia general hacen que el pH se estabilice y esté dentro de los valores neutros; no obstante, en suelos alcalinos, con el paso de los días, el pH tiende a disminuir por la presión de CO₂ (Zapata, 2002).

Los procesos antropogénicos que afectan la acidez se basan netamente en el mal manejo de los suelos; entre esas prácticas podemos mencionar:

- Malas prácticas de fertilización nitrogenada (excesos y malas aplicaciones).
- Utilización de insumos agrícolas de fuentes ácidas.
- Deterioro de la calidad estructural del suelo.
- Exceso de mecanización del suelo.
- Procesos erosivos.
- Falta de materiales orgánicos en el suelo.
- Forman parte de los agentes causantes de este suceso: las lluvias ácidas por contaminación ambiental, producidas por el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno y el amoniaco. Estos gases provienen de procesos industriales o por consecuencia de las explotaciones ganaderas.

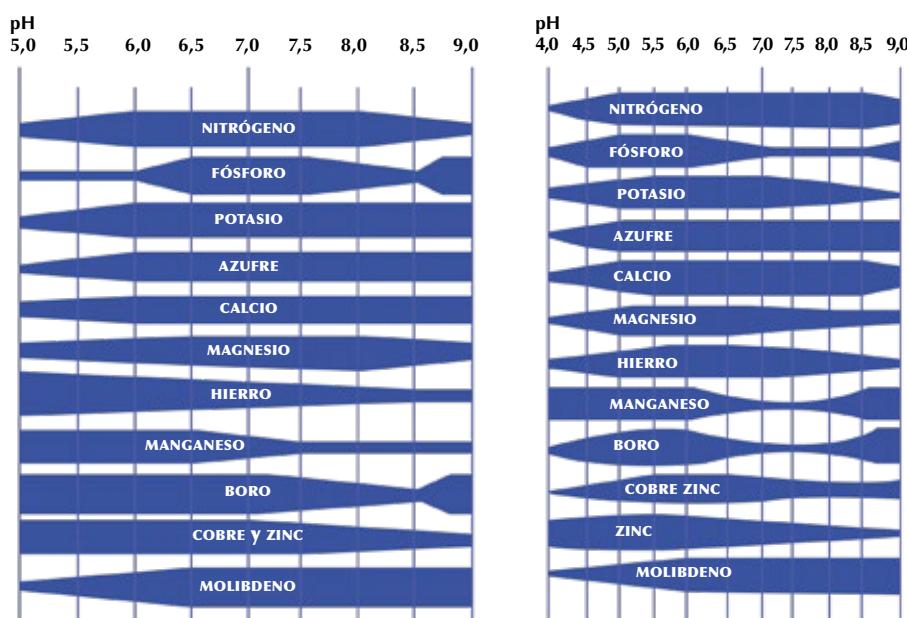
Los suelos alcalinos y con coloides, cargados negativamente como el humus, tienden a dispersarse y, por ende, el suelo pierde la estructura. Los coloides representados por óxidos de hierro y aluminio se dispersan cuando el pH es ácido.

El pH del suelo igualmente, es uno de los indicadores principales de la disponibilidad de nutrientes para las plantas pues influye en la solubilidad, la movilidad y la disponibilidad de nutrientes y de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos presentes en el suelo. Los suelos ácidos, con un pH menor de 5, pueden manifestar toxicidad por aluminio y manganeso.



FIGURA 44. DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES DEL SUELO SEGÚN VALORES DE pH. Según el nivel de pH, la disponibilidad de microelementos puede ser afectada y estos difieren de suelos minerales de orgánicos por el efecto buffer de la materia orgánica en el suelo. Por ejemplo, en suelos minerales bajo pH 5,0 hay más biodisponibilidad de hierro, manganeso, boro, cobre y zinc (línea negra más gruesa); caso contrario sucede con nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio, magnesio y molibdeno, los cuales están en menos disposición (líneas más delgadas). En el caso de los suelos orgánicos, bajo este mismo pH, se puede notar que existe disponibilidad de casi todos los elementos en estudio, con excepción del molibdeno que se presenta en menor forma.

FUENTE: «Fertilizing woody ornamentals», de L. J. Kuhns (1985). Reproducida con fines educativos.



La Figura 45 indica que cuanto más gruesa sea la banda, más disponible se encuentra el elemento en el suelo en los valores de pH correspondientes y cuanto más delgada sea la banda, menos cantidad hay. En síntesis, la figura muestra la disponibilidad relativa según los valores de pH para suelos minerales y para suelos orgánicos.

La *Penta lanceolata* y otras plantas ornamentales son muy sensibles a los cambios de acidez del suelo y presentan síntomas de fitotoxicidad por hierro a valores de pH menores de 6,2. El género de las *Hydrangea* incluye plantas ornamentales comúnmente llamadas hortensias, las cuales reaccionan a la acidez del suelo: en suelos ácidos tienden a acumular aluminio, lo que provoca la formación de complejos en la planta y coloraciones azules en sus flores; si el pH ronda un valor entre 6 y 6,5, entonces las flores se tornan rosadas y si el pH alcanza niveles alcalinos (8,0), las flores son blancas.

Hay vegetación nativa que se desarrolla adecuadamente en estas zonas, como en el caso de la flora costera descrita para Costa Rica, donde se dan condiciones edáficas extremas de alcalinidad



CONCEPTO

buffer o capacidad de amortiguación del suelo. Este efecto, conocido como *buffer*, en inglés, es la capacidad de amortiguación del suelo al estabilizar el pH. Desde la perspectiva química, está relacionado con la cantidad de ácido o base necesaria para estabilizar o neutralizar una unidad de pH. Este efecto es influido químicamente por contenidos de materia orgánica u óxidos de calcio, potasio, entre otros.



(pH mayor de 8,0) y una alta salinidad. Ejemplos de especies de esta flora son *Hipomane mancinella*, *Conocarpus erectus* y flora herbácea como *Canavalia marítima* (BRENES, OCAMPO, CHACÓN, PEÑA Y FALLAS, 2014).

En situaciones de pH de la solución menor de 5,5 y acidez alta (mayor que 1,0 cmol (+) /L), se debe alterar la acidez del suelo; en otras palabras, variar su pH, con el fin de que la disponibilidad de los elementos se encuentre en equilibrio en este. Para lograrlo, se utilizan fuentes de calcio como carbonato de calcio o dolomita e, incluso, materiales orgánicos tipo **compost** y **bokashi**, entre otros, que equilibran los hidronios y los iones aluminio del medio y, así, las bases catiónicas y los microelementos se vuelven más biodisponibles para las plantas.

En la relación suelo-planta, el valor de una acidez no ajustada limita varios aspectos; algunos de estos se mencionan a continuación:

- Reduce el crecimiento de las plantas.
- Disminuye la disponibilidad de algunos nutrientes, como calcio, magnesio, potasio y fósforo.
- Favorece la disolución de elementos tóxicos para las plantas, como aluminio y manganeso.
- Impide la actividad de los organismos del suelo (en suelos muy ácidos). El valor de pH ideal de los cultivos agrícolas es 6,5. Los organismos aeróbicos, como *Clostridium*, y *Azotobacter*, se inhiben por la acidez. El *Rhizobium* se deteriora en valores de pH menores a 5 (GARCÍA, 2008); asimismo, los actinomicetos son perjudicados, lo que afecta, indirectamente, la mineralización de materiales ricos en lignina (NÚÑEZ SOLÍS, 1981).

Las fuentes de acidez externas que conviene valorar son las siguientes:

- **Fertilizantes nitrogenados de base amoniacal (NH_4^+)**. Incrementan la acidez, ya que en el proceso de nitrificación que realizan las bacterias *nitrosomonas*, el amonio se convierte a nitrato y se pierden 4 H^+ que van a la solución del suelo y lo acidifican.
- **Fertilizantes de base ureica**. Acidifican la solución del suelo, según José Espinosa y Eloy Molina (1999, p. 3-4), y explican el proceso de la siguiente manera:



CONCEPTOS

bokashi. Abono orgánico fermentado e inoculado con microorganismos benéficos. Para la elaboración del bokashi se pueden usar diferentes materiales orgánicos. Como materia prima se recomienda recurrir a desechos de vegetales, carbón y semolinillas, entre otros. Dichos materiales se inoculan con caldos de microorganismos que ayudan en el proceso de fermentación. Estos pueden ser preparados en la finca o comprados en un almacén de servicios agropecuarios; sin embargo, se recomienda, de preferencia, elaborarlos en la finca.

compost. Abono preparado en capas de materiales vegetales y excretas de animales. El proceso consiste en la transformación de dichos componentes por la acción de distintos microorganismos bajo diferentes condiciones y temperaturas. Este tipo de abono también es conocido por los agricultores costarricenses como «composta». El proceso de elaboración del compost se denomina «compostar» y, generalmente para ello, se utiliza materia vegetal como pastos, caña de azúcar o combinado; además, con materiales ricos en nitrógeno como las excretas o las hojas de especies leguminosas.



[una vez aplicada al suelo] la urea es atacada por la enzima ureaza facilitando [sic] la hidrólisis del material. La primera reacción forma carbamato de amonio [...] que eleva el pH en la inmediata vecindad del granulo de la urea a valores mayores de 8,0. En este ambiente alcalino, el carbamato de amonio se descompone rápidamente en amoniaco (NH_3), y CO_2 (dióxido de carbono). [...] El NH_3 formado [...] es un gas que se volatiliza fácilmente de la superficie del suelo [...]. Por esta razón, es aconsejable incorporar la urea en el suelo para evitar la volatización.

- **Lluvias.** Estas ocasionan el arrastre de las bases y, con el tiempo, dicho proceso afecta la acidez del suelo, por el reemplazo de las bases por ácidos. Asimismo, el agua de lluvia puede acarrear materiales de manera horizontal en el suelo al desplazar materiales a otros horizontes y, además, cambiar la dinámica de las bases.
- **Materia orgánica del suelo.** Contiene grupos activos que se comportan como ácidos débiles y liberan iones hidrógeno. Esta descomposición de residuos orgánicos genera dióxido de carbono (CO_2), un compuesto que combinado con agua produce ácido carbónico, una solución que es fuente de acidificación del suelo.
- **Laboreo intensivo de los suelos.** Al no existir estructura del suelo, es más fácil que los procesos de erosión sean más intensos. Además, se agudiza el problema de la acidez porque deja el suelo expuesto, sin cobertura, lo que facilita la lixiviación de las bases.
- **Deterioro de la estructura del suelo.** Cuando hubo pérdida de la forma de agregación de los peds, quiere decir que no hay material orgánico que pueda contrarrestar la acidificación del suelo.
- **Suelos desnudos sin cobertura vegetal.** Los suelos, al no tener cobertura vegetal, tienden a erosionarse más fácilmente y, por ende, perder los cationes del suelo, por el movimiento de la capa arable y la materia orgánica.
- **Extracción de material vegetal.** Como cosecha o chapas constantes que no genera un reciclaje de nutrientes y, por tanto, se descalcen las cargas del suelo y esta tienda a acidificarse.

c. INTERCAMBIOS IÓNICOS EN EL SUELO

Los intercambios iónicos en el suelo son parte de los arreglos químicos que suceden en el suelo; todo depende de las condiciones edáficas que el suelo presente. Son afectados, básicamente, por el





material parental, las enmiendas agrícolas, el manejo de suelos y la acidez. Temas como: intercambios catiónicos en el suelo, capacidades de intercambio catiónico efectiva (CICe) y de intercambio de aniones (CIA), además de la absorbitividad, serán discutidos a continuación:

1. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC)

La mayoría de las propiedades químicas provienen de la interacción de los minerales arcillosos que los integran con los elementos disueltos en la solución del suelo; empero, la materia orgánica, que incluye los organometales, otorga propiedades particulares entre dichos minerales, como adsorción, absorción, fijación de cationes e intercambio de cationes o de aniones en las tierras.

Los conceptos de absorción y adsorción se revisaron anteriormente en este capítulo y para interés del tema de fertilidad del suelo, se van a revisar los temas de intercambio de cationes y aniones.

Con base en la afirmación anterior, se indica que las arcillas son los minerales prioritarios en los estudios de química de suelos. Como se mencionó en el capítulo primero, las estructuras cristalinas de las arcillas, ya sean tetraedros u octaedros, confieren espacios bastante amplios para que los elementos de forma y de radio iónico similar y de menor valencia desplacen elementos de las estructuras originales, con lo que se desbalancean las cargas y se crean láminas de arcilla con cargas netas negativas.

Núñez (1981) ilustra con un ejemplo que el proceso en el que un ion magnesio (Mg^{2+}) es sustituido por un ion (Al^{3+}) en las capas de los octaedros de las arcillas se llama **sustitución isomórfica**, importante en los suelos y que permite entender la trascendencia del material parental de origen de los suelos y el estado de evolución del suelo. Sin embargo, cuando tal sustitución genera cargas negativas en las láminas de las arcillas, hace que la arcilla se cargue negativamente y pueda adsorber más cationes. ERI efecto se conoce como **carga permanente**.

Ahora, cuando en los grupos hidroxilo ($-OH$) de los compuestos que se encuentran en la superficie de las arcillas, el hidrógeno se disocia del oxígeno; el resultado es una estructura cristalina con carga negativa que también adsorbe cationes. En este caso, el efecto



CONCEPTOS

arcillas 2:1. Minerales formados por capas tetraédricas cuya estructura laminar les permite expandirse y contraerse, como la caolinita o la haloisita.

arcillas 1:1. Minerales formados por capas tetraédricas y octaédricas de silicio y oxígeno, como la vermiculita y la montmorillonita.

NOTA. El área superficial que tienen los minerales es mayor que el área en el interior, debido a que en el primer caso no solo hay espacio en la superficie, sino también entre las láminas de arcillas.



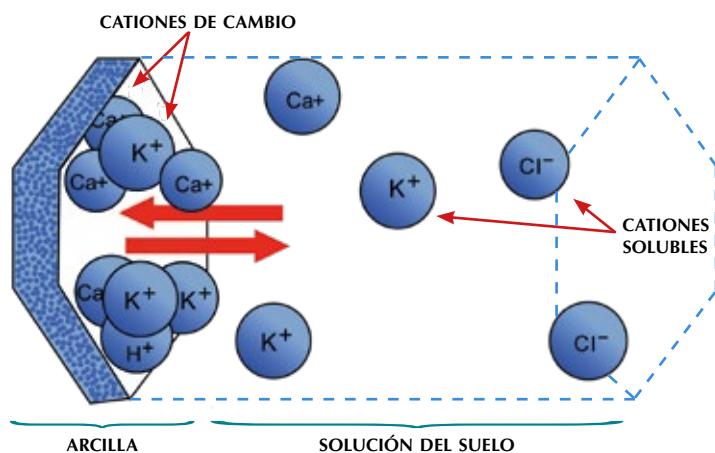
to se llama **carga temporal** porque depende de la separación de los hidrógenos de los -OH y está ligada al pH de la solución del suelo.

El equilibrio dinámico iónico en que se encuentran los nutrientes del suelo, en el cual hay liberación y adsorción de iones, es conocido como capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo (FIG. 45).

La CIC se expresa en cmol (+)/kg, o lo que es lo mismo en meq/100 g, lo que significa que el miliequivalente o cmol de los cationes del suelo pueden desplazar un miliequivalente o un cmol de hidrógeno.

FIGURA 45. INTERCAMBIO CATIÓNICO DEL SUELO. Los cationes de cambio en el suelo, que se muestran en la ilustración, son los que se encuentran adheridos a las arcillas y estas pueden hallarse también en la solución del suelo. Los elementos como el calcio, el potasio y el cloro se pueden solubilizar fácilmente en el suelo.

FUENTE: «Introducción a la Edafología», de Carlos Dorronsoro. Edafología.net (2016). Reproducida con ligeras modificaciones para fines educativos.



El CIC en el suelo depende de factores como los que se mencionan a continuación:

- Tamaño de las partículas.** Cuanto más pequeña sea la partícula, más grande es su CIC.
- Naturaleza de las partículas, su composición y su estructura.** Existen grandes diferencias de CIC en el suelo con base en la estructura de las arcillas: las que presentan estructuras tipo 2:1 tienen mayor superficie específica que las de tipo 1:1, lo que se traduce en alta capacidad de las primeras de absorber cationes como el K^+ y, por ende, mayor CIC y fertilidad (CDR. 15).
- Presencia de materiales orgánicos.** No solo las arcillas tienen CIC, sino también los compuestos orgánicos. La materia orgánica en estado coloidal aumenta la CIC y, por lo tanto, la retención de cationes en el suelo. Se ha documentado que el aumento de la materia orgánica en 1 % incrementa en 2 cmol. kg⁻¹ la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (CAIRO Y HERRERA, 1994, CITADO POR GARCÍA, RAMÍREZ Y SÁNCHEZ, 2012).
- pH del suelo.** Los pH ácidos aumentan la concentración de hidrógenos y de microelementos del suelo; en consecuencia,



en la medida que aumenta la acidez, disminuye la CIC, a causa del efecto de bloqueo de grupos activos por parte del H⁺ en la solución del suelo, tanto por efecto de masa como por la obstrucción de cargas permanentes de elementos como aluminio, hierro y manganeso.

Los cationes que, con frecuencia, ocupan posiciones de cambio en los suelos son: calcio, magnesio, potasio, sodio, hidrógeno, aluminio, hierro, amonio, manganeso, cobre y cinc.

Cuando hay acidez en el suelo, predominan los hidronios y los iones de aluminio; en los suelos alcalinos, impera el sodio; en el caso de los neutros, el calcio.

Los iones monovalentes, como Na⁺ y K⁺, son menos retenidos en la solución del suelo en comparación con los polivalentes, Ca²⁺, Mg²⁺ y Al³⁺. Por esa razón, el potasio es más limitado en ese medio. Los excesos de sodio son fácilmente controlables con lavados (PEÑA CORDERO, 2017).

- e) **Tamaño del radio iónico.** Los elementos de mayor radio iónico tienen la posibilidad de hidratarse más, lo que provoca que sean más retenidos en la arcilla. Por el contrario, los iones con menor radio iónico, como los monovalentes, se absorben con menos fuerza.
- f) **Concentración de los iones en los suelos.** Jorge Núñez Solís (1981) señala que cuando aumente la concentración de los iones en la solución del suelo y se alcance el respectivo equilibrio químico, existirá mayor retención de este elemento (p. 90).

2. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO EFECTIVA (CIC_E)

Una variable para estimar los valores de carga (cantidad de elementos de cambio en la solución suelo) de las arcillas es la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CIC_E), la cual se calcula mediante la suma del aluminio intercambiable y las bases de cambio en la solución del suelo (Ca, Mg y K).

CUADRO 15

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC) SEGÚN LA NATURALEZA DEL MATERIAL

NATURALEZA DEL MATERIAL	CIC (MEQ/100 G)
Cuarzo y feldespatos	1-2
Óxidos e hidróxidos	4
Caolinita	3-15
Ilita y clorita	10-40
Montmorillonita	80-150
Arcillas alófanas en general	80
Vermiculita	100-160
Materia orgánica	300-500

FUENTE: *Edafología del trópico*, de Wagner Peña Cordero (2015, p. 125).

CONCEPTO

radio iónico. Distancia desde el centro del núcleo del átomo hasta su electrón estable más alejado. El concepto es similar al de radio atómico, pero cuando el átomo ha perdido o ganado electrones.



El sodio no se considera en la ClCe, ya que normalmente sus valores en las áreas tropicales son muy bajos, con excepción de las zonas costeras, en las que es significativo incluirlo, por la influencia salina del mar.

La fórmula para calcular la ClCe es la siguiente:

$$\text{ClCe} = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Al}$$

A partir de dicho resultado, también se puede estipular el porcentaje de saturación de bases (V) y el porcentaje de saturación de acidez (SA) en el suelo. Asimismo, ambos son indicadores de la fertilidad del suelo.

$$\text{Saturación de bases (V)} = \left(\frac{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}}{\text{ClCe}} \right) \cdot 100$$

$$\text{Saturación de acidez (SA)} = \left(\frac{\text{Al}}{\text{ClCe}} \right) \cdot 100$$

3. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO DE ANIONES (CIA)

La CIA es la capacidad de intercambio (arcilla-solución) de iones cargados negativamente, como consecuencia del desarrollo de cargas positivas en las arcillas y en la materia orgánica del suelo.

El humus del suelo presenta cargas positivas en su superficie, lo que genera la capacidad de adsorber aniones del suelo. Los complejos húmicos se componen de aniones orgánicos (como los citratos, los boratos y los molibdatos), a los cuales se asocian los grupos $-\text{H}$ y los $-\text{NH}_2$ de la materia orgánica con los H^+ de la solución del suelo y originan cargas positivas. Asimismo, las arcillas 1:1 pueden incrementar el CIA, a medida que se incrementa la acidez. El CIA depende directamente de la acidez porque cuando hay una alta saturación de cargas positivas en las arcillas por la asociación de los H^+ a los grupos Al-OH y Fe-OH, se produce la carga neta positiva.

La CIA depende también del tipo de las arcillas, del cual está formado el suelo: las arcillas amorfas, por lo general, tienen una alta CIA, puesto que poseen en la superficie espacios cargados positivamente. Sin embargo, en este caso, los compuestos fosfatados resultantes tienden a precipitar, lo que se traduce en menor disponibilidad de fósforo en el suelo. Esa situación es causada por las



ESTUDIO DE CASO

ESTUDIO DE CASO 5

PLANTEAMIENTO Y EJERCICIO

A usted, como técnico agrícola, se le solicita calcular la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe), la saturación de bases (V) y la saturación de acidez (SA), de acuerdo con los siguientes resultados, obtenidos de una muestra de laboratorio, proveniente de un suelo de la zona de San Ramón de Alajuela de Costa Rica:

pH	4,8
Acidez*	2,6 cmol/L
Calcio (Ca)	5,1 cmol/L
Magnesio (Mg)	3,2 cmol/L
Potasio (K)	0,62 cmol/L

* Los datos de acidez reflejan el contenido de Al³⁺ del suelo.

DESARROLLO

Para poder calcular la CICe, se debe aplicar la siguiente fórmula:

$$\text{CICe} = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Al}$$

Por lo tanto, si sustituimos los valores, la fórmula quedaría de la siguiente manera:

$$\text{CICe} = 2,6 + 5,1 + 3,2 + 0,62$$

$$\text{CICe} = 11,52 \text{ cmol/L}$$

Para saber la saturación de bases, se calcula mediante la correspondiente ecuación:

$$\text{Saturación de bases (V)} = \left(\frac{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}}{\text{CICe}} \right) \cdot 100$$

Entonces, si sustituimos los valores, la fórmula quedaría así:

$$\text{Saturación de bases (V)} = \left(\frac{8,92}{11,52} \right) \cdot 100$$

$$\text{Saturación de bases (V)} = 77,43\%$$

Para averiguar la saturación de acidez, se calcula mediante la correspondiente ecuación:

$$\text{Saturación de acidez (SA)} = \left(\frac{\text{Al}}{\text{CICe}} \right) \cdot 100$$

Por ende, si sustituimos los valores la fórmula quedaría del siguiente modo:

$$\text{Saturación de acidez (SA)} = \left(\frac{2,6}{11,52} \right) \cdot 100$$

$$\text{Saturación de acidez (SA)} = 22,57\%$$

RESPUESTA

El resultado indica que hay 77,43% de saturación de bases y 22,57% de saturación de acidez.

Los valores de saturación de acidez deben estar por debajo de 10%; de lo contrario, es considerado un suelo ácido, que para la mayoría de los cultivos presentaría problemáticas.

Los valores medio de CICe rondan de 5 a 25 cmol/L; por consiguiente, la CICe se encuentra entre los valores normales, pero condicionada por la acidez.

reacciones aniónicas no específicas que ocurren por efecto de la repulsión simultánea entre los materiales cargados negativamente.

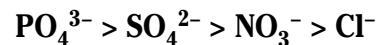
Las arcillas amorfas también, así como las arcillas caolinitas y los óxidos de hierro y aluminio, incrementan su intercambio aniónico cuando el pH se incrementa.



Los sulfatos y los fosfatos son aniones y tienen amplio valor en la nutrición de las plantas. La adsorción de los fosfatos está condicionada por la formación de uniones fuertes con sales de aluminio o de hierro. El fenómeno ocurre, en especial, en las arcillas amorfas.

En los suelos volcánicos, los muy oxidados o los que tienen mucho material orgánico, los aniones tienden a precipitar fácilmente, lo que se traduce en alta fijación de fósforo al suelo.

Los aniones intercambiables más importantes son PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- . El grado de adsorción se representa así:

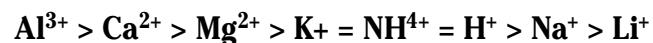


Los valores de CIA normales en los suelos rondan entre 0,2 y 2 cmol/kg, excepto en los alófanos: sus valores oscilan entre 10 y 15 cmol/kg del suelo.

4. ABSORTIVIDAD

En términos generales, un equilibrio apropiado depende de la concentración de los elementos de la solución, de la actividad relativa de cada ion, así como de su valencia, del valor de su radio iónico y del grado de hidratación; igualmente, del grado de afinidad para intercambiar, que obedecerá a la naturaleza del material (PORTA, LÓPEZ-ACEVEDO Y ROQUERO, 1994).

Con base en los factores citados, se encuentra una relación llamada absorbitividad, la cual consiste en la capacidad de los elementos disueltos en la solución del suelo en ser adsorbidos por la arcilla. El orden de absorbitividad de los cationes es el siguiente:



Como se observa, los iones Li^+ y Na^+ tienen menos fuerza de retención y más rápidamente son desplazados en la solución del suelo, mientras que los iones Al^{3+} y Ca^{2+} son desplazados más lentamente por ser los retenidos con más fuerza.

Este término es importante en relación con que los elementos se pierden más fácilmente en el suelo. Y según la necesidad nutricional de una planta pueden ser limitantes, como es el caso del nitrógeno.



D. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Esta propiedad química de los suelos se relaciona con la cantidad o la concentración de sales disueltas, como cloruros, sulfatos y nitratos. Se define como la capacidad de la solución del suelo de transmitir o conducir electricidad, la cual se expresa en dS/m (decisiones por metro). Y es un parámetro muy utilizado en evaluación de calidad de suelos y para aguas.

Según las cantidades de las sales disueltas, el pH y la cantidad de sodio intercambiable de los suelos, estos se clasifican en los siguientes tipos:

- **Suelos salinos.** Su conductividad eléctrica es mayor de 4 mmhos/cm, o sea 4 de dS/m., a una temperatura de 25 °C o superior. La cantidad de sodio intercambiable es menor de 15 %. Este suelo se caracteriza por tener un valor de pH menor de 8,5.
- **Suelos sódicos.** Su conductividad eléctrica se encuentra por debajo de 4 dS/m a una temperatura de 25 °C. El porcentaje de sodio intercambiable es mayor de 15 % y el pH fluctúa entre 8,5 y 10,0. Son suelos de color negro, en razón de su alto contenido de sodio. La materia orgánica se dispersa en la superficie y origina colores oscuros. Poseen estructuras degradadas.
- **Suelos salino-sódicos.** Poseen una conductividad eléctrica de 4 dS/m, una concentración de sodio intercambiable de 15 % y el pH es variable, comúnmente superior a 8,5. Contienen elevadas concentraciones de sales solubles, como cloruros, nitratos, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos.

Con el fin de determinar que un suelo es sódico, se realizan varios análisis como el radio de absorción atómico (RAS) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI). El RAS es utilizado para comparar las cantidades de sodio con relación a las de calcio y de magnesio en la solución del suelo. El PSI refleja el porcentaje de la capacidad de intercambio ocupado por el sodio. Los suelos con un PSI y un RAS superiores a 15 y a 13, respectivamente, son considerados suelos sódicos.

En suelos agrícolas, las concentraciones excesivas de sales representan un problema que requiere prácticas y manejo especiales, ya que ocasionan efectos dañinos a la planta, sobre todo con la disponibilidad de agua. Con el agua, el sodio es hidratado y baja el potencial osmótico, por lo que la planta no tendrá la fuerza necesaria para absorber el agua.



ATENCIÓN

La conductividad eléctrica del suelo se mide en siemens/metro (S/m), pero se maneja en milisiemens/metro (mS/m). A veces, se expresa en mho/cm pues 1 siemens = 1 S = 1 (ohm)⁻¹ = 1 mho.

Algunos factores de conversión útiles en este tema son: 1 dS/m = 1 mS/cm = 1 mmho/cm.



CUADRO 16

CATEGORÍA DEL SUELO
SEGÚN VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

CATEGORÍA DEL SUELO	VALOR DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (dS/m)
No salino	0-2,0
Poco salino	2,1-4,0
Moderadamente salino	4,1-8,0
Muy salino	8,1-16,0
Extremadamente salino	> 16,0

FUENTE: *Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua*, de Antonio Vázquez-Alarcón y Norberto Bautista-Aroche (1993, p. 27).

Los ecosistemas de manglar presentan altas acumulaciones de sales y por ende valores altos de conductividad eléctrica, y este representa el medio edáfico ideal para el crecimiento de especies propias de estas zonas (halófilas).

A ambos tipos de suelo, los agrícolas y los salinos, el manejo que se les da consiste en lavados del suelo con agua libre de sales minerales, por lo que siempre se evalúa la calidad de agua usada en zonas de riego.

Existe otra clasificación de suelos con base en su conductividad eléctrica; los valores se corresponden con el grado de salinidad del suelo (*CDR. 16*).

La conductividad eléctrica se puede complementar con la determinación de Na^+ o de otras bases intercambiables (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) para clasificar con más exactitud el suelo.

En un laboratorio, normalmente, se extrae la solución del suelo para ser determinada mediante un puente o conductímetro.

En suelos costeros de Costa Rica, se encontraron valores de conductividad eléctrica entre 60-100 mS/cm mediante la técnica del conductímetro (BRENES, 2013, p. 65). Por otro lado, los investigadores Paulina Montes de Oca, Rafael Mata y Marco Chavez (1996, p. 78), en la zona de Guanacaste del país, encontraron valores de 16 dS/m en pasta saturada, lo cual indicó problemas de salinidad.

La salinidad de los suelos se puede originar de forma natural, propiciada por condiciones climáticas de precipitaciones menores a la evaporación del suelo, en conjunto con problemáticas de drenaje (NÚÑEZ SOLÍS, 1981). Sin embargo, en suelos donde los manejos de las fertilizaciones son intensos y la calidad del agua de riego no es adecuada (la óptima tiene pH neutro; es libre de patógenos y de metales pesados), la conductividad eléctrica (por presencia de sales) se puede elevar hasta 7 mS/cm (CABALCETA Y CORDERO, 1991, p. 171).

E. EVALUACIÓN DE FERTILIDAD DE SUELOS

La fertilidad química del suelo puede ser evaluada con distintos parámetros, desarrollados desde el punto de vista agronómico.



mico; no obstante, funcionan para conocer problemas del suelo a causa de la degradación.

Dicha herramienta es de gran utilidad para diagnosticar problemas de desarrollo de las plantas por deficiencia o toxicidad de elementos, necesidades nutricionales de las especies, así como para monitorear cambios en el tiempo en relación con la fertilidad del suelo.

Con este tipo de análisis se pueden determinar los grados idoneidad o carencia de los elementos químicos del suelo. El estudio de los resultados se realiza con información ya disponible en tablas de interpretación de análisis de suelos, la cual es procedente de diversas investigaciones en el campo.

Se han identificado rangos óptimos o ideales para la mayoría de los suelos en el trópico húmedo: un valor por encima indicaría que hay un excedente del valor óptimo; incluso podría llegar a existir fitotoxicidad. Y por debajo de tales valores, significa que debe analizarse para determinar la aplicación de insumos fertilizantes (*CDR. 17, P. SIG.*).

Cada planta tiene necesidades distintas para su pleno desarrollo vegetativo, lo que indica que los valores presentes en el Cuadro 17 son bajos, medios (óptimos) y altos. Deben usarse con cautela, según el análisis que se quiera realizar. Por lo tanto, no debe ser esta la única herramienta para evaluar fertilidad; cada caso es único y cada planta se comporta de manera diferente, según su autoecología; por lo tanto, el cuadro de variables debe ser tomado como una guía para interpretar suelos agrícolas y no cultivos en específico.

Las limitantes nutricionales que se presentan con más frecuencia en los suelos se asocian con los siguientes factores:

- Tipo de sistema coloidal dominante y el conocimiento y comprensión que se tenga de este.
- Tipo de elemento del que se trate.
- Tipo de sistema de cultivo ecosistema en que se desarrolle.
- Manejo que se le ha efectuado al suelo o la intensidad de degradación.
- Contenido de materia orgánica y su relación con los microorganismos.

EN LA RED...

INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS

Observe el video «Análisis de Suelos: Interpretación del Abálisis», producido por Audiovisuales UNED, para la Cátedra de Gestión Sostenible de Suelos (GeSS) de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales (ECEN), que detalla el proceso para realizar una interpretación de análisis de suelos, basado en un resultado de laboratorio.

Accédalo en la siguiente dirección <https://www.youtube.com/watch?v=clbfsoX9E6E&list=PLelX_dGDBCcryE3Vt2Cbh23XaNUXRH-q&index=9&t=0s> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.





CUADRO 17
VARIABLES QUÍMICAS EN SUELOS AGRÍCOLAS DE COSTA RICA

VARIABLE	UNIDADES	NIVELES		
		BAJOS	MEDIOS (ÓPTIMOS)	ALTOS
pH	—	<5	5,5-6,5	>6,6
Acidez (Aluminio)	cmol (+)/L		<1,0	>1
Basicidad (pH básico)	cmol (+)/L		7-14	
Ca	cmol (+)/L	<4	4-15	>15
Mg	cmol (+)/L	<1	1-6	>6
K	cmol (+)/L	<0.2	0,2-0,8	>0,8
RELACIONES CATIÓNICAS				
ClCe	cmol (+)/L		5-25	
Suma de cationes	cmol (+)/L		5-12	
Ca/Mg	—		2-5**	
Ca/K	—		5-25**	
Mg/K	—		2.5-15**	
(Ca+Mg)/K**	—		10-40**	
Saturación de acidez	%		10-50	
N	%		0,6-1,0	
M. O.	%		5-10	
P	mg/L	<12	12-50	>50
Fe	mg/L	<5	5-50	>50
Mn	mg/L	<5	5-50	>50
Cu	mg/L	<0.5	0,5-20	>20
Zn	mg/L	<2	2-10	>10
B	mg/L	<0.2	0,2-1	>1
S	mg/L	<12	12-50	>50

- pH en agua 1:2,5 (una parte de soluto y 2,5 de solución)
- Ca y Mg y acidez o Al extraíble con KCl 1 M, valor medio de Al ínter. 0,3 cmol (+)/L
- P, K, Fe, Cu, Zn y Mn extraíbles con Olsen modificado
- B y S extraíbles con fosfato de calcio
- M. O.: materia orgánica mediante digestión húmeda ($K_2Cr_2O_7/K_2SO_4$); valor en ultísoles
- N: nitrógeno total mediante el método Kjeldahl o plasma
- cmol (+)/L es equivalente a meq/100 ml

** Balance

FUENTE: *Manual para la interpretación de la fertilidad del suelo de Costa Rica*, de Flórida Bertsch Hernández (1986); *Guía para la intervención de análisis del suelos*, del Ministerio de Agricultura y Ganadería MAG y descrita por Donad Kass (1998); *Guía práctica para el estudio introductorio de suelos con un enfoque agrícola*, de Carlos Henríquez y Gilberto Cabalceta (1999) y *Tabla de interpretación de análisis de suelos*, de Eloy Molina y Gloria Meléndez (2002).

Una vez identificados los elementos, deben analizarse las relaciones de los cationes entre sí, porque estas indican el balance nutricional del suelo. El estudio es vital para estipular si los elementos pueden ser absorbidos por las plantas.

Las relaciones se concretan al dividir un elemento o una suma de estos entre el que se encuentra en estudio, por ejemplo: calcio y magnesio se dividen entre sí para que el resultado se ubique en el rango ideal de 2-5. Si no lo está, se debe analizar cuál de ellos es el factor limitante, el calcio o el magnesio, y así realizar una recomendación más clara sobre fertilización. Las relaciones catiónicas que se evalúan son: Ca/K, Mg/K y (Ca+Mg)/K.



La caracterización química de los suelos de ecosistemas naturales o no intervenidos debe ir asociada a la vegetación circundante, porque, con base en ello, se puede determinar la degradación de un ecosistema en general.

En la costa venezolana, se describieron los suelos de la zona de manglar con el fin de conocer la estructura de los manglares y su relación con factores climáticos, geomorfológicos y ecológicos. En el estudio, se caracterizaron las texturas, los contenidos de sales y el pH para determinar su nexo con la vegetación allí encontrada (LÓPEZ, BARRETO Y CONDE, 2011).

Otro caso relacionado con propiedades químicas del suelo es el estudio de la línea de costa de un bosque tropical seco en Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica; en este, se ejecuta una relación de los suelos costeros con la vegetación ahí presente, así como con su gradiente de variación suelo-planta (BRENES ROJAS, 2013).

Wagner Peña Cordero, María del Carmen Leirós de la Peña y Jorge A. Briceño (2005), en una investigación de los suelos de serpentinitas en España, hacen hincapié en la importancia de las correlaciones de los parámetros químicos del suelo con la vegetación característica.

La misma situación ocurre con los estudios de Juan José Cantero *et al.* (2011) sobre los afloramientos de mármoles y serpentinitas de las Sierras de Córdoba en Argentina: asocian la composición florística con los gradientes geográfico, climático y edáfico. La caracterización química del suelo se vincula con el endemismo de la flora en la zona en particular.

En síntesis, el manejo del recurso suelo basado en valores químicos constituye una forma indirecta de medir su capacidad de producción y ha sido la manera clásica de caracterizar su fertilidad. Sin embargo, no es la única: la verdadera integración de la funcionalidad del recurso debe contemplar la biota del suelo y que los procesos biogeoquímicos que suceden en el suelo se ejecuten con normalidad. Por estas razones, el análisis sobre la calidad del suelo deberá contemplar parámetros fisicoquímicos, biológicos y de servicios ambientales.



ATENCIÓN

Es importante recordar que de realizarse estudios sobre la relación suelo-planta de una especie en específico, se deben realizar análisis foliares como complemento del análisis de suelo. Esta es una técnica que se usa para hacer evaluaciones nutricionales en plantas. Para un análisis foliar, es necesario colectar de muestras de las hojas (100 hojas como mínimo) de la planta para realizar un análisis químico en el laboratorio. Se aconseja tomar las hojas intermedias de la planta y evitar aquellas viejas o muy nuevas.



ESTUDIO DE CASO

ESTUDIO DE CASO 6

En la zona fronteriza entre Costa Rica y Nicaragua, se realizó un muestreo de suelos en la costa pacífica, y se espera que usted, como técnico agrícola, comente los resultados, refiriéndose a lo siguiente:

1. Las propiedades que pueden inferirse con respecto a la textura de este suelo.
2. Los niveles en los que se encuentran los elementos presentados, según el Cuadro 17.
3. La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe), el porcentaje de saturación de bases (V) y el porcentaje de saturación de acidez (SA).
4. Los elementos que están en mayor disposición según el pH (v. Fig. 45)

Según los siguientes resultados del muestreo.

Identificación	pH _{H₂O}	ACIDEZ	Ca	Mg	K	DENSIDAD	TEXTURA
		cmol (+) /L				g/cm ³	
Pacífico Sur (finca)	8,61	0,10	16,38	3,80	0,62	1,3	Arenosa

DESARROLLO

1. El suelo arenoso tiene una porosidad baja, con una movilidad del agua en el suelo muy rápida y una permeabilidad alta.
2. El pH es alcalino y la acidez es mínima. Los niveles en los que se encuentran los elementos presentados, según el Cuadro 17, indican que el valor de la concentración del ion calcio es muy alta y la del ion magnesio baja; la diferencia entre estos, por lo tanto, es alta. La concentración del ion potasio se encuentra aún más baja. Entonces, el resultado de la relación entre iones es el siguiente:
 - Ca/Mg: 4,31, es normal
 - Ca/K: 26,4 es alto por lo que se debe valorar disminuir el Ca
 - Mg/K: 6,12, es normal
 - (Ca+Mg) /K = 32,54, es normal
5. CICe = 20,9 cmol (+) /L; saturación de bases (V) = 88,52%; saturación de acidez (SA) = 0,48%
6. Según la Figura 46, el nitrógeno, el hierro, el manganeso, el cinc y el cobre son afectados; sin embargo, los elementos como calcio, potasio y magnesio no se detecta que sufran alguna afectación por debajo de estos niveles.

v. Propiedades biológicas del suelo

Las necesidades mundiales de alimentación y las exigencias sobre el suelo han expuesto a dicho recurso a una degradación intensa y extrema. Una de las primeras pérdidas que suceden en el suelo es la capa orgánica. La materia orgánica en el medio cumple múltiples funciones ecosistémicas, entre ellas, el desarrollo de una adecuada actividad biológica.

El suelo sin los organismos ni el material por degradar se torna inerte y los procesos ecosistémicos que allí suceden dejan de transcurrir. Cualquier tipo de organismo, sin importar la forma, el tamaño ni el reino al que pertenece -el animal o el vegetal- es valioso para la salud y la calidad del suelo, así como para el desarrollo de las plantas que crecen en él.

Cuando hay desbalances en la materia orgánica del suelo y de los microorganismos que en él habitan, ocurren problemas en el



entorno. Este es el caso de algunas especies de microorganismos que pueden convertirse en plagas o en fitopatógenos, a causa de que se genera un corte en la **red trófica** del sistema. La escasez de materia orgánica en el suelo degrada las propiedades físicas imprescindibles en este, tales como la estructura, la aireación y el movimiento del agua.

En los suelos agrícolas y agroforestales, el análisis de materia orgánica y microorganismos ha tomado fuerza, ya que, gracias a este, es posible, realmente, entender el papel de la materia orgánica y de los diferentes microorganismos en el sistema.

A. MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

La materia orgánica del suelo (en adelante MOS) es la fracción de este que incluye el total de residuos provenientes de plantas y animales en diferentes etapas de descomposición. Otra definición plantea que la MOS consiste en toda la materia viva, al igual que la proveniente de los organismos muertos y descompuestos en el suelo.

La materia orgánica es un componente dinámico que influye de forma dominante en muchos procesos y propiedades del suelo, los cuales convergen en una cadena compleja de múltiples beneficios. La MOS es decisiva en el balance global del carbono, considerado como uno de los cambios categóricos que se deben ejecutar sobre la compensación de gases de efecto invernadero: la solución radica en incorporar carbono al suelo.

Las partes de las plantas –hojas, ramas, tallos, flores, frutos y raíces– se descomponen y se transforman en compuestos secundarios, por ejemplo, humus. Este proceso es mediado por muchos factores, algunos de los cuales son los siguientes: la incorporación de nuevos restos orgánicos al suelo y la velocidad de oxidación química y biológica de estos, la velocidad de descomposición de la materia orgánica existente ya en el suelo, la textura del suelo, la aireación, y los factores climáticos como la humedad ambiental, la precipitación, la radiación solar y la temperatura (JOHNSTON, 1991).

La **velocidad de descomposición** de los compuestos depende de su constitución; así, los más rápidos en hacerlo son los azúcares, los almidones y las proteínas simples; los siguen las proteínas

CONCEPTO

red trófica. Conjunto de cadenas alimentarias interconectadas que pueden establecerse en un ecosistema; en el caso de los hongos y las bacterias, satisfacen la función de descomponedores: devuelven al medio la materia orgánica.

ATENCIÓN

Una acción ante los efectos del cambio climático es aumentar el contenido de carbono en el suelo, mediante la incorporación de material orgánico como abonos verdes, compostas, entre otras. Se dice que la solución ante el cambio climático está debajo de nuestros pies.



complejas, la hemicelulosa, la celulosa, las grasas, y las ceras; y, por último, se encuentran las ligninas y los compuestos fenólicos.

Según la investigación de Albán Arias, Paola Brenes, Laura Sánchez y Wagner Peña Cordero (2018, p. 5) de la Universidad Estatal a Distancia (UNED), el efecto de la mineralización del rastrojo de *Mucuna pruriens* y *Crotalaria juncea* la leguminosa *Mucuna* se mineralizan más rápidamente que los rastrojos de los tratamientos de la especie *Crotalaria*, debido a su menor porcentaje de celulosa y lignina. En este trabajo también se evidencia que el nitrógeno de estas leguminosas es liberado 20 días después de su incorporación al suelo, el cual es un dato importante por considerar para la aplicación de abonos verdes al suelo.

En cuanto a la **aireación**, la transformación de la MOS puede ser aeróbica -ocurre en presencia de oxígeno- y se llama oxidación. Cuando los compuestos vegetales y animales son oxidados en el suelo, acontecen oxidaciones enzimáticas y reacciones simultáneas trascendentales que involucran, entre otros elementos, el carbono y el hidrógeno. El resultado de dicho tipo de descomposición genera dióxido de carbono, agua, energía y material descompuesto. Tal proceso, además, libera nutrientes esenciales al medio, los cuales son disueltos en la solución del suelo e inmovilizados por arcillas o por alta concentración de carbono en el suelo.

Por otra parte, la transformación de la MOS puede ser anaeróbica -ocurre en ausencia de oxígeno- y se denomina reducción. Esta modificación se efectúa, principalmente, en los suelos donde los poros se encuentran llenos de agua: en dicha situación, los organismos facultativos y anaerobios se vuelven dominantes. La descomposición anaeróbica es más lenta y libera menos energía que la aeróbica. Se desprende gas metano y el olor de estos materiales es pestilente; además, se generan productos de ácidos orgánicos, alcoholes y compuestos parcialmente oxidados. En un suelo, coexisten ambos tipos de procesos: los aeróbicos y los anaeróbicos, debido a que algunos horizontes o áreas pueden presentar una disminución del oxígeno a causa de, por ejemplo, acúmulo de agua.

En la degradación de la MOS influyen **factores climáticos**, entre estos, la temperatura. La temperatura afecta el tiempo del proceso de mineralización de la materia orgánica; por eso, en zonas cálidas





la mineralización es más rápida que en climas fríos, aunque en las primeras la MOS no se acumula mucho en el suelo. Por el contrario, en climas fríos, donde la mineralización es más lenta, hay más acumulación de MOS en el suelo.

La **humedad** interviene de forma significativa en el proceso de descomposición de la MOS: a mayor humedad efectiva, mayor es la tasa de mineralización.

En resumen, cuando la temperatura sea alta pero la humedad baja, habrá bajo contenido de MOS en el suelo, debido a que el proceso de mineralización es muy lento.

Eduardo Salcedo-Pérez *et al.* (2007) encontraron que los suelos con mayor humedad aprovechable tuvieron los valores más altos de MOS, lo cual se atribuye al ciclo acelerado de mineralización.

La **vegetación natural** también media sobre los contenidos el contenido de material descompuesto pues las áreas donde hay desarrollo de pastizales en conjunto con vegetación arbórea poseen aun mayor contenido de materia orgánica del suelo (MOS). En la zona de Guanacaste de Costa Rica, se registró que en diferentes etapas de desarrollo de los bosques (regeneración) no existía variación en el contenido de MOS entre ellas, pero sí se observó diferencia en este parámetro con respecto a la profundidad, ya que el contenido de este disminuía conforme la profundidad aumentaba. Además, se mostraron diferencias de contenido de la MOS entre tipos de bosque, por la relación del ciclaje natural y el uso del suelo por la vegetación (LEIVA, MATA, ROCHA Y GUTIÉRREZ, 2009).

Asimismo, la **textura** influye en el contenido de la MOS, en especial porque esta se relaciona con la permeabilidad del suelo y la capacidad de intercambio catiónico. Las arcillas presentan la ventaja de formar complejos arcilla-humus. Los suelos de textura arenosa tienen menos MOS que los de textura arcillosa limosa.

Los suelos con **drenajes desfavorables** acumulan grandes cantidades de MOS. Los contenidos de materia orgánica del suelo en los suelos inundados tipo manglar son muy variables; un estudio realizado en manglares de Colombia encontró variaciones de MOS de 5,5 a 32,7 % (FIGUEROA Y ÁLVAREZ, 2011).

De igual forma, las **prácticas de manejo del cultivo** repercuten sobre la MOS, particularmente en ambientes donde la cobertura de



vegetación es escasa, donde no se implementa la práctica de incorporación de residuos de cosecha, o labranza mínima o hay uso excesivo de abonos químicos (JOHNSTON, 1991). La fuente y la calidad de los abonos orgánicos interviene en la transformación de este material y ambas características se vinculan a factores físicos y químicos de los materiales utilizados (*ESTE ASPECTO SE ESTUDIARÁ EN EL SUBAPARTADO «C. ABONOS ORGÁNICOS»*).

La principal propiedad química que ataña a la materia orgánica del suelo es el **pH**: lo ideal es que este sea neutro (alrededor de 7) para que se lleve a cabo, adecuadamente, la degradación de la MOS. Además, el **tipo de suelo** y su **composición química** afectan los contenidos de MOS, por ejemplo, el porcentaje de MOS es muy bajo en los suelos formados sobre serpentinitas. Investigaciones de Wagner Peña Cordero, María Leirós y Jorge Briceño (2005, p. 71) sobre propiedades generales y bioquímicas de suelos forestales en áreas serpentinizadas de Galicia, España, indican que este tipo de suelos «tienen una menor fertilidad y poco contenido materia orgánica y una baja actividad microbiana y bioquímica, debido al poco desarrollo de la vegetación y al potencial efecto tóxico que presentan los metales sobre la actividad biológica en el medio».

La composición del material es decisiva, ya que los compuestos simples se desintegran más fácilmente que los complejos, como el proceso de disgregación de las ligninas que es a largo plazo.

Un aspecto apreciable enlazado a la descomposición de MOS es la **relación existente entre el carbono y el nitrógeno (C/N)** en ese material, puesto que cuanto mayor sea el contenido de carbono (C/N alta), aumenta la competencia de los microorganismos por el nitrógeno disponible. El aumento de microorganismos es un medio para determinar la velocidad de descomposición del material y del nitrógeno en el suelo.

Normalmente, los materiales vegetales tienen entre 40 y 60 % de carbono, mientras que el nitrógeno ronda entre 0,01 y 6 %; los materiales vegetales de leguminosas son de los que tienen más alta cantidad en nitrógeno (*Crotalaria*: 3,8 %, *Mucuna*: 3,1 % y *Lupinus costarricensis*: 5,3 %). Las leguminosas rondan relaciones C/N 8,5:1 a 30:1; y en los aserrines, cuyo contenido de carbono es mayor, la C/N se aproxima a 600 a 1.





Conforme las hojas son más viejas, las relaciones C/N aumentan; así ocurre con las concentraciones de estos elementos en las **ligninas**.

En los suelos, las relaciones C/N son más bajas; particularmente, el contenido de nitrógeno, por ejemplo, en un suelo arenoso pobre, ronda el 0,03 % de N, con relación C/N de 2. En suelos arables con texturas francas, la relación C/N puede variar entre 8 y 15.

Cuando la relación C/N se encuentre por encima de 30 en la materia orgánica del suelo, sucede un proceso de **inmovilización**, debido a que los microorganismos recurren al nitrógeno de la solución del suelo y causan deficiencia de este elemento; por lo tanto, el proceso de transformación de los materiales se ve alterado. Cuando la relación C/N está por debajo de 20, el proceso de degradación de la MOS sucede muy rápido; lo ideal es que se encuentre de 20 a 30.

Entre las variables desde la perspectiva física que se deben considerar en la degradación de la MOS se encuentra que los materiales orgánicos enterrados se descomponen más rápido; también cuanto menor sea el tamaño de la partícula, más rápido sucede el proceso de descomposición.

En resumen, para que se lleve a cabo una buena desintegración del material orgánico, es necesario comprender varios factores climáticos, edáficos y de manejo de suelos como:

- **Factores climáticos.** Temperatura, humedad y precipitación.
- **Factores edáficos.** Cantidad y tipo de cobertura, temperatura edáfica, compuestos xenobióticos, pH, textura del suelo, reacciones redox, humedad del suelo y elementos químicos presentes)
- **Manejo del suelo.** Mecanización del suelo, compactación y sistemas de siembra (*FIG. 46, P. SIG.*).

La materia orgánica del suelo (MOS) cumple múltiples funciones. Entre estas destacan:

- Es fuente de macronutrientos y micronutrientos.
- Tiene la propiedad de **agente quelante (secuestrante)** que le ayuda a atrapar el aluminio y los micronutrientos para que estos puedan ser absorbidos por la planta cuando son aplicados vía foliar.
- Inactiva plaguicidas, como los compuestos clorofenoles y cloroanilinas, bromuro de metilo (CH_3Br) y isotiocinato de metilo ($\text{C}_2\text{H}_3\text{NS}$).



CONCEPTOS

ligninas. Biopolímeros más abundantes en las plantas y junto con la celulosa y la hemicelulosa conforma la pared celular de estas, en una disposición regulada a nivel nano estructural, lo que da como resultado: redes de lignina-hidratos de carbono (CHÁVEZ Y DOMÍNE, 2013).

inmovilización de nitrógeno. Proceso en el que la relación existente entre el carbono y el nitrógeno (C/N) es alta (superior a 30:1). Esto se debe a que los microorganismos del suelo consumen más amonio del que se produce en la descomposición. Como resultado, hay poco nitrógeno en el medio para las plantas; por lo tanto, estas últimas son limitadas en su desarrollo.



CONCEPTO

agente quelante (secuestrante). Sustancia que forma complejos con iones de metales pesados. A estos complejos se les conoce como «quelatos», palabra del griego *chele*, que significa «garra».

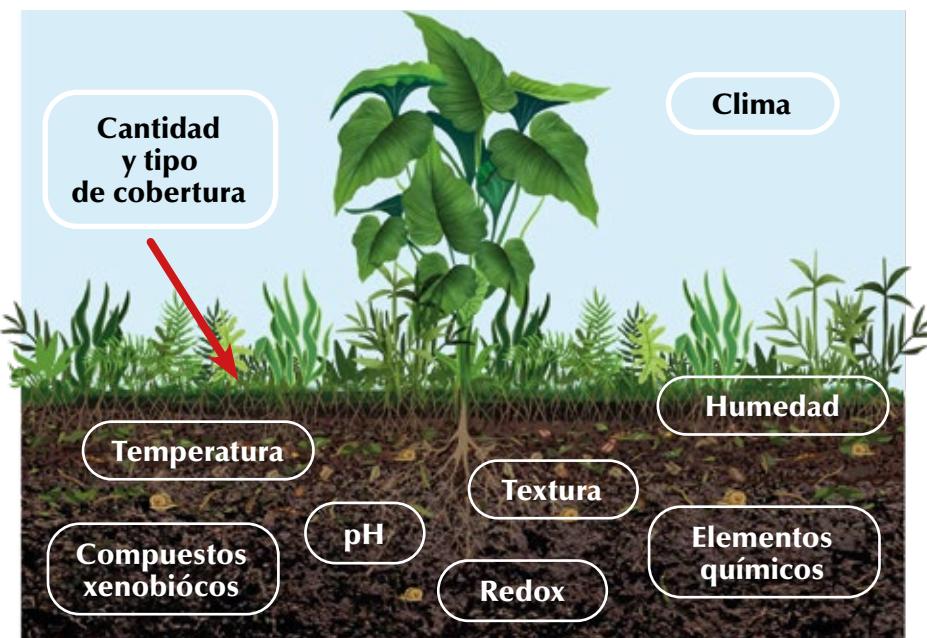


- Disminuye la volatización de plaguicidas.
- Mejora la capacidad de intercambio catiónico del suelo: forma el complejo humus-arcilla.
- Mejora la estructura del suelo y estabiliza los *ped*s.
- Disminuye la densidad aparente.
- Aumenta la capacidad de retención de agua.
- Promueve suelos más resistentes a las sequías.
- Fuente de alimento para microorganismos del suelo, por lo que estimula la actividad biológica.
- Estimula el crecimiento de las raíces del suelo.
- Es fuente primordial de micro y macronutrientos, sobre todo nitrógeno, fósforo y azufre.
- Disminuye el pH por la presencia de grupos carboxílicos y fenólicos; estos se comportan como ácidos débiles y tienden a disminuir el pH del suelo.
- Es fuente de carbono en el suelo.

En los sistemas de producción orgánica, se ha documentado el aumento de carbono en el suelo que ha sido cultivado de forma orgánica en relación con uno cultivado de forma tradicional (STOLZE, HÄRING y DABBERT, 2000). La causa radica en que en el sistema de producción de cultivo orgánico, se utilizan abonos orgánicos como bokashi o compost, se incorporan residuos de cosecha; además, se implementa el

FIGURA 46. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA DESINTEGRACIÓN Y EL MANTENIMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA. Entre los principales factores que intervienen en el ciclo de la materia orgánica están: la acción del clima, tipo y cantidad del material vegetal y, por supuesto, las condiciones edáficas como la temperatura, el pH, la textura, las condiciones redox, la humedad, los elementos químicos y la presencia de compuestos xenobióticos.

FUENTE: propuesta gráfica de Paola Brenes en 2017.





uso de coberturas multipropósito en el suelo para evitar erosión, elementos que aportan materia orgánica al suelo.

Como la MOS se compone de estructuras carbonadas, su cuantificación se realiza mediante la medida del carbono orgánico.

$$\text{MOS} = \% \text{ C} \cdot \text{factor}$$

El factor se estima con base en que en 100 g de materia orgánica hay 58 g de carbono y su valor es 1,724; por eso:

$$\text{MOS} = \% \text{ C} \cdot 1,724$$

La cantidad del contenido de materia orgánica del suelo se determina a partir de la toma de una muestra de suelo, previamente tamizada y secada.

La MOS comprende todos los componentes orgánicos del suelo; pero cuando el material ha sido totalmente descompuesto, es de naturaleza amorfa y coloidal, sus partes no pueden identificarse y recibe el nombre de humus.

El humus o las sustancias húmicas son las que sostienen los procesos y los ciclos de vida de los organismos. De ahí radica la importancia de usar, en la tierra de los cultivos, compost (desechos orgánicos previamente tratados) con grado avanzado de humificación.

Las sustancias húmicas, según Kass (1998), son producto de las siguientes cuatro fases:

- i La descomposición de la biomasa, que incluye lignina, carbonatos y proteínas, entre otras sustancias.
- ii La aceleración del proceso de degradación y de polimerización mediante los compuestos enzimáticos del metabolismo microbial.
- iii El reciclaje del carbono, el hidrógeno, el nitrógeno y el oxígeno en relación con la MOS y el suelo.
- iv La polimerización de los compuestos reciclados. La polimerización consiste en ligar los compuestos nuevos más simples unos con otros y con los productos residuales. La transformación de los residuos orgánicos sucede gracias a su mineralización, donde se produce un nuevo material orgánico y, luego, el proceso de humificación, en el cual se genera el humus (*FIG. 47, P. SIG.*).

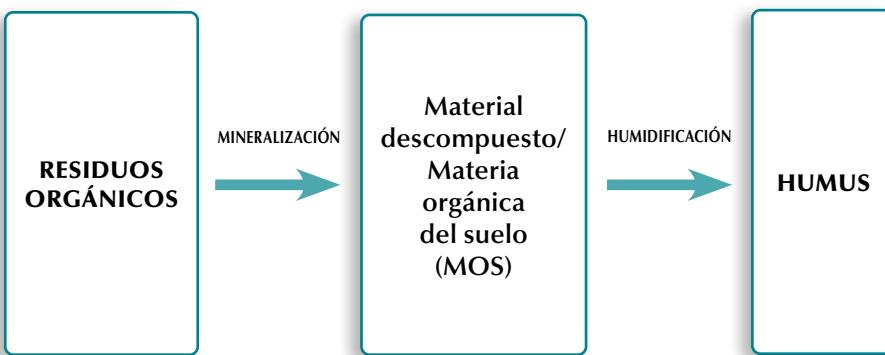
ATENCIÓN

La adición continua de materia orgánica (residuos u abonos orgánicos) proporciona capacidad para la recuperación de la estructura del suelo que ha sido dañada.



FIGURA 47. TRANSFORMACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA. Una vez que los residuos orgánicos llegan al suelo, inmediatamente inicia un proceso de mineralización, el cual consiste en ligar los compuestos nuevos más simples, unos con otros y con los productos residuales. Así se producen los residuos orgánicos en nuevo material orgánico que luego deberá sufrir un proceso de humificación; ese material se vuelve más estable.

FUENTE: adaptada de *Química de los suelos con énfasis en América Latina*, de H. W. Fassbender y E. Börnermisza (1987).



CONCEPTOS

ácidos fulvicos. Tienen un peso molecular más bajo que el de los ácidos húmicos, son solubles tanto en ácido como en álcali y son susceptibles al ataque microbiano.

Presentan color amarillo o rojo. Su vida media se encuentra entre 10 y 50 años. Alcanzan un CIC mayor a los 300 cmol+/kg.

ácidos húmicos. Poseen un peso molecular mediano, son solubles en álcali, pero son insolubles en ácidos y presentan resistencia intermedia a la degradación. Exhiben tonalidades de color café oscuro. Su vida media es mayor de 100 años y su CIC es baja.

sustancias húmicas. Poseen un peso molecular alto, son insolubles en ácidos y en álcali y son muy resistentes a los ataques microbianos.

polisacáridos. Polímeros compuestos por monosacáridos, unidos por enlaces glucosídicos. Un polisacárido muy común son los almidones, ya sea de maíz (*Zea mays*) o de alguna raíz como la yuca (*Manihot esculenta*).

El humus contiene alrededor de 8 % de la MOS. Las sustancias húmicas se separan y clasifican según su grado de solubilidad en una solución de NAOH, ajustada a una concentración 1 M, donde se puede ver la materia insoluble. El material que precipita se llama ácidos húmicos y el restante, el soluble, corresponde a ácidos fulvicos. Cuando se repiten las extracciones del material insoluble, quedan las sustancias húmicas.

Los ácidos **fulvicos** y los **húmicos** favorecen el crecimiento vegetal de muchas formas, como la elongación celular y la iniciación de raíces laterales.

El 20 % del material insoluble son sustancias no **húmicas**, son menos complejas y menos resistentes a los ataques microbianos. Están formadas por biomoléculas bien definidas física y químicamente, como los **polisacáridos** y los ácidos orgánicos.

La materia orgánica también se agrupa según su grado de humificación; este indicará la madurez e, indirectamente, la fertilidad del suelo. En condiciones aeróbicas, Núñez (1981, p. 116) identifica los siguientes estados de humificación: *null*, *moder* y *mor*, los cuales se detallan a continuación:

- ***Mull.*** Se forma en un medio biológicamente activo por lo que la descomposición de los restos frescos es rápida. Este estado de humificación del MOS se considera un material bien humificado. Las sustancias orgánicas en estado *null* tienen buena estructura (arreglo de partículas en el coloide), aireación y agregación, son estables a $\text{pH} > 7$ y poseen una relación C/N de 10.
- ***Moder.*** La MOS en estado *moder* presenta un desarrollo bajo del material orgánico humificado, por lo que posee una cantidad mayor de sustancias húmicas y de ácidos fulvicos. Su color es oscuro, su estructura es débil y hay poca polimerización.



- **Mor.** Es un material biológicamente poco activo y la mineralización de MOS es lenta. Este estado de humificación de la materia exhibe pocos ácidos fulvicos y húmicos de bajo peso molecular, los cuales se producen cuando en el suelo se presentan condiciones de acidez (baja saturación de bases). Hay presencia de coníferas y materiales parentales formados de cuarzo.

En condiciones anaeróbicas, el humus es conocido como turba, el cual es considerado como una categoría del grado de humificación de la materia orgánica. No se pueden categorizar; las turberas son la materia orgánica del suelo (MOS) que se satura con agua casi permanentemente y que por condiciones de acidez o bajo oxígeno, la descomposición es muy lenta.

Para la clasificación de suelos orgánicos en taxonomía de suelos se hace diferencia de materiales vegetales como son el fíbrico, el hémico, el sáprico, el humilúvico y el límnico, y están basados en el grado de descomposición del material vegetal; además, se apoya en el contenido de fibras. Corresponde a todos aquellos tejidos vegetales orgánicos del suelo que no sean raíces.

B. MICROORGANISMOS EN EL SUELO

La actividad biológica en el suelo es responsable de múltiples procesos biogeoquímicos esenciales para el equilibrio del planeta. Los microorganismos tienen a cargo la mineralización y la inmovilización o fijación de elementos como nitrógeno, fósforo y azufre. A través de estos procesos, se liberan macroelementos y microelementos de forma biodisponible para la planta (JULCA, MENESES, BLAS Y BELLO 2006). Por ejemplo, los ciclos del fósforo y del nitrógeno necesitan los procesos de mineralización para que materiales como hojarasca de leguminosas o guano se puedan transformar en esos elementos (FIG. 48, P. SIG.).

Esos ciclos generan productividad en el sistema agrícola, agroforestal o natural, ya que, gracias a ellos, el reciclaje interno de nutrientes ocurre sin grandes pérdidas.

En la actividad biológica del suelo intervienen un millar de microorganismos; empero, ante la ausencia de un solo microorganismo de la flora o la fauna común de los suelos, las tasas de mineralización pueden ser afectadas entre 0,01 y 33,5 %, según estudios de M. Jill Clapperton (2003, CITADO POR FAO, 2016).

ACTIVIDAD

Elabore un mapa conceptual del fraccionamiento de las sustancias húmicas por las soluciones extractantes, de manera que ilustre las clasificaciones de las sustancias resultantes. Consulte la información brindada en esta unidad didáctica y la obra *Fundamentos de edafología* (CAPÍTULO V) de Jorge Núñez Solís (1981).

• PROPIEDADES DEL SUELO

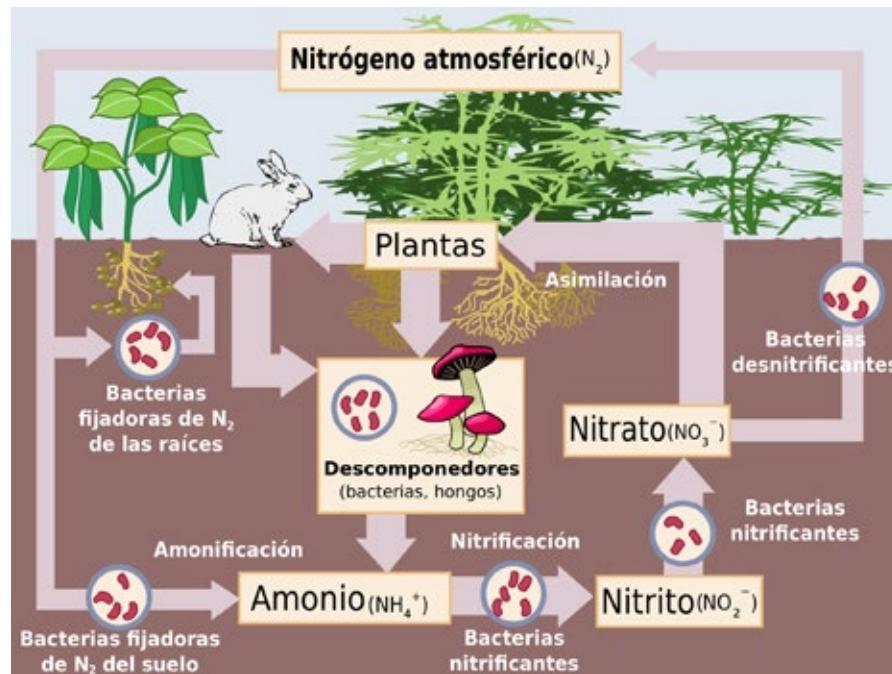
ATENCIÓN

Los compuestos del ciclo del nitrógeno son los siguientes:
Ácido nítrico $[HNO_3]$
Amonio $[NH_4^+]$
Amoniaco $[NH_3]$
Nitrógeno molecular $[N_2]$
Óxido de nitrógeno (I), monóxido de dinitrógeno, óxido nitroso $[N_2O]$
Óxido de nitrógeno (II), monóxido de nitrógeno, óxido nítrico $[NO]$
Óxido de nitrógeno (IV), dióxido de nitrógeno $[NO_2]$
Nitrito $[NO_2^-]$
Nitrato $[NO_3^-]$



FIGURA 48. CICLO DEL NITRÓGENO. El ciclo del nitrógeno es uno de los ciclos biogeoquímicos que involucran procesos biológicos con los elementos abióticos, con el fin de suministrar este elemento al medio. El suministro de nitrógeno en el medio puede venir de distintas fuentes, como las plantas o los seres vivos, los cuales tienen gran contenido de nitrógeno en su composición o por procesos de fijación de nitrógeno atmosférico, realizado por bacterias especializadas. Una vez que algún resto de un material vegetal es depositado al suelo, los hongos y bacterias descomponedoras transforman el nitrógeno en amonio y luego de los procesos de nitrificación, el amonio es oxidado y se convierte en nitrato, el cual es una forma de asimilación del nitrógeno por parte de la planta.

FUENTE: «Diagrama con el ciclo del Nitrógeno». Ilustración de Johann Dreö (2015). Reproducida con fines educativos, bajo licencia de Wikimedia Commons.



La fauna del suelo se clasifica, según el tamaño, en los siguientes tres grupos:

- i. **Microfauna.** Microorganismos menores de 200 μm
- ii. **Mesofauna.** Mesoorganismos que se encuentran entre 200 μm y 6 mm
- iii. **Macrofauna.** Macroorganismos mayores de 6 mm

Las principales tareas de los microorganismos del suelo se centran en la **mineralización** y en la absorción de nutrientes.

Cuando en los suelos agroforestales o agrícolas se maneja bien la comunidad microbiana en conjunto con la materia orgánica, se mejoran diferentes procesos. Entre ellos: el reciclaje de nutrientes; el aumento de asociaciones sinérgicas, sintróficas, mutualistas, antagonistas, comensalistas, de depredación o parásiticas, las cuales combaten plagas y enfermedades; el desarrollo de la estructura del suelo, su aireación y su retención de humedad; los procesos de fijación biológica de nitrógeno y un adecuado secuestro de carbón (CLAPPERTON 2003, CITADO POR FAO 2016).

Como la mineralización es esencial en el sistema para la obtención de elementos como fósforo, nitrógeno y azufre, existen especies microbianas que trabajan en procesos específicos; por



CONCEPTO

mineralización. Proceso de degradación de materiales orgánicos hasta formar sustancias aprovechables para las plantas.



ejemplo, los procesos de nitrificación, de desnitrificación y de fijación biológica de nitrógeno.

En la naturaleza, el nitrógeno ingresa al medio en las siguientes formas: N_2 atmosférico, el cual es fijado en el suelo por bacterias especializadas, y dos compuestos provenientes de la mineralización del nitrógeno en el suelo: HNO_3 y NH_4^+ , los cuales pueden encontrarse disueltos o adheridos a partículas coloidales. Para que el nitrógeno sea asimilable por las especies vegetales, es necesario que ocurran procesos biogeoquímicos que transformen esos tres compuestos en nitrato, aunque a veces el amonio puede ser absorbido directamente. Una vez dentro de la planta, el nitrato es reducido a amonio o amoníaco.

Las colonias de nitrobacter y nitrosomonas determinan las actividades enzimáticas de descomposición de los nitrógenos amoniacales que ingresan al sistema, como los provenientes de la aplicación de nitrato de amonio. Este tipo de bacterias no solo participa activamente en la amonificación, sino en los procesos de nitrificación y desnitrificación.

Para que el suelo contenga amonio, es fundamental, primero, un proceso de **amonificación** (paso del nitrógeno orgánico a amonio), resultado de la descomposición de materiales orgánicos nitrogenados. En el procedimiento, participan múltiples microorganismos y puede llevarse a cabo en condiciones aeróbicas y anaeróbicas.

Como se explicó, la planta, generalmente, absorbe el nitrógeno en forma de nitrato; por lo tanto, después de la amonificación, sigue la nitrificación (oxidación del amonio), cuyo producto es NO_2^- o NO_3^- . La nitrificación únicamente se realiza en condiciones aeróbicas y en presencia de enzimas catalizadoras que poseen las bacterias nitrificantes (nitrosomonas y nitrobacter). La nitrificación se lleva a cabo en dos fases, según lo ejemplifica Peña Cordero (2017):

- *Fase 1.* La oxidación del amoniaco a nitritos, con la participación de las nitrosomonas.
- *Fase 2.* La oxidación del nitrito a nitrato, con la participación de la nitrobacter (FIG. 49, P. SIG.).

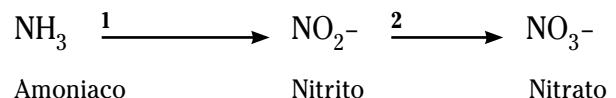


ATENCIÓN

La fijación biológica de nitrógeno es uno de los sucesos ecológicos vitales. Consiste en el aprovechamiento de una fracción del nitrógeno gaseoso (atmosférico) por las plantas por medio de procesos microbianos en el suelo. Muchas bacterias pueden colaborar en este proceso de fijación biológica de nitrógeno. Algunas realizan simbiosis con las plantas y otras son de vida libre; es decir, no tienen ninguna relación interespecífica con plantas.



La reacción de nitrificación se representa a continuación:



Para que la nitrificación se realice adecuadamente, el pH debe oscilar entre 5,5 y 9,6.

La primera fase del proceso de nitrificación da como resultado la acidificación del medio, por la acumulación de ácido nítrico HNO_3 .

Contrario al proceso de mineralización, pueden ocurrir procesos de inmovilización, los cuales están relacionados con la transformación de compuestos inorgánicos de nitrógeno en orgánicos, por acción de la asimilación del nitrógeno por microorganismos.

FIGURA 49. PROCESO DE NITRIFICACIÓN Y DESNITRIFICACIÓN. En la figura se pueden observar los procesos relacionados con la mineralización; el cual consiste en el paso del nitrógeno orgánico a nitrógeno inorgánico. En este procedimiento de mineralización ocurre la amonificación, que consiste en el paso del nitrógeno orgánico a amonio, como resultado de la descomposición de materiales orgánicos nitrogenados. Después de la amonificación, sigue la nitrificación (oxidación del amonio), cuyo producto es NO_2^- o NO_3^- . En esta sucesión de eventos, pueden ocurrir fases de inmovilización, las cuales se encuentran relacionadas con la transformación de compuestos inorgánicos de nitrógeno en orgánicos, debido a la acción de asimilación del nitrógeno por microorganismos o de desnitrificación, y su relación con la conversión del nitrito en nitrógeno molecular.

FUENTE: *Edafología del trópico*, de Wagner Peña Cordero (2017).



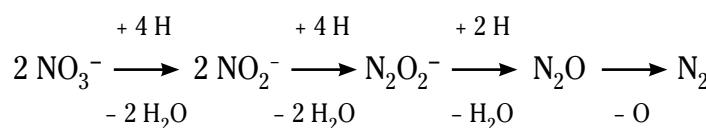
De forma paralela, pueden presentarse otros productos en el ciclo de nitrógeno. Por ejemplo, cuando el amonio (NH_4^+) es degradado o digerido por las bacterias fijadoras de nitrógeno, los productos de los procesos de degradación son compuestos aminados, como proteasas, peptonas y, al final, en aminoácidos; a este el proceso se le llama aminización.



Cuando en el suelo no existen las condiciones ideales, pueden efectuarse reacciones contrarias, como el caso de la **desnitrificación**.

La desnitrificación es la conversión del nitrato en nitrógeno molecular, y son necesarias el nitrato reductasa para que se lleve a cabo la primera parte de la reacción. En el proceso se pierde agua, por lo que en suelos inundados hay grandes pérdidas de nitrógeno por volatización (PEÑA CORDERO 2017).

La reacción de desnitrificación se escribe de seguido:



En el proceso participan eubacterias como *Bacillus*, *Spirillum*, *Pseudomonas* y *micrococcus*.

La velocidad de esa reacción dependerá del oxígeno, la humedad, el pH, la temperatura, la concentración de nitratos y las condiciones redox. Cuando el valor del pH es 4,8, se reduce; y cuando se encuentra entre 8,0 y 8,6, se aumenta. Cuando el pH es alto, hay mucha pérdida de óxido nitroso (N_2O).

En microbiología de suelos se analizan, generalmente, tres grupos de microorganismos: bacterias, hongos y actinomicetos; sin embargo, las otras divisiones, como algas, protozoarios y virus, no dejan de completar funciones influyentes en el suelo. A continuación, se describen los conjuntos más sobresalientes que se mencionaron:

1. BACTERIAS

Las bacterias, uno de los grupos más abundantes en el suelo, «son organismos procariotas unicelulares; la mayor parte presenta forma esférica (cocos) o de bastón bacilos» (THOMPSON Y TROEH 1988, CITADO POR JULCA ET AL., 2006).

Las bacterias pueden, entre otras capacidades, ser descomponedores; desarrollar mutualismos importantes, como simbiontes con las plantas; ser patógenas y ser quimiautorotróficas. Adicionalmente, realizan funciones concretas, como la oxidación del amoniaco a nitratos.



ATENCIÓN

La desnitrificación biológica es producto de microorganismos desnitrificantes; en 1987, se habían identificado unos 23 géneros de bacterias desnitrificantes como las *Pseudomonas*, *Xantomonas* sp. Dichos microorganismos se caracterizaron por ser aeróbicos o por ser facultativos y usan el oxígeno como receptor de los hidrógenos (agente oxidante) disueltos en el agua, aunque también pueden usar los nitratos en lugar del oxígeno. También hay procesos de desnitrificación no biológica.



Una de sus funciones más estudiadas es la que llevan a cabo en los procesos de fijación biológica de nitrógeno, principalmente, bacterias como el *Rhizobium* y el *Bradyrhizobium* en especies leguminosas, y cianobacterias como la *Anabaena*, la *Nostoc* y la *Frankia* en plantas no leguminosas. Además, existen muchas más de vida libre, como el *Azotobacter*, las *Azomonas*, la *Dexia*, el *Bacillus Plymixia*, el *Azospirillum* y la *Nodularia*, que pueden participar en tal proceso (MASSOL, 2002).

Como se dijo, en la fijación biológica -aprovechamiento de una fracción del nitrógeno atmosférico-, se lleva a cabo la reducción del nitrógeno molecular a amoníaco y esta es catalizada por la enzima nitrogenasa. Para que la reacción se efectúe, la demanda de energía (ATP) es muy alta y se logra solo gracias a la infección de bacterias vía radicular (por medio de las raíces), donde ocurre el proceso catalítico (MASSOL, 2002).

La infección de las bacterias como el *Rhizobium* forma unas estructuras radiculares llamadas nódulos. Es un proceso de infección en etapas (CALVO, 2011) y la *primera* consiste en un reconocimiento celular por parte de la bacteria. La planta lanza señales, sobre todo quimioatractantes, como los flavonoides. La bacteria actúa como receptor de estas señales y busca puntos de invasión en la raíz de la planta emisora.

En la *segunda etapa* se infecta la planta: la bacteria penetra en la raíz y forma un tubo de infección hasta llegar a la corteza de la raíz. La *tercera* y última etapa radica en el establecimiento del simbiosoma, estructura en forma de nódulo formada por el crecimiento bacterioide y rodeada de una membrana de tejido vegetal de la raíz. En general, se pueden encontrar de $2 \cdot 10^6$ a $500 \cdot 10^6$ bacterias en el suelo por gramo de suelo seco (ARIAS, 2001).

Sergio Calvo García (2011) menciona que, entre los factores ambientales que limitan la fijación biológica del nitrógeno, se encuentra el exceso o la carencia de determinados elementos minerales, por ejemplo, deficiencia de fósforo, hierro, calcio, molibdeno, cobalto y cinc.

Las altas temperaturas incrementan el proceso de respiración de las plantas, lo cual ocasiona que el carbono disponible para la simbiosis entre la planta y las bacterias sea menor. A temperaturas



ATENCIÓN

También, se efectúan procesos de fijación de nitrógeno no biológica, como la que ocurre a partir de la energía fotoquímica producida por tormentas eléctricas (reacción de N_2 con gases de ozono para producir NH_4^+ y HNO_3) y la fijación generada por causas antropogénicas (producción de fertilizantes).



superiores a los 7 °C la nodulación es inexistente, se supone que a bajas temperaturas la simbiosis es mayor y se daría la nodulación.

El agua y la luz afectan también la simbiosis. Cuando la disponibilidad de agua es baja, la fijación del nitrógeno es menor. Excesos de nitrógeno en el medio o la aplicación de fertilizantes químicos nitrogenados inhiben los procesos de infección y nodulación.

En campos agrícolas o intervenidos por el ser humano, el suelo, a veces, es afectado por desequilibrios en los procesos biogeoquímicos, lo cual altera la población de microorganismos y, por lo tanto, se pueden crear problemáticas a nivel de enfermedades. En el área agrícola, hay muchas bacterias patógenas de peso, como *Erwinia amylovora*, *Agrobacterium tumefaciens*, *Pseudomonas syringae* y *Xanthomonas campestris* *pv. campestris*.

Las poblaciones de bacterias también son perturbadas por el pH del suelo, así como por organismos antagónicos y sustancias contaminantes provenientes de agroquímicos. Por eso, las bacterias pueden ser utilizadas para evaluar la calidad de suelos.

2. ACTINOMICETOS

«Los actinomicetos son bacterias procariotas filamentosas, las cuales poseen hifas, al igual que los hongos, y son cenocíticas (multinúcleos en las células); están con frecuencia ramificadas y entrelazadas, por consiguiente, son difíciles de contar» (THOMPSON Y TROEH 1988, CITADO POR JULCA *ET AL.*, 2006). Esas bacterias son muy adaptables y heterótrofas, sin excepción. Pueden degradar una amplia gama de compuestos, entre ellos, polisacáridos, lípidos, hidrocarburos saturados, fenoles y proteínas; e, incluso, descomponen materiales complejos como la quitina presente en los exoesqueletos de los artrópodos (JULCA *ET AL.*, 2006). Por ser organismos típicamente aeróbicos, no suelen encontrarse en suelos encharcados y son más frecuentes en los suelos calientes que en los fríos; además, toleran poco la acidez (WILD 1992, CITADO POR FAO, 2016).

Su población en el suelo varía entre $5 \cdot 10^5$ y $20 \cdot 10^5$. Su actividad depende del pH y se detiene en pH superiores a 4,7. Algunos de los actinomicetos se caracterizan por la capacidad de producir vitaminas esenciales.



ATENCIÓN

Clostridium sporogenes, una bacteria que se encuentra en el suelo, muestra prometedores resultados para la lucha contra el cáncer (BARBE, VAN MELLAERT Y ANNÉ, 2006).



CONCEPTO

cenocito. Célula multinucleada. Las hifas de la enfermedad del tizo tardío en la papa, *Phytophthora infestans*, son cenocíticas, es decir poseen doble núcleo.



ATENCIÓN

El olor a tierra mojada es producido por los actinomicetos. Se indica que al llorar, algunas especies de actinomicetos liberan ácidos volátiles que dan este olor tan peculiar luego de degradar el sustrato donde se encuentran.



Algunos de estos organismos funcionan como promotores del desarrollo vegetal o como fijadores de nitrógeno. En el proceso de compostaje, se despliegan al final y llegan a dominar cuando la capacidad de desarrollo de fitohormonas y la de fijación de nitrógeno de los nutrientes comienzan a ser limitantes.

3. HONGOS

Los hongos representan, aproximadamente, 70% de la población microbiana del suelo, según Wild (1992) citado por Julca *et al.* (2006, EN LÍNEA). Las especies de hongos edáficos son, en la mayoría, organismos imperceptibles a la vista que se desarrollan en forma de hilos o hifas. Tales organismos se pueden establecer en una amplia gama de sustratos: desde los que son ricos en hidratos de carbono, alcoholes o ácidos orgánicos sencillos hasta aquellos con altos contenidos de celulosa y lignina. Este grupo puede dividirse en organismos descomponedores, los mutualistas, los patógenos y los parásitos.

Un ejemplo de hongo parásito obligado en los vegetales y que ha desarrollado con estos una simbiosis es la micorriza. Estos hongos, saprófitos comunes en el suelo, son eficaces transformadores de sustratos y se dividen en dos grupos: ectomicorrizas y endomicorrizas. Las ectomicorrizas son hongos que cubren las raíces en forma externa y las hojas crecen entre las células corticales de las raíces (células de las membranas que forman las raíces). Las endomicorrizas se alojan entre esas células y dentro de ellas. Muchas de las especies de micorrizas pueden asimilar entre 30 y 50 % del carbono presente en la MOS que descomponen, lo que representa una tasa de conversión muy superior a la de las bacterias, que es entre 5 y 20 % (WILD 1992, CITADO POR JULCA *ET AL.*, 2006).

Los hongos componen poblaciones de $5 \cdot 10^3$ a $9 \cdot 10^5$ organismos por gramo de suelo seco. Dicho grupo no solo degrada MOS, sino que puede ser depredador de otros organismos; también, a veces, es patógeno en cultivos.

Las levaduras son especies de hongos que habitan en el suelo y cumplen funciones primordiales en diferentes procesos. Participan en la síntesis de sustancias antimicrobianas que intervienen en el crecimiento de las plantas, por lo que se les conoce como



ATENCIÓN

Se estima que 92 % de las especies de plantas, tanto vegetales como herbáceas y leñosas, mantienen una asociación micorríctica planta-hongo (BARRIUSO, MARTÍN, Y SÁNCHEZ 2015).



sustancias bioactivas. Las levaduras se elaboran a partir de los azúcares y aminoácidos producidos por las bacterias fotosintéticas; y su presencia depende de la temperatura, el pH, la humedad y la disponibilidad de azúcares simples. Esos hongos segregan sustancias que funcionan como sustratos para otros tipos de microorganismos efectivos, tales como los actinomicetos y las bacterias generadoras del ácido láctico.

Botrytis cinerea, *Pythium*, *Verticillium*, *Phytophthora*, *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Rhizopus*, *Curvularia*, *Sclerotinia*, *Plasmodiuem*, *Penicillium*, *Mucor*, *Armillaria mellea*, *Urocystis cepulae* y *Rosellina* son otras especies de hongos que causan serias enfermedades a las plantas, lo que resulta en pérdidas económicas en sistemas productivos.

Al igual que las bacterias, los hongos pueden ser afectados por el pH del suelo, así como por organismos antagónicos, sustancias contaminantes provenientes de agroquímicos.

4. OTROS ORGANISMOS

Las algas son también organismos valiosos en el suelo, pero no tan numerosos como los hongos; son fotosintéticos y abundan cuando la humedad y la luz están presentes.

Los protozoarios, organismos unicelulares muy simples, son bastante móviles y varias veces mayores que las bacterias (de 5 a 100 μm). Por su abundancia, se encuentran estrechamente relacionados con la densidad bacteriana del suelo. Estos predadores se alimentan de bacterias, otros protozoarios y, algunas veces, de hongos; además,



ATENCIÓN

El suelo es un gran reservorio de levaduras y existen en toda clase de suelos. Sus contenidos solo están limitados a condiciones de temperatura, el pH, la humedad y la disponibilidad de alimento como azúcares simples.

FIGURA 50.
MICROORGANISMOS
DEL SUELO. Las imágenes
muestran dos tipos de
microorganismos: A)
Actinomiceto: *Streptomyces*
sp. y, B) Bacterias: nódulos
de leguminosa infectados
por *Rhizobium*.

FUENTE: A) Archivo: Streptomyces_sp_01.png, fotografía: David Beard (1972). Imagen de dominio público. B) Archivo: Root Nodules with leghaemoglobin 'pink' visible. JPG, fotografía: de Rosser1954 (2014). Reproducidas con fines educativos, bajo licencia de Wikimedia Commons.



**ATENCIÓN**

En un gramo de suelo hay 2 500 000 de bacterias, 5 000 000 de hongos, 50 000 algas y 30 000 protozoos (SÁNCHEZ Y REINES 2001, P. 191).

• La mayoría de la microflora y de la fauna del suelo pueden encontrarse en la zona radicular (rizosfera), porque las raíces y raicillas constituyen un hábitat apropiado. Se cree que los hongos son el sistema de comunicación del suelo, más similar a la función del internet (AGRICULTURES, 2015).

de materia orgánica soluble. Participan en la mineralización del nitrógeno: requieren de 5 a 10 veces menos de este elemento que las bacterias; por ende cuando un protozoario se alimenta de una bacteria, libera nitrógeno, el cual es aprovechado por las plantas (FIG. 50, P. ANT.).

Los mesoorganismos y los macroorganismos participan en mejorar la complejidad del suelo y aportan nitrógeno o calcio por medio de sus excretas; algunos, como las lombrices, estimulan el crecimiento de plantas. Los colémbolos, por ejemplo, se incorporan en la degradación de la materia orgánica (PARK Y COUSINS, 1995). El número y la calidad de los colémbolos y el número de lombrices son indicadores de la calidad del suelo. Desde las lombrices hasta los organismos de más tamaño, como roedores, cumplen funciones cruciales.

5. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ACTIVIDAD MICROBIOLÓGICA DEL SUELO

En forma resumida, se señalan, a continuación, varios factores que influyen en la actividad de los microorganismos en el suelo (PEÑA, 2017, PP. 224-227).

- a) **Cantidad y calidad** de la materia orgánica (porcentaje de materia orgánica y relación C/N).
- b) **pH del suelo.** El rango óptimo es 6,5 a 7,4.
- c) **Humedad del suelo.** Suelo con humedad a capacidad de campo, no en condiciones de saturación.
- d) **Cantidad de oxígeno** en el suelo (porcentaje de porosidad, compactación, textura, y agua).
- e) **Temperatura.**
- f) **Sustancias inhibidoras** secretadas por raíces o de descomposición de material orgánico.
- g) **Profundidad del suelo.** A mayor profundidad, menos actividad microbiana.
- h) **Manejo de los suelos.**
- i) **Agentes externos** contaminantes (contaminación con aguas residuales o con agentes químicos como gasolina y aceites, etc.)

Los factores de manejo del suelo que afectan las actividades microbianas en el suelo se pueden resumir de la siguiente forma:

- Efecto del laboreo sobre la pérdida de la materia orgánica que se mezcla con los horizontes inferiores del suelo, así como so-



bre la porosidad y la oxigenación del suelo y, con ello, el aumento de GEI (gases de efecto invernadero).

- Frecuencia de uso de abonos orgánicos y su relación C/N y frecuencia de uso de fertilizante sintético.
- Cobertura vegetal incrementa la actividad microbiana y se asocia al aumento de la biomasa en descomposición después de la cosecha.
- Suelos tratados con herbicidas muestran un valor más bajo de la actividad deshidrogenasa que aquellos no tratados.

La actividad biológica del suelo se puede medir por medio de un análisis de laboratorio de respiración microbiana. La actividad microbiana del suelo puede ser estimada indirectamente en la determinación de la respiración basal. Esta consiste en determinar la producción de O_2 en el medio o bien la concentración de CO_2 desprendido (función de la actividad biológica y del contenido del suelo en carbono orgánico fácilmente mineralizable), mediante la técnica de incubación.

Para la determinación de los tipos de microorganismos presentes en una muestra de suelo, se debe enviar esta a laboratorios especializados, donde se aíslan las cepas de microorganismos, se realizan conteos por grupo de microorganismos y se identifican. Generalmente los análisis microbiológicos hacen conteos de bacterias, hongos y actinomicetos, y, por aparte, se pide un análisis de identificación de las especies para cada grupo de microorganismos.

c. ABONOS ORGÁNICOS

Los retos actuales de la seguridad alimentaria, el cambio climático y la conservación de los recursos naturales como el suelo han fomentado la necesidad de hacer sistemas productivos que enfrenten mejor los cambios y, además, con una gestión más óptima. El uso de abonos orgánicos es una práctica de la agricultura conservacionista para mantener la salud del medio.

Se consideran los tipos de abonos orgánicos como todo material de origen animal o vegetal que se utilice, principalmente, para mejorar las características del suelo como fuente de vida y de nutrientes. Ejemplos de este tipo de abonos son: compost, bokashi y **lombricompost**, **gallinaza** y desechos vegetales frescos, como la pulpa del café y los residuos de caña y de piña (SOTO Y MELÉNDEZ, 2004).

CONCEPTOS

lombricompost. Materia orgánica degradada por lombrices tipo californianas. Este abono es obtenido por medio de la excreta de las lombrices rojas «californianas» alimentadas con residuos vegetales o excretas de animales entre otros. Como resultado de tal proceso, se obtiene un material rico en nutrientes para ser usado como abono.

gallinaza. Abono elaborado a partir excrementos de gallinas ponedoras. Dicho abono es realizado por medio del compostaje de los materiales de las «camas» y a partir de residuos de excretas de las jaulas de cría de aves como gallinas ponedoras.



ACTIVIDAD

Buscar información acerca de las diferentes formas de realizar abonos orgánicos para utilizar en casa o para ser aplicados en una finca. Recordar anotar la lista de materiales requeridos y las ventajas y desventajas de cada una.

En los sistemas agroproductivos, se puede incorporar materia orgánica de diferentes fuentes y formas, como las siguientes:

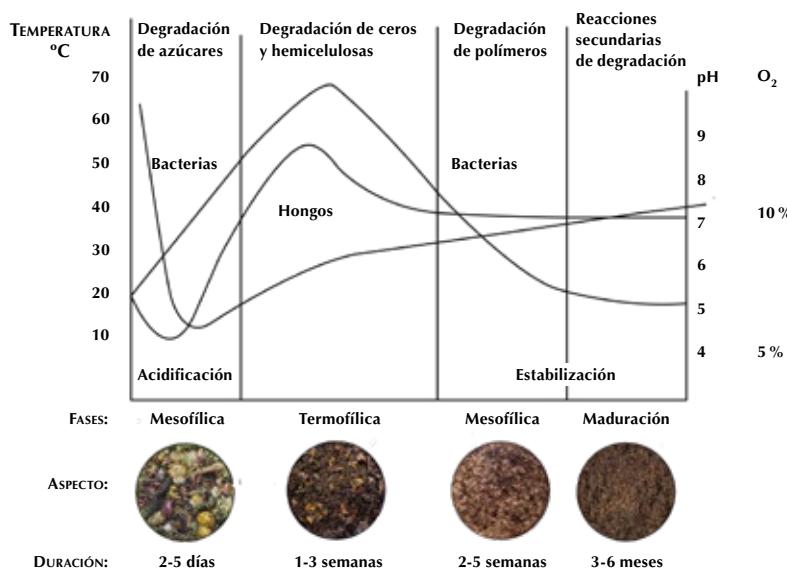
- Residuos de cosecha, podas y chapas
- Fabricación de abonos orgánicos tipo compost, bokashi y lom-bricompost
- Lixiviados tratados de biodigestores y lagunas de oxidación
- Compra de enmiendas orgánicas externas

El **compostaje** es un proceso biológico a partir de residuos orgánicos que ocurre en presencia de oxígeno, en el procedimiento se regula la humedad y la temperatura del material a valores adecuados; se aplica un tratamiento térmico para evitar el desarrollo de microorganismos patógenos. La técnica se lleva a cabo en cuatro etapas y en cada una participan diferentes microorganismos (FIG. 51). Estas se resumen a continuación:

1. **Mesófila** (2 a 5 DÍAS). La materia de partida comienza a calentarse hasta los 45 °C, gracias a la actividad biológica que ocurre en ese momento. Las bacterias son las primeras en colonizar y en iniciar la descomposición de los compuestos solubles y simples y el pH desciende a valores entre 4,0 y 4,5.
2. **Termófila** (1 a 3 SEMANAS). La compostera o compostador alcanza temperaturas mayores a 45 °C. Las bacterias y los actinomicetos especializados en sobrevivir a temperaturas altas se desarrollan y degradan los materiales más complejos. En

FIGURA 51. FASES DEL COMPOSTAJE. El proceso de compostaje sucede en cuatro etapas, las cuales se extienden por seis meses: la primera, dura de 2 a 5 días y se denomina fase mesóflica, de seguido; se presenta la fase termóflica, la cual dura de 1 a 3 semanas; después la fase de enfriamiento, que transcurre de 2 a 5 semanas y, finalmente la fase de maduración, la cual se prolonga de 3 a 6 meses.

FUENTE: *Manual del compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*, de Pilar Román, María M. Martínez y Alberto Pantoja.





este momento, el pH se torna alcalino por lo que el nitrógeno en el medio se transforma en amoníaco. En las composteras, se debe cuidar que las temperaturas no se eleven a más 70 °C y hay que controlar la humedad del material.

3. **Enfriamiento** (2 a 5 SEMANAS). La temperatura desciende nuevamente a los 45 °C y la compostera es colonizada por hongos que degradan compuestos más complejos, como celulosas y ligninas. El pH desciende y se mantiene ligeramente alcalino.
4. **Maduración** (3 a 6 MESES). Se producen sustancias polimerizadas y ácidos húmicos y fúlvicos.

Comúnmente, hay dos tipos de abonos: los procesados y los no procesados, estos últimos son excretas de animales y no deben ser utilizadas sin un proceso previo para evitar contaminaciones en los cultivos o en los cuerpos de agua. Las aguas residuales de lagunas de oxidación también deben ser sometidas a un tratamiento antes de ser empleadas. Siempre es recomendable realizar un análisis microbiológico y químico a los abonos orgánicos antes de ser comprados o al ser aplicados al suelo.

La calidad de los abonos se puede evaluar desde las siguientes dos perspectivas:

1. La productividad o la respuesta del abono en el campo en relación con el cultivo.
2. Las propiedades físicas, químicas y biológicas del abono, como olor, color, tamaño de partículas, contaminación con materiales plásticos o vidrios, densidad, conductividad eléctrica, relación C/N, metales pesados y bacterias, la cuales se pueden estudiar en laboratorios.

En el trabajo de Gabriela Soto y Gloria Meléndez (2004), adaptado de Paul y Clark (1996), se mencionan las cualidades generales de los abonos orgánicos, con base en las propiedades químicas dadas por un análisis foliar o de digestión total (*CDR. 18*).

Los contenidos de nitrógeno son variables en los abonos, debido a que dependen estrechamente del material utilizado (*CDR. 19, P. SIG.*). Estos son los niveles para cada caso:

EN LA RED...

COMPOSTAJE

Si desea incursionar más en el proceso de compostaje, se recomienda leer el *Manual del compostaje. Experiencias en América Latina*, de Pilar Román, María M. Martínez y Alberto Pantoja. Puede accederlo en la siguiente dirección electrónica: <<http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.



ATENCIÓN

Buscar en la web los diferentes sistemas de producción de abono orgánico e identifica cuáles sistemas podrían utilizarse en zonas urbanas. También, puede indagar sobre el término de compostas urbanas o caseras. Recientemente se comenta mucho del compostaje Takakura, si desea buscar más información puedes realizar una investigación de esta técnica también.

CUADRO 18

CARACTERÍSTICAS Y NIVELES ÓPTIMOS DE LOS ABONOS ORGÁNICOS

CARACTERÍSTICA	NIVEL ÓPTIMO
Nitrógeno	> 2 %
Fósforo	0,15-1,5 %
CICE	75-100 (meq/100g)
C/N	< 20
Humedad	< 40 %
COLOR	NEGRO A CAFÉ OSCURO
OLOR	TIERRA

FUENTE: «Cómo medir la calidad de los abonos orgánicos», de Gabriela Soto y Gloria Meléndez (2004, p. 15).



las gallinazas poseen rangos de 1 a 3 %; los bokashi varían de 0,9 a 1,5 %; los compost fluctúan de 1 a 1,5 % y los lombricompost oscilan de 1,5 a 2,5 % (SOTO Y MELÉNDEZ 2004, p. 23).

CUADRO 19
NIVELES DE CARBONO Y NITRÓGENO EN ABONOS, SEGÚN MATERIAL

ALTOS EN NITRÓGENO 1/1-24/1		C Y N EQUILIBRADOS 25/1-40/1		ALTOS EN CARBONO 41/1-1000/1	
Purines	5/1	Estiércol de vaca.	25/1	Bagazo de caña de azúcar.	104/1
Gallinaza	7/1	Hoja de frijol.	27/1	Hojas de árbol.	47/1
Estiércol de porcino	10/1	Crotalaria	27/1	Paja de caña de azúcar.	49/1
Desperdicios de cocina	14/1	Pulpa de café.	29/1	Cascarilla de arroz.	66/1
<i>Lupinus costarricensis</i>	18/1	Estiércol caprino.	32/1	Hierba seca de gramíneas.	81/1
<i>Pisum sativum</i>	3-4/1	Hojas de plátano.	32/1	Paja de maíz.	312/1
		Residuos de hortalizas.	37/1	Aserrín	638/1

FUENTE: *Manual del compostaje. Experiencias en América Latina*, de Pilar Román, María M. Martínez y Alberto Pantoja (2013 p. 53).

La calidad de los abonos, además, se mide por aspectos de madurez, la cual puede ser determinada por las tasas de respiración de los microorganismos del producto final, donde se indica que el material se halla estable si la actividad microbiana y las tasas de respiración son menores de 2 mg CO₂/GsVt. También la madurez del abono se averigua con base en la relación C/N: se considera un abono maduro cuando alcanza los valores menores de 20/1-25/1.

Las pruebas de fitotoxicidad son útiles, ya que pueden identificar, previamente, problemas por presentarse. Estas se basan en pruebas de germinación, las cuales consisten en colocar una capa de compost en platos y plantar ahí las semillas para establecer el porcentaje de germinación. Ese se compara con un control ya determinado y evaluado. Los porcentajes de germinación varían según el país; en Canadá, por ejemplo, el porcentaje mínimo es 70 %.

Es preciso evaluar con anterioridad materiales secos que podrían estar contaminados, como las granzas de arroz y las gallinazas, con plaguicidas o antibióticos. Independientemente del tipo de material orgánico que se utilizará, lo principal es hacer las evaluaciones indicadas para determinar su calidad, entre ellas se destacan las siguientes:



- Relación C/N
- Análisis químico completo
- Presencia de metales pesados

D. BIOESTIMULANTES Y BIOCONTROLADORES

En el suelo hay un amplio desarrollo de interrelaciones con especies de microorganismos, las cuales proveen al sistema vínculos complejos que ayudan a modular las funciones entre los factores bióticos y los ambientales.

Las relaciones sinérgicas, antagónicas y neutrales de los microorganismos proveen al suelo una capacidad holística de enfrentar una serie de elementos y ofrecen desde nutrientes hasta control de plagas y de enfermedades, especialmente en el desarrollo de especies vegetales.

Las implicaciones ambientales generadas por la forma de cultivo tradicional han sido catastróficas en el ámbito biológico. Las necesidades actuales de manejar sistemas de producción más limpios han apostado a la búsqueda de soluciones integrales, sobre todo, en relación con el manejo de plagas y de enfermedades a nivel agropecuario. Así surge el uso de biocontroladores y de bioestimulantes, como una alternativa promisoria en el control de patógenos y la descomposición acelerada de materiales orgánicos.

Los insumos para el control biológico (CB) son biocontroladores que funcionan como inoculantes microbianos o grupos de microorganismos, los cuales mejoran la disponibilidad de nutrientes o facilitan el combate de enfermedades y de plagas cuando se aplican a los cultivos, ya que funcionan como enemigos naturales de las plagas. Existe otro tipo de insumos biológicos que se utilizan como inoculantes, que favorecen, de una forma u otra, las relaciones simbióticas entre grupos que descomponen sustratos orgánicos y mejoran la disponibilidad de nutrientes.

En el CB participan los llamados enemigos naturales, como parásitos, predadores y microorganismos, capaces de responder rápidamente a la dinámica población de una plaga.

Entre los tipos de hongos que participan del control biológico se hallan los **entomopatógenos**, los cuales pueden eliminar las plagas o mantenerlas en niveles que no ocasionen daños económicos



CONCEPTO

entomopatógenos.
Hongos que parasitan diferentes órdenes de insectos. Como ejemplo, *Beauveria bassiana* es un hongo que ha sido utilizado como controlador biológico para combatir distintas plagas, como la gallina ciega (*Phyllophaga* sp).



en los cultivos. Estos hongos se encuentran en rastrojos de cultivos, estiércol, suelo y plantas. Se conocen 700 especies de hongos que son controladores biológicos.

También hay hongos antagonistas; entre ellos se destaca *Trichoderma* spp. que ha sido ampliamente estudiado para control de hongos de suelo, como *Rhizoctonia solani* (FIG. 52).



FIGURA 52. HONGOS ANTAGONISTAS. En la imagen se observan hifas de *Trichoderma* (T) que atacan a las de *Rhizoctonia* (R).

FUENTE: «Parasitism of *Rhizoctonia solani* by strains of *Trichoderma harzianum*», de Itamar Soares de Melo y Jane L. Faull (2000). Reproducida con fines educativos.



ATENCIÓN

Los hongos, como las micorrizas, se presentan en aproximadamente 90 % de las plantas, por lo que se ubican en todos los ecosistemas del mundo. Sin embargo, son dañados por las aplicaciones de fungicidas. Su contribución no solo radica en la solubilización de nutrientes, sino que son imprescindibles para que las plantas puedan responder eficazmente a las condiciones de estrés ambiental (CAMARGO, MONTAÑO, DE LA ROSA Y MONTAÑO, 2012).

El género *Trichoderma* es un habitante natural del suelo, caracterizado por un comportamiento saprófito y parásito, propiedades que benefician su actividad antagónica. Es considerado un colonizador secundario por su frecuente aislamiento en la superficie de raíces de varias plantas de madera y como parásito de estructuras de diferentes hongos patógenos, a causa de la competencia por nutrientes y del microparasitismo (MARTÍNEZ, 2013).

Las especies de *Trichoderma* son muy abundantes en los suelos y su habilidad para degradar varios sustratos orgánicos, junto con su versatilidad metabólica y su resistencia a inhibidores microbianos, hacen de este hongo un controlador biológico con capacidad para sobrevivir en varios nichos ecológicos, de acuerdo con las condiciones que prevalezcan sobre las especies involucradas (TOVAR, 2008).

Recientemente, se ha trabajado con especies de hongos de control biológico que han tenido buen resultado en el combate de enfermeda-



des. Tal es el caso de *Clonostachys rosea*, conocida mundialmente por sus características como agente de control biológico contra patógenos como *B. cinerea*, *Alternaria* spp., *Fusarium culmorum*, *F. oxysporum*, *F. solani*, *Pythium* spp., *Phytophthora* spp., *Rhizoctonia solani*, *Sclerotinia sclerotiorum*, entre otros, en al menos quince hospederos de relevancia económica y en diferentes hábitats (ZALDÚA Y SANFUENTES, 2010).

Los efectos de la simbiosis micorrizal consisten en el aumento de enraizamiento y el establecimiento de las plantas, el incremento en la toma de iones de baja movilidad y el ciclaje de nutrientes, el aumento en la tolerancia de la planta ante estrés biótico y abiótico, y el mejoramiento en la calidad de la estructura del suelo, así como de sus propiedades en general (FIG. 53).

En las endomicorizas el micelio invade la raíz, inicialmente es intercelular; pero luego penetra en el interior de las células radicales, desde la rizodermis hasta las células corticales.

Otro ejemplo de control biológico es el caso de los nematodos, conocidos en la agricultura como fitoparásitos. Tienen múltiples antagonistas que podrían funcionar para su control; entre estos, hongos, bacterias, virus, plantas, protozoarios, ácaros e, incluso, otros nematodos (JANSSON Y LÓPEZ-LLORCA, 2001).

Los hongos nematófagos son microorganismos con capacidad de atacar, matar y digerir nematodos en diferentes estadios (huevos, juveniles y adultos), como *Arthrobotrys oligospora*.

Asimismo, hay bacterias valiosas para ejercer control sobre insectos, estas son: *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus Sphaericus* y *Bacillus popilliae*; también existe un grupo de bacterias de *Pseudomonas fluorescens* y las del género *Bacillus* son consideradas las más eficaces para controlar enfermedades foliares y de las raíces. Con efecto biofuncigicida, se pueden usar especies como *Bacillus subtilis*, *Trichoderma* spp y cepas como *Streptomyces* y *Clonostachys*.

ATENCIÓN

En los sistemas de producción agrícola se recomienda utilizar cepas nativas para el combate de enfermedades fitopatológicas. Para ello, es necesario aislar las bacterias o hongos biocontroladores nativos del suelo de su propia finca o de áreas anexas (zonas boscosas) para su reproducción en laboratorio y posterior utilización en el campo.

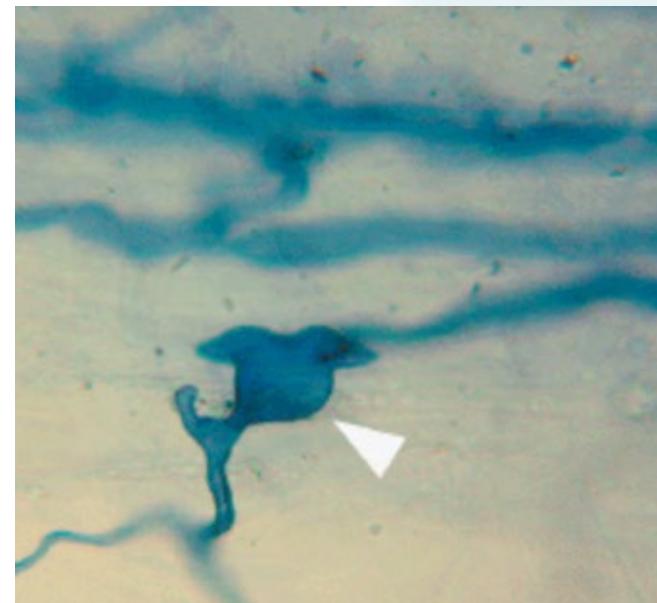


FIGURA 53. MICORRIZAS EN LAS RAÍCES DE LA PLANTA. Al realizar el hongo la asociación con la planta, la micorriza puede invadir tanto externa (exodérmica) como internamente (endodérmica) la planta. En el caso de la imagen se puede apreciar la forma de una micorriza endodérmica arbuscular en que el apresorio está en el punto de entrada (punta de flecha) de la superficie de la raíz de *Gillespiea gramínea*.

FUENTE: «Mycotrophy in Gillespieae, a threatened and poorly known tribe of Alliaceae from central Chile», de Gustavo A. Torres-Mellado, Inelia Escobar, Götz Palfner y M. Angélica Casanova-Katny (2012 p. 183). Reproducida con fines educativos.

**CONCEPTO**

apresorio. Célula especializada de estructura adhesiva, típica de muchos hongos patógenos de plantas, que se forma a partir de una hifa afilada que es la encargada de romper a las células de las raíces (epidérmicas) para penetrar y realizar el proceso infeccioso.

**EN LA RED...****FABRICAR MICROORGANISMOS**

Los microorganismos de montaña son caldos preparados artesanalmente que ayudan a la descomposición de material vegetal en fincas.

Si desea aprender a fabricarlos, se recomienda acceder a la siguiente dirección electrónica: <<http://drco-mag.yolasite.com/resources/Aplicacion%20de%20Microorganismos%20de%20Monta%C3%B1a%20en%20agricultura%20CR%202014%20por%20RTencio.pdf>> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.



Otros insumos biológicos son los biodescomponedores, los cuales emplean cultivos mixtos de microorganismos para acelerar los procesos de descomposición de residuos en forma natural o durante la elaboración de abonos (compost y bokashi, entre otros).

En estos compuestos biodescomponedores se utilizan bacterias ácido-lácticas, como *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Streptococcus lactis*, y levaduras que se encargan de degradar proteínas complejas y carbohidratos, como *Saccharomyces cerevisiae* y *Candida utilis*.

Igualmente, existen los biofertilizantes que son insumos a base de un tipo de microorganismo o grupos de microorganismos, los cuales proveen o mejoran la disponibilidad de nutrientes cuando se aplican a los cultivos, mediante su inoculación.

Un ejemplo de biofertilizantes es el uso de bacterias de vida libre que ayudan a los procesos de fijación biológica de nitrógeno, como *Azotobacter* o *Azospirillum*, que también pueden promover el crecimiento. De la misma forma, es posible aplicar microorganismos como bacterias simbióticas (bacterias que hacen relación con la planta); este es el caso de *Rhizobium* en las leguminosas. Así se hace normalmente en cultivos de soya, ya que promueven la fijación biológica de nitrógeno y, por ende, el desarrollo de biomasa.

Otro ejemplo sobre los biofertilizantes son los microorganismos que aumentan el área de captación y de absorción de nutrientes, principalmente fósforo, a través de las raíces, como los siguientes: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*, *Agrobacterium*, *Burkholderia*, *Achromobacter*, *Micrococcus*, *Aerobacter* y *Flavobacterium* o, en el caso de ácido nítrico, las *Nitrobacter* (FERNÁNDEZ, ZALBA Y GÓMEZ, 2005).

Los bioestimulantes son organismos que participan en la promoción de la germinación de las semillas y del enraizamiento; por ejemplo, los hongos micorrizales y las bacterias como *Bacillus*.

RESUMEN

Los suelos se caracterizan físicamente por su textura, estructura, densidad, porosidad y agua contenida. Estas propiedades se interrelacionan, especialmente, por su clase textural, la cual es definida por la granulometría del suelo en la que participan los minerales con partí-



culas menores de 2 mm de diámetro: arenas, limos y arcillas. Según la clase textural en conjunto con la estructura, las tres características restantes –la densidad del suelo, la porosidad y el contenido de agua– son variables y están íntimamente ligadas al manejo del suelo.

La textura del suelo es el único rasgo que no se altera con el manejo; pero su composición depende de los factores formadores del suelo. La densidad y la porosidad del suelo se relacionan con el movimiento y la retención del agua. El movimiento del agua en suelo se estudia mediante la conductividad hidráulica.

El agua en el suelo se encuentra en cuatro formas: 1) gravitacional, 2) higroscópica, 3) capilar y 4) retenida por los minerales a diferentes capacidades (según la presión atmosférica y la cantidad de agua); entre estas últimas, capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Además, el agua en el suelo se pierde por diferentes formas, como evaporación, infiltración y escorrentía.

La humedad del suelo se puede establecer por medio de dos métodos: 1) el gravimétrico, que se refiere a la razón de suelo húmedo y suelo seco; y 2) el volumétrico, el cual atañe a la relación del contenido del agua con respecto a la densidad.

Desde la perspectiva agrícola, existen 16 elementos esenciales divididos en macroelementos y microelementos. La mayoría de ambos, según su naturaleza, se puede encontrar en la solución del suelo; pero su biodisponibilidad está condicionada a factores químicos, como la composición del material parental, las relaciones catiónicas y el pH.

El pH y el análisis de los macroelementos y microelementos del suelo permiten estimar sus propiedades químicas y su fertilidad, las cuales están condicionadas al manejo del suelo junto con las propiedades físicas y biológicas de este.

El pH es un indicador de la acidez del suelo, sin embargo, esta se determina a través de la medición del aluminio para poder estimar correcciones de pH.

La capacidad de intercambio catiónico y la de aniónico son indicadores de fertilidad. Sus valores son más altos en las arcillas y en la materia orgánica del suelo gracias al aumento de la superficie específica, ya que con este se hacen mayores los espacios de intercambio catiónico o aniónico.





La materia orgánica del suelo es la sustancia descompuesta de residuos animales y vegetales, se forma por cadenas de polímeros de carbonos que tienen elementos y alta actividad microbiana. Se le conoce como la «vida en el suelo». Durante el proceso de mineralización, se liberan complejos organominerales que son aprovechados por las plantas y los organismos de la rizósfera.

La materia orgánica regula muchos procesos biológicos; además de la humedad en el suelo, favorece el estado de agregación de este y, por ende, su estructura. Mejora el drenaje y el movimiento del agua en el suelo. Dicha materia se puede incorporar al suelo mediante el uso de abonos orgánicos, como compost, bokashi o biofermentos.

Las propiedades biológicas del suelo destacan puesto que gracias a los microorganismos se llevan a cabo procesos biogeoquímicos que devienen en mayor fertilidad, biomasa y vida.

Generalmente, para determinar la dinámica microbiana de los suelos, se tasan los hongos, los actinomicetos y las bacterias. Gran parte de estos microorganismos ofrecen múltiples beneficios a la planta, como la estimulación al enraizamiento y el suministro de nutrientes; además, mejoran la estructura del suelo y, por ende, sus propiedades físicas, como el movimiento de agua, la aireación, la densidad y la permeabilidad.

Los factores biológicos se han convertido en criterios sólidos para determinar la calidad de los suelos. Por lo tanto, su análisis es parte del paquete tecnológico que se debe adoptar en suelos agrícolas, forestales o en áreas de recuperación.

La degradación y la contaminación de los suelos suceden cuando alguna de las propiedades originarias de los suelos se ve abatida. La calidad del suelo se evalúa desde las perspectivas física, química y biológica; se busca proteger de forma sostenida las funciones del suelo en el tiempo. Los atributos biológicos son los primordiales de evaluar, por ser los más susceptibles a cambios.



EJERCICIOS DE AUTOEVALUACIÓN

I. **ESTUDIO DE CASO.** *Lea con atención el enunciado y resuelva lo que se le solicita.*

En una finca dedicada a la producción de tubérculos en la zona de San Carlos, se realizó un análisis de suelos y se obtuvieron los siguientes resultados:

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
pH		4,3
Calcio	cmol (+) / L	4
Magnesio	cmol (+) / L	2,5
Potasio	cmol (+) / L	0,4
Fósforo	mg/L o ppm	0,7
Acidez ínter.		1,2
Carbono	cmol (+) / L	1,2
Nitrógeno	cmol (+) / L	8
Textura		Franco arenosa
Pendiente	%	1
Densidad	g/cm ³	0,89

Luego de conocer los resultados del caso propuesto realice las siguientes actividades:

- Con base en los resultados del análisis de suelos, calcule: i) la CICe, ii) la saturación de acidez y iii) la saturación de bases.
- Con base en la textura, defina las propiedades físicas destacadas de este suelo.
- Estime la masa de suelo de una hectárea, con la densidad descrita y con la toma de muestra a 10 cm de profundidad.
- Calcule el contenido de materia orgánica del suelo en porcentajes (%) y la relación carbono nitrógeno C/N.

II. **ANALICE Y COMENTE.** *Explique el siguiente resultado microbiológico de suelos.*

Hongos	Mayor a 10 ³ UFC/g	<i>Rhizopus</i> sp., <i>Lecanicillium</i> sp., <i>Penicillium</i> sp., <i>Aspergillus</i> sp., <i>Phoma</i> sp. y <i>Trichoderma</i> sp.
--------	-------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



RESPUESTA A LOS EJERCICIOS DE AUTOEVALUACIÓN

I. ESTUDIO DE CASO

- A. Con base en los resultados del análisis de suelos, i) CICe: 8,1 cmol(+)/L, ii) saturación de acidez: 14,8 % y iii) saturación de bases: 85,2 %.
- B. Las texturas franco-arenosas tienen una movilidad del agua muy rápida en el suelo, son poco permeables y las densidades son medias, la porosidad es media-baja. Son poco susceptibles a compactarse y tienden a ser más fáciles de erosionarse.
- C. La masa del suelo es 890 000 kg/ha.
- D. 13,79 % MOS y 26,6 C/N.

II. ANALICE Y COMENTE

El resultado muestra valores normales de los contenidos de hongos; sin embargo, la mayoría de estos son patógenos en áreas agrícolas.

Hay presencia de *Trichoderma* sp. la cual puede ser un controlador biológico.



CAPÍTULO TERCERO

CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

SUMARIO

- Historia de la clasificación de suelos
- Base referencial mundial para recursos del suelo, sistema WRB
- Taxonomía de suelos, sistema USDA
- Suelos de América Latina
- Caracterización edáfica de Costa Rica

SINOPSIS

La clasificación de suelos siempre ha sido una necesidad imperante para los investigadores y con el avance de la tecnología, en especial los aportes de los sistemas de información geográfica, los productos de estos estudios favorecen la toma de decisiones en relación a uso, manejo, conservación y restauración de suelos a nivel mundial.

Existen diversos sistemas de clasificación de suelos con distintas propuestas y esquemas de clasificación, que tienen como fin último armonizar y correlacionar criterios para diversos objetivos como lo son los inventarios de suelos y el análisis de distribución geográfica. Finalmente, este conocimiento, a nivel regional o a escala mundial, se traduce en una mejor comprensión del recurso para contribuir a su conservación y a su manejo adecuado.



OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

OBJETIVO GENERAL

Determinar las relaciones entre los factores que influyen en la categoría y clasificación de los suelos tropicales, mediante metodologías internacionales como la Taxonomía de suelos, sistema USDA y la Base Referencial Mundial para recursos del suelo, sistema WRB.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Al finalizar el estudio del presente capítulo, el educando estará en capacidad de:

1. Explicar la clasificación del suelo según las características físicas y químicas que presenta.
2. Reconocer los sistemas de clasificación de los suelos más utilizados como la Taxonomía de suelos del Ministerio de Agricultura de los Estados Unidos, sistema USDA y la Base referencial mundial para recursos del suelo, sistema WRB.
3. Diferenciar los sistemas de clasificación que se describen.
4. Describir los tipos de suelo más importantes en el trópico, en orden y suborden.

CONCEPTOS CLAVE

- **sistemas de clasificación de suelos**
- **Base referencial mundial para recursos del suelo**
- **Sistema WRB**
- **Taxonomía de suelos del Ministerio de Agricultura de los Estados Unidos**
- **Sistema USDA**
- **órdenes de suelo**





INTRODUCCIÓN

En el mundo, los suelos presentan una amplia diferencia entre sus características físicas, químicas y biológicas por las interacciones de los factores y procesos formadores del suelo. A pesar de que no existen patrones muy definidos de los tipos de suelo se ha trabajado en la búsqueda de un sistema de clasificación de los suelos, para agrupar y determinar generalidades de estos, con el objetivo de lograr un mejor entendimiento a nivel global del recurso edáfico del planeta y poder dictar estrategias y políticas de manejo y conservación.

Hasta hace 20 años no se había establecido un sistema de ordenamiento con aceptación universal, ante la falta de un consenso por parte de los investigadores. Este fue uno de los problemas más serios en el campo de la edafología, el cual, incluso hoy, se discute. Entre los sistemas de clasificación más comunes y utilizados a escala mundial se encuentran los desarrollados por el Ministerio de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) y por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), conocidos, respectivamente, como la Taxonomía de suelos, sistema USDA y la Base referencial mundial para recursos del suelo, sistema WRB (World Reference Base, por sus siglas en inglés).

En términos generales, los países han adoptado distintas metodologías de clasificación de los suelos y según las escuelas científicas que los influyeron a lo largo de la historia en estudios del suelo. En el caso de América Latina, fueron las anglosajonas, por lo que se ha utilizado comúnmente la taxonomía de suelos, sistema USDA; sin embargo, la FAO, por medio de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (ISSS, por sus siglas en inglés), ha promovido el uso del sistema WRB como estándar internacional para las clasificaciones del suelo, aunque este sistema de clasificación ha sido más adoptado en la zona europea.

La aparición de los modernos sistemas de clasificación de suelos ha permitido realizar trabajos de relevancia científica como la implementación de bases de datos en la tipificación de suelos. Este nuevo agrupamiento en conjunto con las facilidades tecnológicas de



CONCEPTOS

Sistema USDA. Taxonomía de suelos del Ministerio de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés: United States Department of Agriculture) es una clasificación de suelos en función de varios parámetros y propiedades que se desarrolla en niveles: orden, suborden, gran grupo, subgrupo, familia y serie.

Sistema WRB. Base referencial mundial para recursos del suelo (WRB, por sus siglas en inglés: World Reference Base for Soil Resources), desarrollada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés: Food and Agriculture Organization of the United Nations). La clasificación se basa primariamente en la morfología del suelo como una expresión de la evolución o formación del suelo.

**CONCEPTO****georreferenciación.**

Referido al proceso de otorgar una ubicación espacial por medio de coordenadas bien definidas de un punto en un terreno. Normalmente cuando se realiza un punto de recolección de muestras o se abre una calicata, o bien se realiza la georreferenciación del área, se toma un punto con un GPS en el lugar de estudio.

**ATENCIÓN**

Para los edafólogos, la clasificación de tipos de suelo se refiere a la agrupación de los suelos según propiedades químicas, físicas y biológicas equivalentes. El objetivo es organizar los datos, interpretar las clases de suelos y poder comunicar de forma más simple y ordenada la información recolectada.

*los sistemas de información geográfica (SIG), proporcionaron a los países fundamentos sólidos para la creación de mapas de ordenamiento y planificación territorial basados en las particularidades de perfil de suelos **georreferenciados** y, de esta manera, poder estimar la capacidad de uso de la tierra, como el caso de Costa Rica.*

Además de la aplicabilidad de clasificación del uso de la tierra, los sistemas de producción de agricultura de precisión requieren estudios muy finos de ordenamiento de suelos para uso de agua, drenaje y manejo de suelos en general.

Por estas razones, la adopción de un sistema de clasificación de suelos global permitirá desarrollar políticas y estrategias para contrarrestar las necesidades de conservación del recurso, además de contribuir a la comprensión de la ciencia del suelo para la comunidad científica y el público en general.

I. *Historia de la clasificación de suelos*

Las primeras clasificaciones del suelo en el mundo se realizaron en el imperio chino hace 4000 años y se fundamentaron en aspectos físicos del suelo como el color y la estructura. El imperio romano también desarrolló su propio sistema de ordenamiento de suelos basado en la adaptación de especies hortícolas y arbóreas en distintos paisajes. Un aporte relevante lo hizo el romano Lucio Junio Moderato (4 A.E.C-40-70 D.E.C.), citado por Ginés Navarro García y Simón Navarro García (2013), que consistió en una incipiente clasificación de suelos de acuerdo con la humedad del suelo y con su riqueza primitiva.

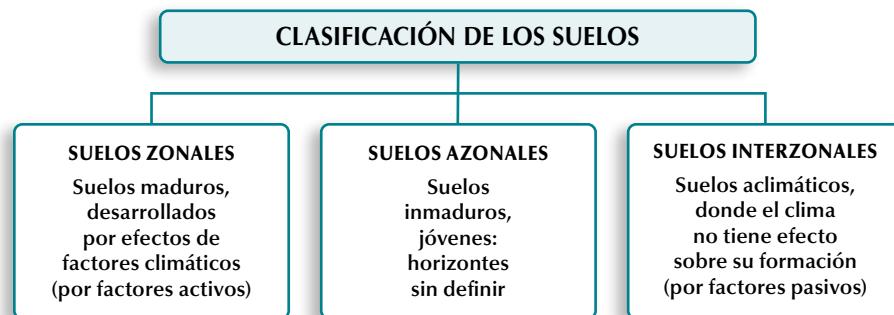
A raíz del establecimiento de una agricultura más estable en los imperios, los estudiosos de la época iniciaron la clasificación de los suelos sustentados en propiedades físicas del suelo combinadas con el comportamiento del cultivo, la vegetación o el clima.

Sin embargo, con la publicación de las investigaciones de Vassili V. Dokucháyev, en 1883, se dio el inicio del trabajo de agrupación de los suelos de manera sistemática y ordenada y se formuló su clasificación moderna, basada en zonas climáticas.

A finales del siglo XIX, en 1883, Nikolai M. Sibirtsev (1860-1900) discípulo de Dokucháyev, publicó los trabajos de su mentor y en estos se definieron las tres zonas climáticas en las que se clasificarían los sue-



los: azonales, intrazonales y zonales. Los suelos azonales se encuentran en sus primeras etapas de desarrollo o sea suelos inmaduros. Los intrazonales consisten en los suelos que se han desarrollado bajo escenarios donde los **factores formadores** son pasivos (proceso a largo plazo poco intenso y por efecto de climas extremos). Y por último los zonales corresponden a los suelos que se desarrollaron bajo la acción de los factores activos (proceso intenso y horizontes muy desarrollados). Para entender mejor las diferencias entre los tres conceptos, se presenta la Figura 54 en la que se resume la información descrita.



Además de las obras de Sibirtsev, en 1894 publicó los conocimientos de clasificación de suelos derivados de Dokucháyev (1846-1903), que se difunden gracias a las traducciones de investigadores, entre ellos, Konstantin D. Glinka (1867-1927) y Curtis F. Marbut (1863-1935). Para América Latina, la sistematización de la clasificación de suelo evolucionó gracias a los aportes, en 1890, de los norteamericanos Eugene W. Hilgard (1833-1916) y Robert H. Loughridge (1843-1917), quienes iniciaron las clasificaciones con base en la textura del suelo.

Sin embargo, las influencias de los estudios de Dokucháyev a través de las traducciones de Marbut contribuyen a que Mark Baldwin, Charles E. Kellogg y James Thorp, en 1938, jerarquicen el sistema de clasificación del suelo y generen uno nuevo, basado en los criterios de zonalidad climática, el cual tuvo vigor hasta 1960.

Otros científicos, como Hans Jenny (1899-1992), también publicaron sus conocimientos, en 1941, en especial sobre el grado de afectación de los cinco factores formadores de suelos en la diferenciación de suelos y por ende de la clasificación de estos y, por ende, en su clasificación (BUOL, SOUTHARD, GRAHAN Y McDANIEL, 2003).

El sistema de clasificación actual, nació en 1975 fundamentado en los trabajos de los científicos del Servicio de Conservación

CONCEPTO

factores formadores del suelo. Clima, el tiempo, el material parental, los microorganismos, el relieve y el ser humano.

FIGURA 54. CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN DOKUCHÁYEV. Dokucháyev realizó una clasificación de suelos según su estado de madurez y relación con el clima: Suelos zonales, azonales e interzonales. Los zonales son aquellos que por factores climáticos intensos y activos formaron suelos más maduros. Los azonales son suelos poco desarrollados y los interzonales son suelos que se desarrollaron por factores pasivos; es decir, por los otros factores distintos al clima; por ejemplo tiempo, relieve, organismos o material parental.

FUENTE: adaptada de *Edafología del Trópico*, de Wagner Peña Cordero (2017) y *Fundamentos de edafología*, de Jorge Núñez Solís (1985).

**CONCEPTO**

Seventh Approximation (Séptima aproximación). Nombre de uno de los primeros sistemas de clasificación de suelos en Estados Unidos de Norteamérica, seguido del de Curtis F. Marbut (1863-1935). Fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de ese país y se implementó en 1960. En este, la morfología y la agrupación de las clases se basan en las relaciones genéticas (FAO, 2020).

**EN LA RED...**

Si desea conocer más respecto del sistema *Seventh Approximation* (Séptima Aproximación), incursione en la Red, accediendo la siguiente dirección: <http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053109.pdf> o dé lectura al primer código QR, bajo estas líneas.

Además, para acceder a los Decretos Ejecutivos puede recurrir a la página del Sistema Costarricense de Información Jurídica: <http://www.pgrweb.go.cr/scij/avanzada_pgr.aspx> o dé lectura al segundo código QR, bajo estas líneas. Luego, digitar, en el buscador, el número de ley o decreto ejecutivo que desea examinar.



del Suelos de los Estados Unidos (*Soil Survey Staff*), quienes elaboraron la Taxonomía de suelos (*Soil Taxonomy*), Sistema USDA, a partir de características cuantitativas y cualitativas escogidas para el análisis de los horizontes de diagnóstico del suelo (USDA-SSS, 2014).

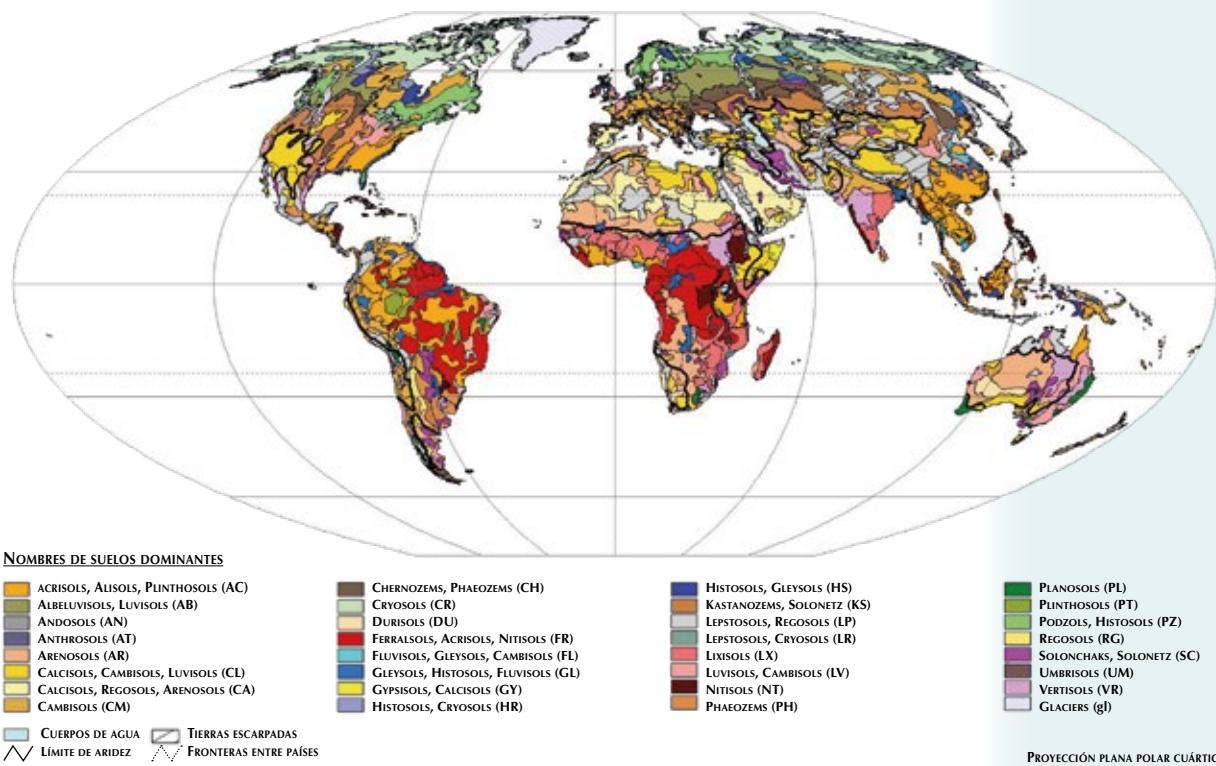
En la actualidad, en América Latina, el sistema de clasificación de USDA está ampliamente difundido, aunque hay otras clasificaciones nacionales o regionales que se han desarrollado paralelamente, como el caso de Brasil donde se introdujo su propio sistema de clasificación de suelos en 1964, con información sesgada del sistema de USDA. Cuba, por su parte, formó su sistema distintivo gracias al aporte generado en las numerosas visitas de investigadores extranjeros de todo el mundo. Esta situación se repite en Uruguay, país que creó su sistema particular.

En el caso de Costa Rica, desde la *Seventh Approximation* de 1960, clasificación antecesora de la USDA, se comenzó a utilizar ese sistema. Anteriormente, los Decretos Ejecutivos N° 2050 (1991) y N° 23214-MAG-MIRENEM (1995) desarrollaron la metodología de clasificación USDA para la determinación de la capacidad de uso de la tierra de Costa Rica, así como también lo hizo Canadá. Actualmente rige el Decreto Ejecutivo N° 41960, la cual actualiza la metodología y demás delimita el concepto de tierras a uso agroecológico.

Posteriormente, un grupo de investigadores de la Unión Internacional de las Ciencias del Suelo (IUSS, por sus siglas en inglés) estableció una nueva base de información sobre clasificación de suelos, fundamentada en los trabajos de la leyenda de mapas de los suelos del mundo de FAO/UNESCO (FIG. 55), de la taxonomía de suelos, sistema USDA, entre otros. Esta clasificación se reconoce como la Base Referencial Mundial, sistema WRB; donde su primera versión se presentó en 1988 (FAO, 2017). Actualmente se usa como un estándar internacional.

II. **Base referencial mundial para recursos del suelo, Sistema WRB**

La IUSS con su grupo de trabajo y la WRB desarrollaron varios principios generales y, a partir de estos, durante 1980 y 1981, definieron el sistema de clasificación WRB (*World Reference Base*) (IUSS-WRB, 2007, p. 4). A continuación, se citan dichos fundamentos:



PROYECCIÓN PLANA POLAR CÚARTICA
© FAO/ECA/ISRIC, 2003

- El sistema comprende dos niveles de detalle categórico: Nivel 1: están los 32 grupos de suelo de referencia (GSR). Nivel 2: se acomodan los calificadores grupo I y grupo II que acompañan a cada GSR y que detallan las propiedades del calificador.
- La clasificación de suelos se basa en propiedades del suelo definidas en horizontes, propiedades y materiales de diagnóstico (procesos de formación de suelos) y deben ser medibles y observables en el campo.
- Se basa en la leyenda revisada de un mapa de suelos del mundo FAO-UNESCO, realizado en 1988.
- El clima (humedad y temperatura) no se toma en cuenta como parámetro de clasificación.
- La WRB es un sistema de clasificación que les permite a los investigadores readecuar el sistema de clasificaciones locales nacionales a la clasificación del sistema WRB, el cual funciona como un enlace entre ellos para correlacionar y comparar en mejor forma.
- Es conocida como herramienta de comunicación para la recopilación de bases de datos, inventarios, monitoreo de suelos en el mundo (FAO, 2016, p. 5).

FIGURA 55. MAPA DE SUELOS DOMINANTES DE FAO/UNESCO. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) ha trabajado arduamente en la clasificación de los suelos como cumplimiento a la recomendación de la Sociedad Internacional de Ciencias del Suelo y cuyo objetivo principal es contribuir con información a los países para la planificación de proyectos de desarrollo agropecuario y económico. Existe aproximadamente un total de 32 grupos de suelos en el mundo, lo que demuestra la gran diversidad y heterogeneidad que hay alrededor del planeta; de esta forma, se facilita el desarrollo de diferentes actividades agrícolas según la zona geográfica.

FUENTE: *Opening Soil Data through Semantics and Linked data Vocabularies*, de Giovanni L'Abate, Caterina Caracciolo, Ferdinando Villa, Edoardo A.C. Constantini, en GARR2016, Florencia, Italia. Reproducido con fines educativos, cortesía de FAO/EC/ISRIC.



CUADRO 20
CLASIFICACIÓN DE SUELO SEGÚN SISTEMA WRB Y DESCRIPCIÓN GENERAL

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN GENERAL
Histosoles	Suelos orgánicos, con > 2 % C orgánico (con horizontes hístico o fólico).
Antrosoles	Suelos con fuerte influencia antrópica.
	Suelos agrícolas con intenso y prolongado uso.
Tecnosoles	Suelos con significativa cantidad de artefactos.
Criosoles	Suelos con limitación severa para el enraizamiento. Suelos congelados (permafrost), con horizonte crílico.
Leptsoles	Suelos delgados (con roca dura continua a ≤ 25 cm) o muy pedregosos (admiten mólico, úmbrico, yérmico o vértico).
Vertisoles	Suelos que están o han estado influidos por agua. Suelos con horizonte vértico, ricos en arcillas expansibles, con grietas que estacionalmente se abren y cierran periódicamente.
Solonez	Suelos con alta concentración de sodio cambiante (horizonte nátrico) en los 100 cm superficiales.
Solochaks	Suelos con alta concentración de sales solubles (horizonte sálico).
Gleysoles	Suelos hidromorfos, con propiedades gleicas someras (< 50 cm).
Andosoles	Suelos volcánicos, con horizonte vítrico o ándico con límite superior dentro de los 25 cm superficiales. Admiten hístico, fúlvico, melánico, mólico, úmbrico, óchríco, dúrico o cámbico.
Podzoles	Interacciones entre el hierro y el aluminio importantes en material parental de formación. Suelos con acumulación subsuperficial de humus u óxidos (horizonte espódico dentro de 200 cm).
Plintosoles	Suelos con acumulación y redistribución de hierro (plíntico o petroplíntico), propios del trópico húmedo.
Nitisoles	Otros suelos con arcillas poco activas, fijación de P, óxidos de Fe, fuertemente estructurado (horizonte nítico), de regiones (sub)tropicales.
Ferrsoles	Suelos con caolinita y óxidos (horizonte ferrálico), propios del trópico húmedo.
Plantosoles	Suelos con hidromorfía parcial o completas (ausencia oxígeno). Suelos encharcados (propiedades estagnicas) con horizonte álbico acompañado de cambio textural abrupto, pero sin propiedades albelúvicas en los 100 cm superficiales.
Stagnosoles	Suelos encharcados (propiedades estagnicas, estructurados o moderado cambio textural).
Cherrnozem	Suelos tipos de zonas esteparias, praderas con horizontes ricos en humus. Suelos con horizonte mólico muy oscuro, chérnico (Ch ≤ 2 en h) y carbonatos secundarios.
Kastanozem	Suelos con horizonte mólico típico (Value < 3,5 en húmedo y < 5,5 en seco y Chroma < 3,5 en húmedo) y carbonatos secundarios.
Phaeosems	Suelos con mólico sobre material libre de carbonatos en 100 cm, aunque con saturación de bases, V ≥ 50 %.
Glisoles	Suelos de zonas áridas con presencias de yesos, calcios sílices
Durisoles	Con acumulación de sílice secundaria (horizontes dúrico o petrodúrico) dentro de los 100 cm superficiales
Calcioles	Suelos con horizonte cárlico (o petrocárlico) dentro de los 100 cm superficiales). Admite un horizonte cámbico o vértico, o bien un árgico carbonadado, o un gipsico sobre petrocárlico.
Albeluvisoles	Suelos con horizontes subsuperficiales ricos en arcillas.
Alisoles	Árgico desaturado (V < 50 % en todo el Bt) y propiedades álicas. Admiten óchríco, úmbrico, álbico o vértico. Regiones (sub)tropicales.
Acrisoles	Árgico desaturado (V < 50 %, de 25 a 100 cm). Tropical.
Luvisoles	Árgico saturado de bases (V ≥ 50 % en todo el Bt).
Lixisoles	Árgico saturado en bases (V ≥ 50 % en todo el Bt). Tropical.
Umbrisoles	Suelos jóvenes o relativamente jóvenes, con un desarrollo de perfiles escasos. Suelos con horizonte úmbrico (con V ≥ 50 %).
Arenosoles	Suelos muy débilmente desarrollados por la textura arenosa o arenosa franca y con pedregosidad < 35 % (v/v), ambos caracteres dentro de 100 cm de profundidad.
Cambisoles	Suelos con moderada diferenciación en horizontes (cámbico).
Regosoles	Otros suelos débilmente desarrollados, formados a partir de materiales no consolidados, con perfil A/C.

FUENTE: basado en «Una ojeada a la clasificación del suelo», de Irma Reyes Jaramillo, publicado en la revista *Contactos* (2014, p. 36).



- g) La nomenclatura usada ha sido ampliamente usada y es reconocida por científicos fácilmente con el fin de evitar confusiones (FAO, 2016, p. 5).
- h) Este sistema tiene un común denominador a nivel internacional, no para sustituir los sistemas nacionales de clasificación de suelos (IUSS-WRB, 2007, p. 4).

Para determinar la clasificación de los grupos se utiliza una clave que nace del trabajo de la Leyenda del Mapa de Suelos del Mundo. Esta clave, del sistema WRB, presenta, de forma general y lógica, la sucesión de grupos de suelo de referencia (GSR) (IUSS-WRB, 2007).

En el sistema WRB, por medio de las numeraciones, se van analizando las características generales del suelo y, por descarte, se identifican los GSR en estudio.

De manera clara y general, el Cuadro 20 presenta las derivaciones (GSR) del sistema WRB, confeccionado por Irma Reyes Jaramillo (2014).

El sistema de clasificación WRB ha sido mejorado desde su primera publicación en 1970. La versión más reciente es del 2006: este documento, al presentar datos más precisos, facilita que los países lo adopten. La FAO aspira a que, por medio de la acogida de este sistema de clasificación, se proporcione una base sólida de información, la cual contribuya al manejo y el uso de los suelos en las áreas agrícolas y las zonas de conservación; también a que estudios más rigurosos en temas suelos permitan el entendimiento de sus propiedades, su evolución en el tiempo.

En forma sucinta, la idea general de la implantación del sistema es que la información que salga de cada país sea valorada por los políticos y los tomadores de decisiones, para mejorar la planificación territorial y buscar la conservación de los recursos.

III. Taxonomía de suelos, sistema USDA

La Taxonomía de suelos (*Soil taxonomy*) propuesta por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) fue diseñada para la clasificación de los suelos de desarrollo forestal y agrícola. El sistema USDA se basa en propiedades físicas, químicas y biológicas que puedan ser observables, y medibles, específicamente cuantificarse.



ATENCIÓN

Las clasificaciones realizadas por grupos indígenas también han sido estudiadas y se incorporan en el libro *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe* (GARDI et al., 2014). Los autores indican que varios grupos indígenas latinoamericanos realizaban clasificaciones de acuerdo con su productividad y en la adaptación de los cultivos. Estas etnias conocían sobre la resistencia de los suelos a la erosión eólica e hídrica y múltiples propiedades físicas del suelo. Tan excelente trabajo también recopila reportes de clasificaciones paisajísticas, especialmente en las sociedades con población dedicada a la agricultura, donde establecían las divisiones de áreas geográficas según observaciones relacionadas con suelos y el paisaje. «También hay clasificaciones de uso múltiple como en el caso de suelos para la fabricación de ladrillos o [el claro] potencial de carácter medicinal o artesanal. Estos estudios son rescatados gracias a la disciplina de la etnoedafología o etnopedología» (GARDI et al., 2014, p. 44).



CONCEPTO

etnoedafología / etnopedología.
Disciplina científica que trata de cómo la gente entiende y maneja la tierra. El término fue propuesto por B. Williams y C. A. Ortiz Solorio en 1981 (GARDI et al., 2014, p. 44).



CONCEPTOS

epipedones. Horizontes superficiales o manto superficial. Son horizontes de diagnóstico formados cerca de la superficie. Uno de ellos puede ser el antrópico, el cual muestra indicios de que ha sido alterado por el ser humano.

endopedones. Horizontes subsuperficiales o debajo de la superficie del suelo. Son horizontes de diagnóstico formados debajo de la superficie terrestre; un ejemplo es el hístico, el cual es un horizonte orgánico saturado por más de 30 días.

polipedones. Unidad geográfica característica más pequeña de suelo en un territorio.

La prioridad de dicho sistema es que se logren determinar las características actuales del suelo más que su historia; sin embargo, la herramienta se puede aplicar para distinguir cambios en el tiempo. Se conoce de antemano que las propiedades seleccionadas son resultado de la génesis y la evolución del suelo; pero si se encuentran varias diferencias en este último factor causal, se seleccionan aquellas que tengan mayor relación con el crecimiento de las plantas. En resumen, el objetivo fue construir un sistema de clasificación basado en propiedades que no cambien con facilidad en el tiempo (USDA-SSS, 2014).

En el sistema USDA, las clases taxonómicas se organizan de acuerdo con la propiedad que permita una mejor clasificación. La división se basa en el estudio por horizontes de diagnóstico (**epipedones** y **endopedones**), características morfológicas y propiedades químicas.

Jaume Porta Casanellas, Marta López-Acevedo Reguerín y Carlos Roquero de Laburu (2003) resumen lo que se obtiene al realizar la clasificación bajo el sistema USDA:

- Cataloga según los horizontes diagnósticos, los cuales dictan las características principales del suelo.
- Toma en cuenta los parámetros humedad del suelo y temperatura.
- Establece la diferencia entre suelos minerales y suelos orgánicos.

El estudio y clasificación de los suelos se encuentran estrechamente unidos a la morfología del paisaje y a las aplicaciones concretas. En este contexto, y como se explicó en el Capítulo 1, los análisis se realizan mediante la caracterización de **polipedones**, ya que cada uno de ellos describe, en promedio, las propiedades específicas del suelo que se desea clasificar.

El sistema USDA establece seis categorías taxonómicas, jerarquizadas así: orden, suborden, grandes grupos, subgrupos, familias y series.

El orden es definido por la presencia del horizonte de diagnóstico particular y se divide en los siguientes doce conjuntos: aridisoles, entisoles, gelisoles, histosoles, inceptisoles, molisoles, oxisoles, espodosoles, ultisoles, andisoles, vertisoles y espodosoles.

Cada orden de suelo presenta características particulares, el nombre se construye con base en su elemento formativo (rasgos,



características o propiedades de únicas de un suelo). En el Cuadro 21 se incluye información acerca de este tema.

El orden es definido por la presencia del horizonte de diagnóstico particular y se divide en los siguientes doce conjuntos: alisoles, entisoles, gelisoles, histosoles, inceptisoles, molisoles, oxisoles, espodosoles, ultisoles, andisoles, vertisoles y espodosoles.

Cada orden de suelo presenta características particulares, el nombre se construye con base en su elemento formativo (rasgos, características o propiedades de únicas de un suelo). En el Cuadro 21 se incluye información acerca de este tema.

Para comprender mejor las características de los órdenes recién descritos, Floria Bertsch, Rafael Mata y Carlos Henríquez (1993) propusieron un patrón de evolución del suelo según los órdenes de la USDA. Se señalan que los suelos entisoles son los más nuevos y los suelos oxisoles y ultisoles son los más viejos, por efecto del tiempo y de otros factores: clima, organismos y relieve sobre el material parental (FIG. 56, V. P. 175).

El sistema de clasificación de la USDA parte de la diferenciación entre los suelos minerales y los suelos orgánicos. El Soil Survey Staff de la USDA (2014, p. 3) indica que un suelo es mineral cuando cumple las siguientes condiciones:

CUADRO 21
ÓRDENES DE SUELO SEGÚN USDA, ELEMENTO FORMATIVO, DESCRIPCIÓN Y CARACTÉRISTICA DETERMINANTE

ORDEN DE SUELO	ELEMENTO FORMATIVO	DESCRIPCIÓN	CARACTÉRISTICA DETERMINANTE
Alisoles	alf	<ul style="list-style-type: none">Comunes en zonas semiáridas o húmedas. Derivan de procesos de meteorización, ricos en minerales arcillosos en sus capas superficiales y en el subsuelo.Representan 10% de los suelos del mundo.	<ul style="list-style-type: none">Tienen epipedón plaggen, pero con un grado de meteorización.Horizonte argílico, con una saturación de bases de más de 35%.
Andisoles	and	<ul style="list-style-type: none">Comunes en cordilleras volcánicas.Representan 1% de los suelos del mundo.	<ul style="list-style-type: none">Derivados de cenizas volcánicas, con propiedades ándicas en más de 35 cm de espesor.Deficientes en fósforo, debido a la no disponibilidad de fósforo. Poseen un alto contenido de arcillas de tipo amorfa y no cristalina.
Inceptisoles	ept	<ul style="list-style-type: none">En el mundo cubren aproximadamente 1500 millones de hectáreas. Se consideran con mayor grado pedogenético que los suelos del orden entisol; es decir, son suelos jóvenes.	<ul style="list-style-type: none">Su perfil típico es A-B-C. Su horizonte B es un horizonte de alternación, debido a que no exhibe suficiente evidencia de iluviaión de arcillas.

FUENTE: elaborado con base en *Fundamentos de edafología*, de Jorge Núñez Solís (1985); *Claves para la Taxonomía de Suelos*, de USDA-SSS (2014); «Características de los principales órdenes de suelos presentes en Costa Rica», de Floria Bertsch Hernández, Rafael Mata y Carlos Henríquez (1993), publicado en *Agricultura de hoy para la Costa Rica del mañana, y Edafología del Tropico*, de Wagner Peña Cordero (2017).



ORDEN DE SUELO	ELEMENTO FORMATIVO	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICA DETERMINANTE
Vertisoles	ert	<ul style="list-style-type: none">Con arcillas expandibles. Anteriormente, se conocían como grumosoles o suelos de arcillas negras.	<ul style="list-style-type: none">Suelos minerales que se caracterizan por su alto contenido de arcillas, 2:1 (esmectitas).Presentan un micro relieve («gilgai»), por el humedecimiento y secado alterno producto de las ondulaciones.
Ultisoles	ult	<ul style="list-style-type: none">En general, ocupan las partes altas de las cuencas y las posiciones más altas de las pendientes no sujetas a rejuvenecimiento alguno.	<ul style="list-style-type: none">Suelos con un horizonte diagnóstico argílico no saturado en bases.Poseen un horizonte B bien consolidado, como consecuencia del incremento de la arcilla, en relación con el horizonte A.
Entisoles	ent	<ul style="list-style-type: none">Suelos jóvenes formados sobre abanicos aluviales recientes, sobre llanuras de inundación o en las montañas.	<ul style="list-style-type: none">Su característica principal es carecer de horizontes desarrollados pedogenéticamente; son suelos de origen muy reciente.
Molisoles	oll	<ul style="list-style-type: none">Son los más productivos del mundo (en Norteamérica, Sudamérica, Europa y Asia).Con un adecuado manejo, pueden producir rendimientos muy elevados. Estos suelos se equiparan a los conocidos chernozems, kastanozems, phaeozems y chesnut	<ul style="list-style-type: none">Son suelos de repastos y praderas, caracterizados por la presencia de un epipedón mólico, de color oscuro; son friables, altos en bases intercambiables y en materia orgánica.
Histosoles	ist	<ul style="list-style-type: none">Se estima que mundialmente ocupan de 325 a 375 millones de hectáreas.Corresponde a los suelos pantanosos y turbas. Grandes extensiones de estos suelos se encuentran en los Estados Unidos de Norteamérica, Canadá, el oeste de Europa y el norte de Escandinavia.	<ul style="list-style-type: none">Suelos orgánicos caracterizados por la presencia de un epipedón hístico de 30 cm de profundidad con 20% de materia orgánica como mínimo.Permanecen saturados con agua gran parte de año, a menos que hayan sido drenados.
Espodosoles	od	<ul style="list-style-type: none">Anteriormente se les llamaba podsoles. Se encuentran raramente en los trópicos, son más frecuentes en climas fríos y húmedos. Se asemejan a los podsoles de la WRB. Comunes en suelos de coníferas.	<ul style="list-style-type: none">Suelos ácidos, bastante lixiviados, que se han formado bajo vegetación de bosques en zonas relativamente frías y húmedas.Se caracterizan por presentar un horizonte de acumulación de aluminio y materia orgánica con hierro o sin este. El horizonte es de color negro rojizo, conocido como horizonte espódico.
Oxisol	ox	<ul style="list-style-type: none">Ocupan un estimado de 750 millones de hectáreas de la superficie mundial y se ubican, principalmente, en superficies geomorfológicas antiguas y estables del pleistoceno.Suelos tropicales y subtropicales. Se pueden encontrar en Sudamérica, específicamente en Brasil, y en África, en países como República del Congo, Angola y Guinea. Son suelos semejantes a los ferralsoles y plintosoles de la FAO.	<ul style="list-style-type: none">Tienen un horizonte de diagnóstico óxico. Poseen alto contenido de sesquióxidos, cuarzo y caolinitas, producto de un fuerte e intensivo proceso de meteorización.
ARIDISOL	ID	<ul style="list-style-type: none">Son los suelos característicos de las zonas desérticas. El suborden se define por la presencia o ausencia de un horizonte argílico. Generalmente, tienen un régimen de humedad ofídico (tórrido).	<ul style="list-style-type: none">Los horizontes diagnósticos, como el apipado, son en la mayoría de los casos ófricos. Los horizontes evolucionados, como el argílico y el nítrico, provienen de la acumulación de sales.
GELISOLE	EL	<ul style="list-style-type: none">La mayor área de esta categoría de suelos se encuentra en la Federación Rusa, Canadá, China y Alaska. Otras zonas reportadas en pequeña extensión se hallan en el Norte de Europa, Groenlandia y en áreas libres de hielo de la Antártida.Representan 13 % de la superficie global de la Tierra.	<ul style="list-style-type: none">Se forman en regiones sujetas donde hay escarcha permanentemente. Discontinuos en las zonas boreales y esporádicos en montañas de clima templado.Poseen capas congeladas los primeros 100 cm de la superficie.



1) Está saturado con agua por menos de 30 días (acumulativos) al año en años normales y contiene menos de 20 por ciento (por peso) de carbono orgánico; o 2) está saturado con agua por 30 días acumulativos o más en años normales (o está artificialmente drenado), y excluyendo [sic] a las raíces vivas, presenta un contenido de carbono orgánico (por peso) de: a) menos de 18 por ciento, si la fracción mineral contiene 60 por ciento o más de arcilla; o b) menos de 12 por ciento, si la fracción mineral no contiene arcilla; o c) menos de 12 + (porcentaje de arcilla por 0,1) por ciento, si la fracción mineral contiene menos de 60 por ciento de arcilla. En este caso, si cumple con esas características, se debe analizar por horizonte de diagnóstico (epipedón y endopedón) para establecer el orden y suborden.

A la vez, un suelo se registra como orgánico si cumple con la siguiente característica (USDA-SSS, 2014, p. 3-4):

Si tiene más de 20% de carbono orgánico o si más de la mitad de los 80 cm superiores del suelo es orgánico o si el material de suelo orgánico descansa sobre una roca o material fragmentario que tiene **intersticios** llenados con materiales orgánicos. En este caso, los suelos que corresponden al orden histosol y el suborden histels son orgánicos.

Luego de la diferenciación de los suelos minerales de los orgánicos, se inicia con la clasificación de los suelos minerales por su horizonte de diagnóstico, tanto los epipedones (capas superficiales del suelo) como los endopedones (subcapas del suelo).

En cuanto a los epipedones, el sistema USDA propone las siguientes asociaciones según determinadas características: antrópico (horizonte modificado por el ser humano), folístico (suelos con altos contenidos de materia orgánica compuesta por musgos como sphagnum), hístico (alto contenido de materia orgánica), melánico (epipedón grueso y negro relacionado con cenizas volcánicas), mólico (horizonte de praderas de color oscuro), ócrico (epipedón claro y delgado), plaggen (epipedón 50 cm sobre la superficie y úmbrico (similar a mólico, pero con saturación de bases menor de 50%) (v. FIG. 57, P. SIG.).

FIGURA 56. EFECTO DE LOS FACTORES Y PROCESOS FORMADORES DEL SUELO EN LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS A TRAVÉS DEL TIEMPO. La formación de suelos es gracias a los factores y procesos formadores de suelos; a un inicio el primer resultado es suelo nuevo, el cual es clasificado como un suelo entisol y, luego, con el paso del tiempo y la incidencia de los factores y procesos formadores, se forman suelos del orden oxisol y ultisol, que son más meteorizados y viejos.

FUENTE: «Características de los principales ordenes de suelos presentes en Costa Rica», de Flora Bertsch, Rafael Mata y Carlos Henríquez, publicado en *Resúmenes del IX Congreso Nacional Agropecuario y de Recursos Naturales* (1993, p. 4).

CONCEPTO

intersticios. Cada uno de los espacios vacíos que quedan entre materiales. El material parental al fragmentarse forma rocas, las cuales a su vez contienen fisuras donde, en el caso de suelos orgánicos, se llenan con material orgánico.



Y los horizontes diagnóstico subsuperficiales o de los endopedones son: ágrico (campo formado bajo condiciones de cultivo), álbico (horizonte lavado de color blanco), argílico (presencia de arcillas), cálcico (presencia de calcio), cámbico (horizonte alterado de textura fina), duripán (presencia de concreciones cementadas), espódico (presencia de cenizas), fragipán (capa frágil), glósico (horizonte degradado con muestras de lenguas), gypsico (presencia de yeso), kándico (presencia de caolinitas), nátrico (presencia de sodio), óxico (presencia de óxidos de hierro), petrocálcico (presencia de piedras de calcio), petrogypsico (piedras de yeso), plácico (horizonte plano), sálico (presencia de sales) y sómbrico (horizonte oscuro) (FIG. 58).

A cada una de las características antes descritas, el sistema USDA asigna un prefijo el cual denota el suborden del suelo (v. CDR. 22 y EJ. 3).

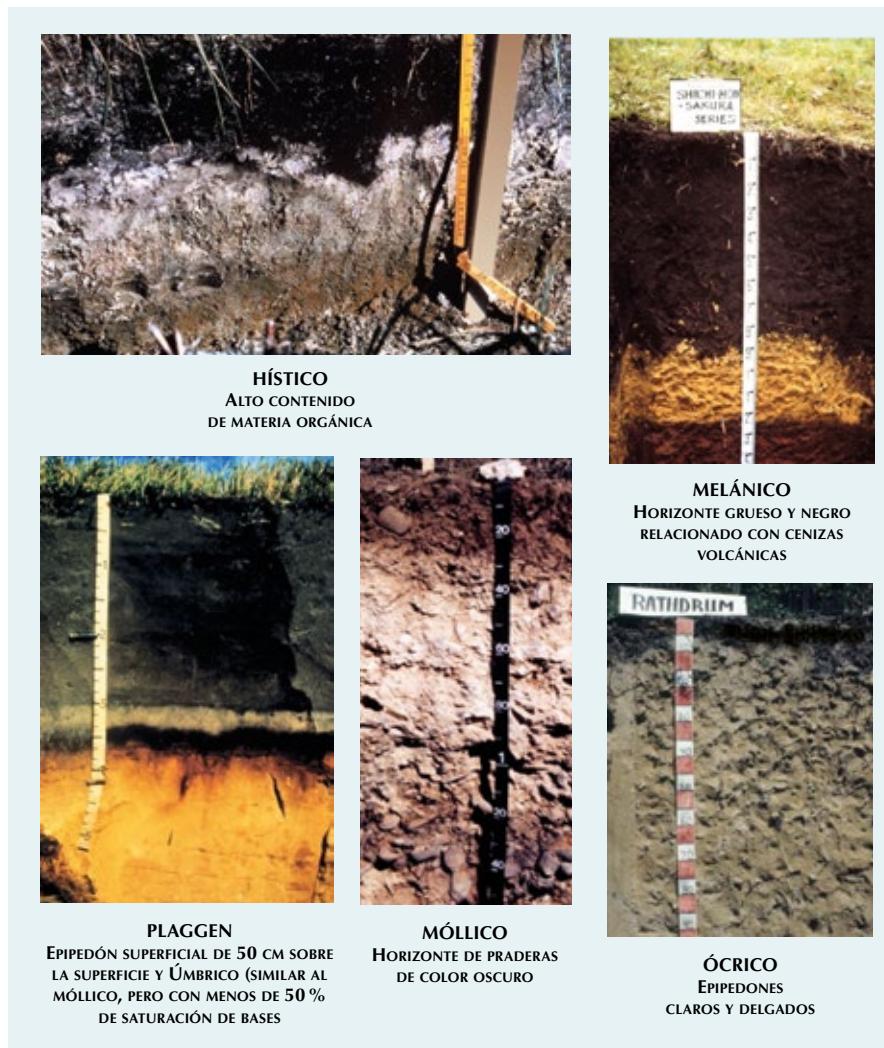


FIGURA 57. EPIPEDONES SEGÚN LA TAXONOMÍA DE SUELOS DE LA USDA EN COSTA RICA. Mosaico fotográfico que ejemplifica los distintos tipos de horizontes superficiales o más conocidos epipedones en los cuales se representan los siguientes: hístico, melánico, mólico, órico y plaggen.

FUENTE: Morfología: *Conceptos de Taxonomía*, de UCA-Agrarias (2015), *Soil taxonomy: A basic system of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, de USDA-NRCS (1999, pp. 53-74) y *Soil Survey Staff. Illustrated guide to soil taxonomy*, de USDA-NRCS (Versión 2.0, Septiembre 2015, pp. 3-15 y 3-17). FOTOGRAFÍAS: reproducidas con fines educativos, por cortesía de USDA-NRCS (1999).

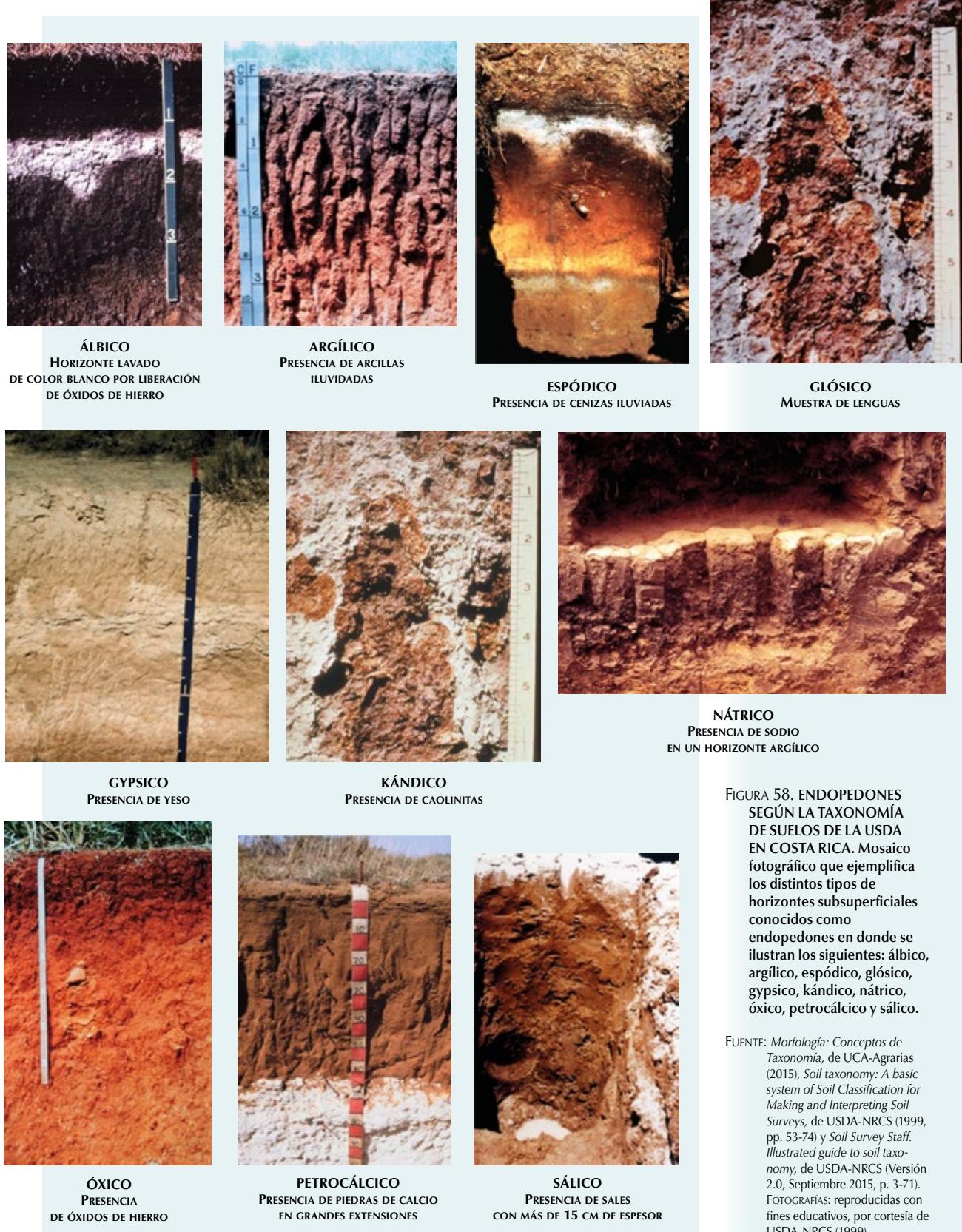


FIGURA 58. ENDOPEDONES SEGÚN LA TAXONOMÍA DE SUELOS DE LA USDA EN COSTA RICA. Mosaico fotográfico que ejemplifica los distintos tipos de horizontes subsuperficiales conocidos como endopedones en donde se ilustran los siguientes: álbico, argílico, espódico, glósico, gypsico, kándico, nátrico, óxico, petrocálcico y sálico.

FUENTE: Morfología: Conceptos de Taxonomía, de UCA-Agrarias (2015), *Soil taxonomy: A basic system of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, de USDA-NRCS (1999, pp. 53-74) y *Soil Survey Staff. Illustrated guide to soil taxonomy*, de USDA-NRCS (Versión 2.0, Septiembre 2015, p. 3-71). FOTOGRAFIAS: reproducidas con fines educativos, por cortesía de USDA-NRCS (1999).



CUADRO 22
PREFIXOS FORMATIVOS PARA LOS SUBÓRDENES Y SU SIGNIFICADO

ELEMENTO FORMATIVO	SIGNIFICADO APROXIMADO
acr	Extremadamente alterado o meteorizado.
al	Predominio del aluminio (Al) sobre el hierro (Fe).
anhy	Muy seco.
agr	Presencia de horizonte agrícola.
alb	Presencia de horizonte albico.
and	(derivado de cenizas volcánicas).
	And, referido a suelos; en japonés, significa negro.
anthr	Presencia de horizonte antrópico.
arg	Presencia de horizonte argílico.
aqu	Permanencia de agua.
bor	Frío - no congelado.
calc	Presencia de horizonte cálcico.
camb	Presencia de horizonte cámbico.
chrom	Valores de chroma alto.
cry	Frío-hielo o congelado permanentemente.
dur	Presencia de duripán.
dystr, dys	Baja saturación de bases.
endo	Saturación profunda de agua.
epi	Saturación superficial de agua.
eutr, eu	Alta saturación de bases.
ferr	Presencia de mucho hierro.
fibr	Escasa descomposición de M. O. S.
flagloss	Fragipán en lenguas.
fluv	Llanura aluvial de inundación.
fol	Masa de hojas.
frag	Presencia de fragipán.
fulvi	Compuestos húmicos amarillentos.
geli	Suelos en condiciones extremadamente frías (0° C).
gibbs	Presencia de gibbsita.
glac	Lentes de hielo.
gloss	Horizonte en lenguas.
gyps	Horizonte gipsico.
hal	Horizonte salino.
hapl	Horizonte con mínimo desarrollo.
hem	Descomposición intermedia de M. O. S.
hist	Material edáfico orgánico.
hum	Humus
hydr	Presencia de agua.



ELEMENTO FORMATIVO	SIGNIFICADO APROXIMADO
kandi	Requisitos asociados con actividad y profundidad de minerales.
kanhapi	Similar al anterior, pero con menos requisitos taxonómico.
lept	Horizonte delgado.
lithic	Presencia de roca superficial.
luv	Lluvial
med	De climas templados.
melan	Epipedón melánico.
moll	Epipedón mólico.
nadur	Ambos: natr (nátrico) y dur (duro).
natr	Presencia de horizonte nátrico.
ochr	Presencia de epipedón ócrico.
orth	Más común.
pale	Desarrollo antiguo y fuerte (excesivamente desarrollado).
pell	Croma bajo.
plac	Presencia de un pan delgado.
plag	Presencia de un epipedón plagen.
plinth	Presencia de plintita.
psamm	Texturas arenosas.
quartz	Alto contenido de cuarzo.
rend	Semejante a suelo rendzina.
rhod	Colores rojo-oscuro.
sal	Presencia de horizonte sálico.
sapr	Máxima descomposición de M. O. S.
sider	Presencia de óxido de hierro (Fe) libre.
sombr	Horizonte sómbrico (oscuro).
sphagn	Presencia de sphagnum, liquen.
stat	Sin pedoturbación de M. O. S.
sulf	Presencia de sulfitos.
therm	Más caliente que el suelo modal.
torr	Usualmente seco.
trop	Continuamente caliente y húmedo.
ud	Suelo seco por menos de 90 días acumulativos al año.
umbr	Epipedón úmbrico.
ust	Suelo seco entre 90-180 días al año; o si no, 90 días continuos de periodo seco al año.
verm	Mezclado por lombrices.
vitr	Presencia de vidrios volcánicos.
xer	Estación seca anual, semiárido.

FUENTE: adaptado de *Claves para la taxonomía de suelos*, de USDA-SSS (2014) y *Fundamentos de edafología*, de Jorge Núñez Solís (1985, p. 151).

**EJEMPLO****EJEMPLO 3**

Construcción del nombre del suborden andisol. Su nombre se construye según se muestra en la figura siguiente:



Construcción del nombre del suborden de un suelo

Es decir, un suelo del orden andisol con características aquicas.

- **aqu** (elemento formativo a nivel de gran grupo): permanencia de agua.
- **and**: suelo de orden andisol.

**CONCEPTO**

coeficiente de extensibilidad. Relación de la diferencia entre la longitud en húmedo y en seco de un terrón con respecto a la longitud en seco, o sea, (lhúmedo - lseco)/lseco. Este coeficiente trabaja con el estado de deformación de un suelo y ayuda a estimar el estado de contracción del volumen de suelo en estado seco y húmedo, el cual es utilizado en ensayos de campo para valorar estabilidad de estructuras y resistencia de suelo.

De manera abreviada, es correcto indicar que los horizontes se clasifican según diversas características: cambios texturales sustanciales, materiales álbicos (blanquecinos), condiciones anhidrinas (sin agua), diferencias de humedad (**coeficiente de extensibilidad**), presencia de durinodos (concreciones cementadas), presencia de fragipanes (capas duras en el subsuelo), carbonatos libres, presencia de lamelas (horizonte iluvial menor de 7,5 cm de espesor con arcillas silicatadas), fragmentos rocosos o depósitos de arenas contrastantes, fragmentos rocosos con capas superficiales meteorizadas y presencia de plintitas (sesquióxidos de hierro y aluminio y pobre en humus), entre otras (v. Ej. 4).

Una vez definido el orden y el suborden se clasifican los grandes grupos; el nombre de cada grupo se forma agregando un sufijo al suborden. El sufijo corresponde a criterios de regímenes climáticos; por ejemplo, térmicos, de color, saturación de bases y horizontes específicos (v. Ej. 4).

Luego, se realiza la cuarta clasificación, que consiste en el subgrupo. Su nombre se forma mediante un adjetivo calificativo, cuyo significado corresponde a propiedades específicas del suelo (Ej. 4).

Por último, la familia es la categoría donde se agrupan los suelos que tienen propiedades físicas y químicas similares. En esta categoría, el nombre es polinomial donde se agregan tres o más adjetivos a su nombre, como en el caso de descripciones minerales o clases texturales (v. Ej. 4).



EJEMPLO

EJEMPLO 4

Si se revisa un estudio en el cual se nombra un suelo como *Andic Palehumults* se puede indicar lo siguiente: que son suelos viejos y con una coloración pardo rojiza, debido a su acidez y gran contenido de arcillas característico de los suelos de orden ultisol, además de que se caracterizan por la presencia de más de un horizonte.

- ORDEN = ultisol (suelo viejo, pardo rojizo, lixiviado, ácido, arcilloso) (v. CDR. 21).
- SUBORDEN = humult (rico, relativamente, en materia orgánica o *humus*) (v. CDR. 22).
- GRAN GRUPO = palehumult (tiene uno o más horizontes con un espesor total de 18 cm o más, y una fracción de tierra fina con una densidad aparente de 1,0 g/cm³ o menos, medida a una retención de agua de 33 kPa y porcentajes de aluminio más ½ Fe. Si (determinados con oxalato de amonio), la cual es una prueba que se utiliza para conformar la iluviación del aluminio y el hierro de no mayor a 1,0 % (v. CDR. 21 y 22).
- SUBGRUPO = *Andic haplohumults* (con características ándicas, baja densidad aparente y arcillas alófanas) (USDA SOIL SURVEY STAFF, 2014, p. 322).
- Andic: suelo con características ándicas (cenizas volcánicas) (v. CDR. 22).

En los dos sistemas de clasificación expuestos anteriormente, se destacan varias similitudes. Por ejemplo, ambos diferencian entre suelos orgánicos y suelos minerales; además, se clasifican por horizontes de diagnóstico, ya sea superficiales o subsuperficiales.

Sin embargo, presentan diferencias marcadas, como que la clasificación de la WRB basa su sistema solo en el material de partida y los factores y procesos de formación de suelos; y el sistema de USDA toma en cuenta los regímenes de humedad y temperatura del suelo.

Seguidamente, las jerarquías utilizadas son distintas: la WRB clasifica en dos niveles y el primer nivel consta de 32 grupos de suelo, a diferencia de la de la USDA que presenta seis categorías: Orden, Suborden, Gran grupo, Subgrupo, Familia y Serie. Otra de las diferencias es basada en los objetivos de clasificación: la WRB es utilizada para observar a largo plazo, mientras las evoluciones del suelo, en tanto que la taxonomía de suelos de USDA busca analizar que las propiedades no cambian con el tiempo. El sistema de WRB es muy utilizado por las escuelas europeas, mientras en América el sistema de la USDA ha sido ampliamente adoptado. Empero, cabe resaltar que el sistema WRB es el especificado por la FAO para reportar, con el fin de unificar criterios a la hora de tomar decisiones. Dichas diferencias se resumen en el Cuadro 23 (v. p. 182).

Entre las categorías de clasificación de los dos sistemas hay similitudes las cuales se resumen en el Cuadro 24 (v. p. 183).



CUADRO 23

DIFERENCIAS ENTRE LOS SISTEMAS
DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS MÁS RECONOCIDOS

SISTEMA WRB BASE REFERENCIAL MUNDIAL PARA RECURSOS DEL SUELO (WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES)	SISTEMA USDA TAXONOMÍA DE SUELOS DEL MINISTERIO DE AGRICULTURA DE LOS ESTADOS UNIDOS (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE)
Propuesto por FAO.	Propuesto por USDA.
No toma en cuenta regímenes de humedad o temperatura solo los materiales de partida, los factores y procesos de formación del suelo.	Toma en cuenta regímenes de humedad y temperatura del suelo.
Comprende dos niveles. Primer nivel: Clasifica en 32 GRUPOS (GSR). Segundo nivel: Consiste en el GSR combinando con un conjunto de calificadores principales y suplementarios.	Clasifica en 12 órdenes de suelo y consta de seis categorías de mayor a menor jerarquía: Orden, Suborden, Gran grupo, Subgrupo, Familia y Serie.
Observa, a largo plazo, las evoluciones y la cronosecuencia del suelo.	Busca analizar las propiedades que no cambian con el tiempo.
Ampliamente usada en escuelas europeas.	Ampliamente usada en escuelas anglosajonas.

FUENTE: adaptado de *Claves para la taxonomía de suelos*, de USDA-SSS (2014); «Base Referencial Mundial del Recurso Suelo». *Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos N.º 103*, de IUSS-WRB/Grupo de Trabajo (2007); y *Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos*, de FAO (2016).

IV. **Suelos de américa latina**

En el informe de la FAO (2014), correspondiente al *Atlas de los suelos de América Latina y el Caribe*, se rescata que la mayoría de los continentes posee una amplia variabilidad edáfica, gracias a la influencia de los factores climáticos y a la geomorfología del lugar, los cuales afectan el material sobre el que yacen y crean suelos y ecosistemas diversos dentro de cada región.

El trabajo de la FAO sobre la clasificación de suelos mundial indica lo siguiente:

30 % de los suelos está representado en el área tropical o subtropical. Los principales grupos de suelo del sistema WRB que se representa en Latinoamérica y el Caribe son los siguientes grupos de suelo de referencia (GSR): ferrales (17 %), acrisoles (12 %), lixíoles (2 %) y plinthosoles (1 %). Otros grupos bien representados en el continente son: cambisoles (9 %), regosoles (6 %), phaeozems (6 %), gleysoles (5 %), luvisoles (4 %), solonetz (3 %), arenosoles (5 %) y calcisoles (2 %) (GARDI, Y OTROS, 2014, p. 44).

En la Figura 60 (v. p. 184), se visualiza la información anterior.

EN LA RED...

ATLAS DE LOS SUELOS

Si desea conocer más sobre el *Atlas de los suelos de América Latina y el Caribe*, incursione en la Red y acceda la siguiente dirección web: <<http://www.http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/en/c498112/>> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.





CUADRO 24

SIMILITUD ENTRE LOS NOMBRES DE GRUPOS DE SUELO DE REFERENCIA (GSR)
DEL SISTEMA WRB Y LOS DE ÓRDENES Y SUBÓRDENES DEL SISTEMA USDA

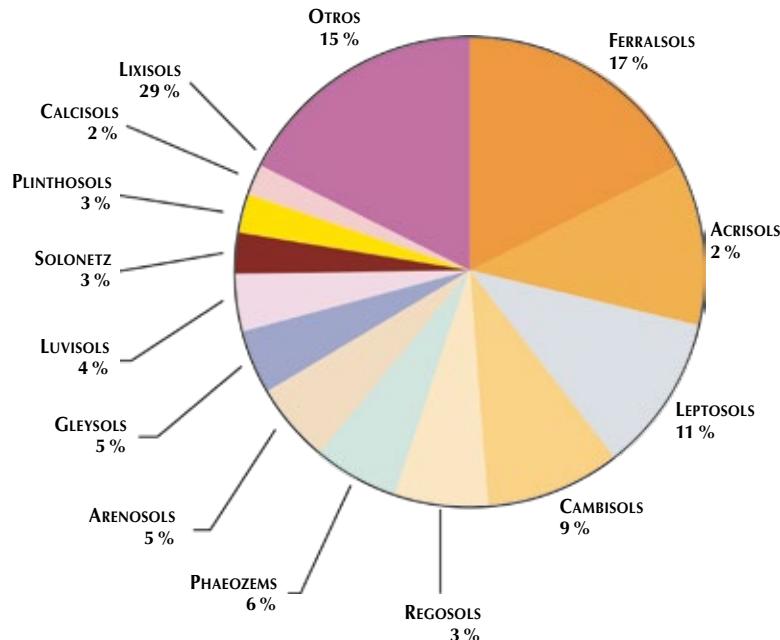
CLASIFICACIÓN SEGÚN SISTEMA WRB	CLASIFICACIÓN SEGÚN SISTEMA USDA
Acrisol	Ultisoles con arcillas de baja actividad.
Albeluvisol	Glossaqualfs, glossocryalfs y glossudalfs, alfisoles y ultisoles.
Alisol	Ultisoles con arcillas de alta actividad.
Andosol	Andisoles
Antrosol	Entisoles
Arenosol	Entisoles
Calcisol	Inceptisoles
Cambisol	Inceptisoles
Chermozem	Molisoles, suborden uadolles.
Crysol	Gelisoles
Durisol	Aridisol, suborden durides.
Ferralsol	Oxisoles
Fluvisol	Entisoles: fluvientes y fluvacuentes.
Gleysol	Entisoles
Gypsisol	Inceptisoles, gipsides.
Histosol	Histosoles e histeles.
Kastanozem	Ustoles y xeroles, molisoles.
Leptosol	Subgrupos lítico del orden entisol e inceptisoles.
Lixisol	Alfisoles con arcillas de baja actividad.
Luvisol	Alfisoles con arcillas de alta actividad.
Nitisol	Grandes grupos kándicos de alfisoles y ultisoles, y diferentes grandes grupos de inceptisoles, molisoles y oxisoles.
Phaeozem	Udoles y alboles, molisoles.
Planosol	Albacualfes, albacultes y argialbole, alfisoles.
Plinthosol	Plintacuox, plintacualfes, plintoxeralfes, plintustalfes, plintacultes, plintohumultes, plintudultes y plintustulte, oxisoles.
Podzol	Spodosoles
Regosol	Entisoles
Solonchak	Inceptisoles
Solonetz	Grandes grupos nátricos de varios órdenes.
Stagnoles	Acualfes, acuultes, acuentes, acueptes y acuoles.
Tecnosoles	No hay similar
Umbrisol	Entisoles e inceptisoles.
Vertisol	Vertisoles

FUENTE: adaptado de *Edafología del Trópico*, de Wagner Peña Cordero (2017).



FIGURA 59. PRINCIPALES GRUPOS DE SUELO DE REFERENCIA (GSR) EN LATINOAMÉRICA SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE LA WRB. Los principales suelos en Latinoamérica y el Caribe, según clasificación WRB, son los ferrasoles y los acrisoles, seguidos de los leptosoles, lo contrario de los lexisoles y calcisoles que son los de menor porcentaje. La figura demuestra claramente la variedad de suelos de esta región y la dominancia de los ferrasoles y acrisoles, los cuales son suelos meteorizados, rojos y amarillos y pobres en nutrientes.

FUENTE: *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*, de los editores: Ciro Gardi, Marcos Angelini, Sara Barceló, Juan Comerma, Carlos Cruz Gaistardo, Arnulfo Encina Rojas, Arwyn Jones, Pavel Krasilnikov, María de Lourdes Mendoza Santos Brefín, Luca Montanarella, Olegario Muñiz Ugarte, Peter Schad, María Isabel Vara Rodríguez y Ronald Vargas (2014, p. 44). Reproducido con fines educativos.



Un caso de diversidad de los suelos ocurre en Argentina. Este país presenta una geomorfología y una historia geológica muy cambiantes que en conjunto con la variabilidad climática generan diferencias marcadas en sus suelos. Por ejemplo: la Llanura Chaco-Pampeana posee un clima húmedo que hace sus suelos bastante fértiles; sin embargo, otra gran parte del territorio argentino presenta zonas con climas secos que promueven zonas áridas y semiáridas, de suelos menos fértiles.

Bolivia, Colombia, Chile y Brasil no escapan de dicha variabilidad. En especial Brasil que, a pesar de que no cuenta con formaciones de cadenas montañosas, despliega grandes contrastes edáficos en su territorio. Tales variaciones son generadas por su geomorfología tan particular comprendida en las áreas de mesetas y de planicies. Las mesetas brasileñas como la de Guayana, en el norte del país, están compuestas por rocas cristalinas; y la meseta brasileña central, por rocas más meteorizadas y por cuencas sedimentarias.

El área de cultivo de Brasil es principalmente en la zona conocida como la meseta brasileña, donde se encuentran los suelos de los grupos ferrasols y acrisols (suelos meteorizados, rojos y amarillos y pobres en nutrientes). Esto se debe a que las condiciones topográficas permiten el establecimiento de cultivos y que con



manejo de fertilización se puede superar la pobreza del suelo. Los suelos más fértiles de Brasil se hallan en la zona sur del país, como podzoles y plinthosols.

Las planicies y las tierras bajas cercanas a la amazonia poseen un relieve más irregular que forma valles, mesetas y terrazas de reciente formación. En contraste, las planicies de pantano en la región de Matogrosso son suelos que permanecen inundados (CARVAHLO, 2016).

En Brasil también se encuentran los suelos anthosols de *terra preta*: suelos negros en portugués. Son poco comunes y poseen alto valor etnoedáfico, debido a que son creados y modificados por el ser humano. Fueron formados por «la adición de grandes cantidades de carbón, huesos, estiércol y fragmentos de cerámica a un suelo caolinítico relativamente infértil (el horizonte amarillo) durante un largo periodo de tiempo» (GARDI, Y OTROS, 2014, p. 44). Esa modificación química, física y microbiológica del suelo sucedió por actividades culturales indígenas practicadas en la cuenca del río Amazonas y, recientemente, en otras áreas de Colombia, Ecuador y Perú.

Esas modificaciones de suelos también acontecieron en México, con la práctica de la realización de chinampas, que son arreglos de cultivo en islotes flotantes, pero que drenaban aguas en diferentes zonas para arrastrar sedimentos y asegurarse un método de riego por inundación del subsuelo.

En México, existen 26 de los 32 grupos de suelo reconocidos en el sistema WRB, donde dominan leptosoles (28,3% del territorio), regosoles (13,7%), phaeozems (11,7%), calcisoles (10,4%), luvisoles (9%) y vertisoles (8,6%) que, en conjunto, ocupan 81,7% de la superficie de ese país (SEMARNAT, 2017).

La diversidad edáfica de este país está más bien relacionada con los restantes grupos, los cuales determinan la complejidad pedogénética del país y en conjunto con el tipo de paisaje que posee, entonces generan una variabilidad de ecorregiones a pequeña escala que originan comunidades de vegetaciones específicas.

Por la variabilidad de los suelos que presenta ese país, la clasificación de los suelos ha significado un debate en la comunidad científica, en especial en los suelos llamados tempates, que hasta hoy no se ha resuelto (REYES, 2014).



INVESTIGUE

Realizar una búsqueda de información sobre los suelos tempates, chinampas y los suelos de terrapreta y analizar sus características. Conviene anotar sus resultados en su cuaderno de apuntes, con miras a futuras investigaciones.

• CLASIFICACIÓN



Belice, por su parte, es otro ejemplo de gran variabilidad edáfica, ya que una gran parte de la planicie costera se halla integrada por suelos arenosos originados a partir de depósitos aluviales en el norte del país. Sus zonas montañosas están compuestas por material calcáreo que, por acción del agua y de la meteorización, ha producido cuevas y zonas subterráneas, las cuales constituyen un paisaje singular.

En Centroamérica la variabilidad edáfica espacial aumenta debido a lo accidentado de sus relieves y a la presencia de microclimas en un ambiente tropical. En esta región dominan los suelos ultisoles, que son en su mayoría suelos meteorizados, además de los suelos andisoles en las cordilleras. Costa Rica, Guatemala, El Salvador y Nicaragua poseen cordilleras volcánicas de reciente formación, con volcanes activos que aportan cenizas; también hay presencia de suelos meteorizados como consecuencia de depósitos de material volcánico en las épocas de formación. Todos los suelos de ascendencia volcánica favorecen la actividad agrícola en la región centroamericana. Honduras presenta una menor influencia volcánica en relación con el resto de los países.



EN LA RED...

REGIONES CLIMÁTICAS

Con el fin de repasar acerca de las regiones climáticas, en relación con los grupos de suelo de referencia (GSR) según el sistema WRB, puede consultar el artículo «Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica», de Johnny Solano y Roberto Villalobos, del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Puede accederlo en la siguiente dirección: <<https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica>> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.



v. *Caracterización edáfica de Costa Rica*

El historial pedogenético de Costa Rica data del periodo Jurásico, cuando emergieron los cordones montañosos más importantes del país, como la cordillera volcánica del Norte y la cordillera de Talamanca, debido a los procesos originados por la alta actividad volcánica y por la fuerte erosión climática. El surgimiento de las cordilleras en el país creó una geomorfología variada, sobre todo en relación con el área territorial (51 100 km²); en esta predominan relieves estructurados y muy accidentados.

El clima del país corresponde a la categoría de tropical lluvioso, con dos estaciones climáticas muy marcadas: la seca y la lluviosa. Costa Rica presenta tres regiones climáticas: «la Región Tropical Húmeda del Atlántico, la Región Central Intermontana y la Región Tropical del Pacífico» (SOLANO Y VILLALOBOS, 2016, p. 1), y doce zonas de vida, según Leslie R. Holdridge en 1982 (BOLAÑOS, WATSON Y TOSI, 2005).

En Costa Rica, se crearon mapas de suelos en relación con los dos sistemas de clasificación más comunes: USDA y WRB.



En 1989, con el sistema USDA, se elaboró el primer mapa de suelos de nuestro país. En 2012, un grupo conformado por profesionales de la Universidad de Costa Rica (UCR), la Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS) y el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) iniciaron la revisión de los mapas de órdenes de suelos y en 2013 se publicó un mapa de órdenes y subórdenes de suelos de Costa Rica y la base de datos con 450 perfiles de suelos de Costa Rica.

Recientemente, en agosto del 2016, el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la UCR, con el apoyo del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), el INTA, perteneciente al MAG, y la ACCS presentaron un mapa digital de suelos de Costa Rica actualizado, elaborado a partir de una base de datos con más de 1500 perfiles de suelos e información geográfica, física, química y morfológica que puede ser utilizada para beneficio del sector agrícola, de procesos de obra pública y construcción de carreteras, y de la planificación y la conservación de recursos (CIA, 2010). Desde el 2017 el INTA trabaja para caracterizar, de una forma más detallada, los suelos del país. Se están generando mapas de órdenes de suelos y capacidad de uso de las tierras a escala 1:50 000.

CUADRO 25

CARACTERÍSTICAS DE LOS ÓRDENES DE SUELO EN COSTA RICA

ORDEN	ÁREA (km ²)	PORCENTAJE ¹ (%)	UBICACIÓN	SUBÓRDENES COMUNES	MANEJO
Inceptisol	7 509,89	14,86	Partes medias y altas de Costa Rica como: Guanacaste (La Cruz, Liberia, Bagaces, Cañas, Abangares, Nicoya, Santa Cruz, Carrillo y Nandayure), Limón (Sarapiquí, Pococí, Guácimo, Limón y Talamanca) y en la zona de Alajuela (Guatuso, Upala, Los Chiles, San Ramón, San Carlos, Palmares y Grecia), San José (Dota), Cartago (Turrialba, El Guarco y Paraíso), Puntarenas (Aguirre, Parrita, Buenos Aires, Osa, Jiménez, Golfito y Corredores).	Udepts y Ustepts.	Es de los órdenes más abundantes de Costa Rica. Requiere prácticas de drenajes. Tiene usos múltiples para cultivos.
Ultisoles	23 648,66	46,81	Se encuentran en la Zona Norte (Sarapiquí, San Carlos, Cutris) en el Sur (Pérez Zeledón, Buenos Aires y en las regiones fronterizas con Panamá) y en las estribaciones de la Cordillera de Talamanca, tanto hacia el Pacífico como hacia el Atlántico.	Humults, udults y ustuls.	Se recomienda encalado y aplicaciones de abonos orgánicos y un manejo racional de fertilizantes nitrogenados (amoniacales).



ORDEN	ÁREA (km ²)	PORCENTAJE ¹ (%)	UBICACIÓN	SUBÓRDENES COMUNES	MANEJO
Andisoles	7 633,69	15,11	Guanacaste (Liberia, Santa Cruz, Bagaces, Cañas y Tilarán), Alajuela (Upala, San Carlos, Naranjo, Alfaro Ruiz, Valverde Vega, Poas y Grecia), San José (Vásquez de Coronado, Dota y Pérez Zeledón), Heredia (Santa Bárbara y San Rafael), Cartago (Turrialba, Oreamuno, Paraíso, Alvarado y El Guarco), Limón (Guácimo-Pococí-Talamanca) y en Puntarenas (Coto Brus y Corredores). ²	Ustands, udands, vitrands y aquands.	Se recomienda encalado y aplicaciones de abonos orgánicos y un manejo racional de fertilizantes nitrogenados (amoniacales) y fosfatados.
Entisoles	6 972,42	13,8	Guanacaste (Liberia, Carrillo, Nicoya, Bagaces, Cañas y Abangares). ²	Fluvents, aquentes y orthents.	Se recomienda el uso de obras de conservación de suelos, para evitar la erosión hídrica y eólica de estos suelos, ya que son suelos delgados y con fuertes pendientes.
Alfisoles	3 325,56	6,58	Guanacaste (Cañas, Nicoya, Carrillo, Santa Cruz y Nandayure). ²	Aqualfs, udalfs, ustalfs, xeralfs, boralfs.	En ganadería estos suelos podrían presentar problemas de degradación por alta carga animal. Se recomienda realizar buenas prácticas de manejo y conservación de suelo, así como de fertilización.
Vertisoles	788,34	1,56	Guanacaste, específicamente en los nones de Liberia, Carrillo, Nicoya y Bagaces (Los Chiles), Cartago y San José (Santa Ana). ²	Aquerts, usterts y uderts.	Se recomienda el manejo del riego para evitar la desecación del suelo, en cultivos anuales y perennes, por agrietamiento.
Molisoles	482,74	0,96	Guanacaste (La Cruz, Liberia, Carrillo, Bagaces, Cañas y Abangares). ²	Udolls.	Se requiere aplicación de abonos fosfatados para obtener altos rendimientos de los cultivos. Se debe evitar el exceso de mecanización en estos suelos debido a que son muy susceptibles a compactación y erosión. Son susceptibles a la erosión.
Espodosoles	32,44	0,06	San José (zonas cercanas al Cerro de la Muerte como Pérez Zeledón y Dota), Cartago (Paraíso y El Guarco). ²	Humods.	Estos suelos deben estar destinados para el manejo y la protección de la vegetación natural.
Histosoles	128,87	0,26	Zona atlántica del país como Sarapiquí, Pococí, Siquirres, Limón y Matina, y también en la Zona Norte, específicamente en Caño Negro).	Folists Saprists	El uso apropiado de estos suelos se limita a actividades ganaderas extensivas y el manejo y conservación del bosque natural.

1. Porcentaje con respecto al territorio total de Costa Rica.

2. INTA-MAG (2015).

FUENTE: elaborado con base en los Boletines Técnicos 2, 3, 5, 6, 8 de «Suelos de Costa Rica», del INTA-MAG (2015) y Mapa de órdenes de suelo de Costa Rica, según USDA, de Rafael Mata Chinchilla, Albán Rosales Ibarra, D'Angelo Sandoval Chacón (2016).

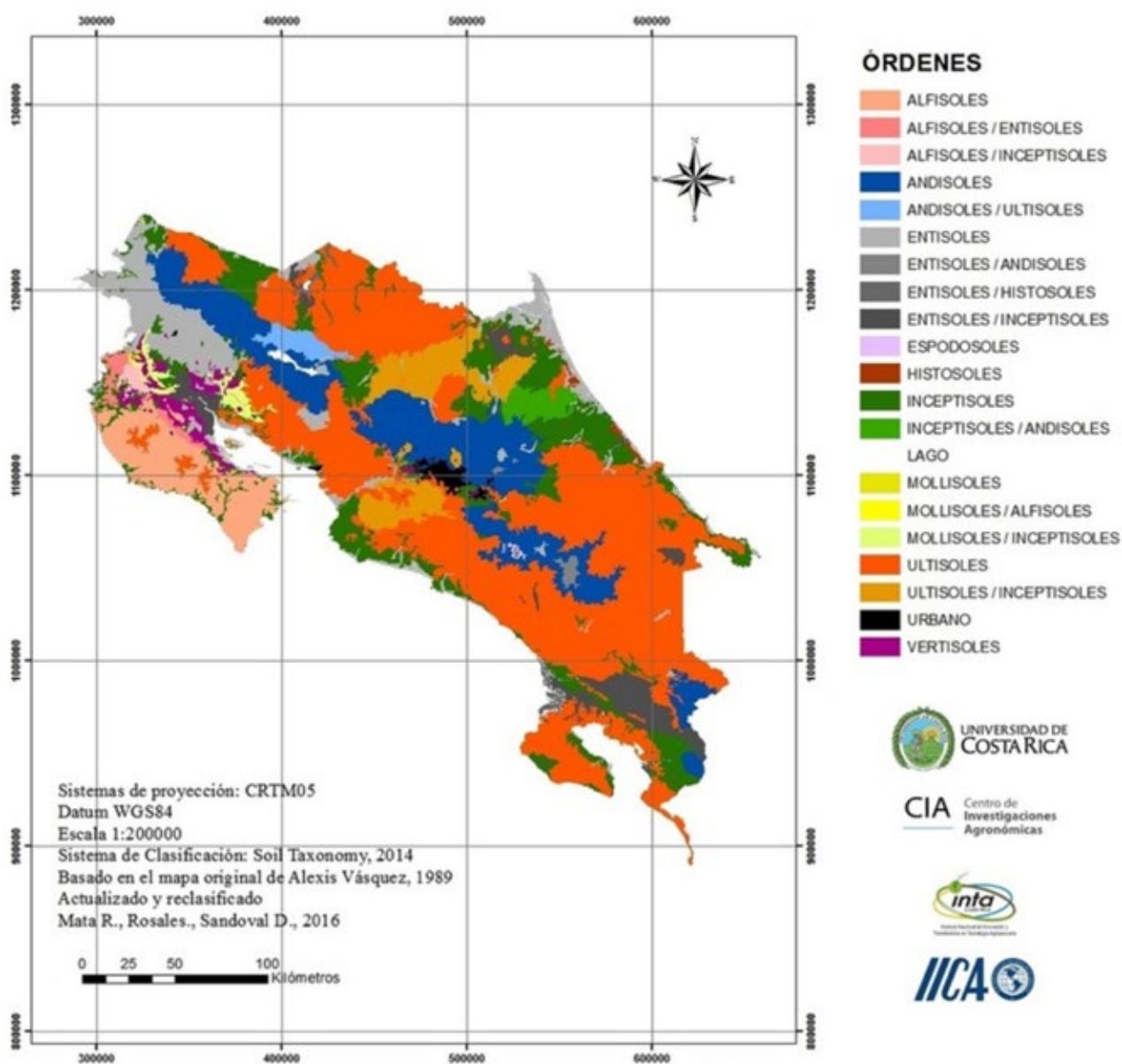
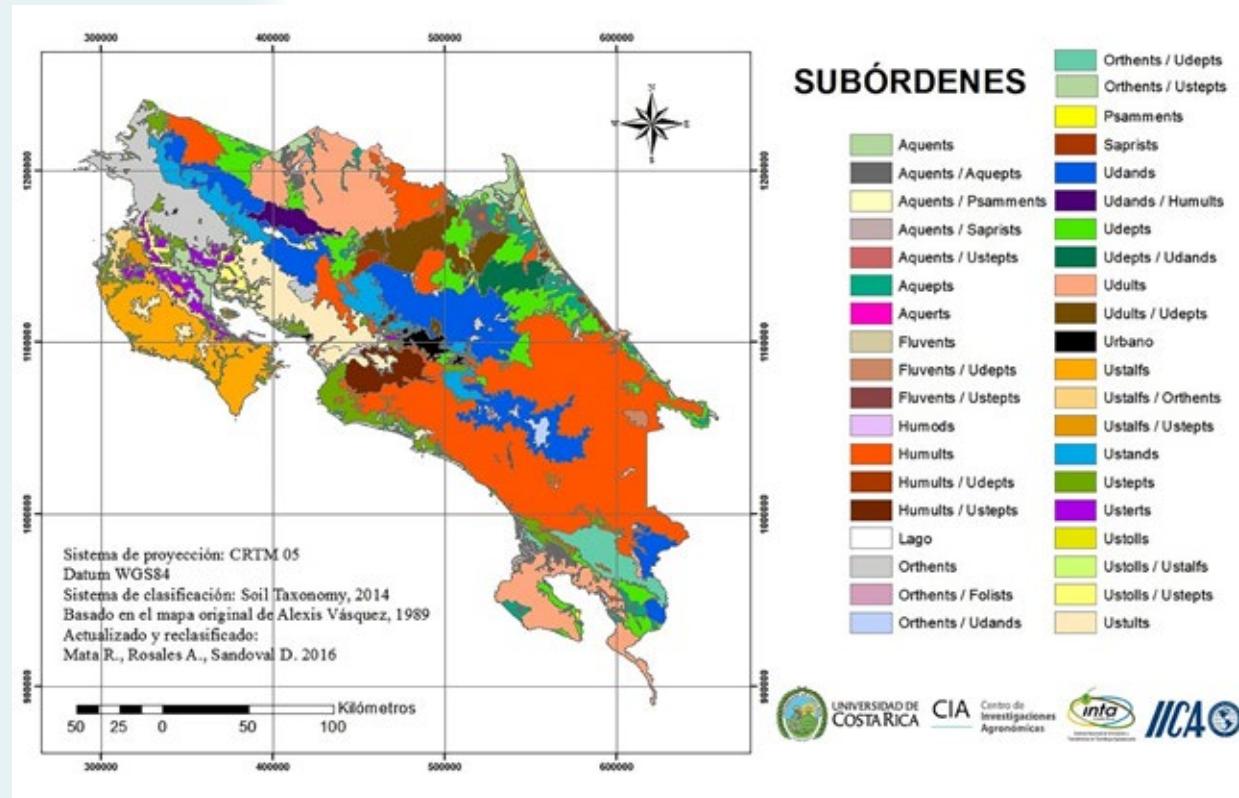


FIGURA 60. ÓRDENES DE SUELOS PARA COSTA RICA. La Universidad de Costa Rica (UCR), el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, ente adscrito al Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (INTA-MAG) y la Asociación Costarricense de Ciencias del Suelo (ACCS), en el 2016, publicaron el trabajo realizado de revisión, corrección y digitalización de los mapas de órdenes y subórdenes de suelos. En el país los órdenes más representativos son los ultisoles y los andisoles.

FUENTE: Mapa de órdenes de suelo de Costa Rica según USDA, de Rafael Mata Chinchilla, Albán Rosales Ibarra, DAngelo Sandoval Chacón (2016). Reproducido con fines educativos, por cortesía de UCR, CIA, INTA e IICA.

Según la información de USDA, en el país, de forma general, predominan los suelos ultisoles (> 50 % del territorio) y otros, como entisoles e inceptisoles primordialmente, muy influidos por la topografía de mayor ocurrencia (CDR. 25).



ATENCIÓN

En octubre del 2015, el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), de la Universidad de Costa Rica (UCR), lanzó una aplicación para dispositivos móviles inteligentes, llamada CR Suelos, producto del trabajo de la Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS), el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia Tecnológica Agropecuaria (INTA), del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), y la UCR. Con esta aplicación, se pueden obtener datos del orden y el suborden de suelo a partir de la identificación de la posición geográfica del sitio de estudio (latitud y longitud) y de perfiles de suelo analizados previamente e ingresados al sistema, según la Taxonomía del suelo, sistema USDA (CIA-UCR, 2016).

FIGURA 61. SUBÓRDENES DE SUELOS PARA COSTA RICA. En el mapa presentan los subórdenes más comunes que hay en el país, entre los que se destacan los humults, fluvents, aquents, orthents, udupts, ustols, ustafs, ustalifs, ustalifs/orthents, ustalifs/ustepts, ustalifs/ustands, ustolts, ustolts/ustafs, ustolts/ustepts, ustolts/ustolls, ustolts/ustolls/ustepts, ustolts/ustols, ustols/ustafs, ustols/ustands, ustols/ustolls, ustols/ustolls/ustafs.

FUENTE: Mapa de subórdenes de suelo de Costa Rica según USDA, de Rafael Mata Chinchilla, Albán Rosales Ibarra, D'Angelo Sandoval Chacón (2016). Reproducido con fines educativos, por cortesía de UCR, CIA, INTA e IICA.

Como se pudo observar, en las figuras 60 y 61, se representan en el mapa de Costa Rica los órdenes y subórdenes de suelos según clasificación del sistema USDA. Además, en la Figura 62 se ejemplifican, mediante un mosaico fotográfico, los distintos de órdenes de suelos presentes en Costa Rica.

Según el sistema WRB, en el país existen suelos que pertenecen a los siguientes grupos de suelo de referencia (GSR):

- **Andosoles.** Dispuestos en la zona montañosa del Valle Central y en zonas altas con influencia volcánica de Guanacaste.
- **Acrisoles y alisoles.** Asentados en zonas montañosas del país, como la zona de Los Santos.
- **Luvisoles.** Situados en el Pacífico Norte.
- **Cambisoles.** Muy comunes a lo largo de todo el territorio, pero principalmente en las llanuras del Atlántico y del Pacífico.



ALFISOL



ANDISOL



ENTISOL



ESPODOSOL



HISTOSOI



INCEPTISOL



MOULISON



ULTISOL

FIGURA 62. DISTINTOS
PERFILES DE SUELOS
CLASIFICADOS SEGÚN LA
TAXONOMÍA DE SUELOS
DE LA USDA EN COSTA
RICA. Mosaico fotográfico
que ejemplifica los distintos
perfiles de ocho órdenes de
suelo: alfisoles, andisoles,
entisol, espodosol, histosol,
inceptisol, molisol y ultisol,
en los cuales se pueden
apreciar las distintas
conformaciones de los
horizontes, producto de
los factores formadores del
suelo.

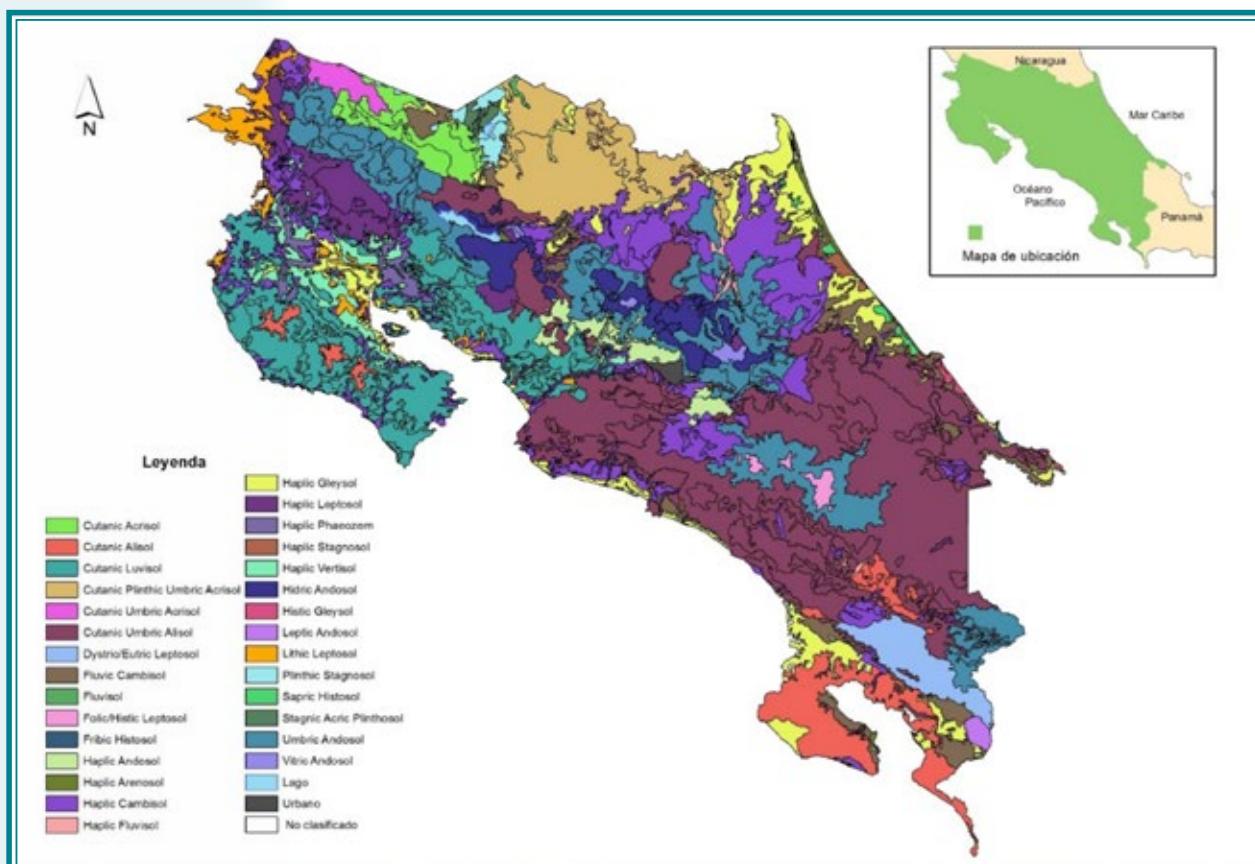
FUENTE: investigación y propuesta de Paola Brenes Rojas, en 2017.
FOTOGRAFÍAS: cortesía de Carolo-magno Salazar Calvo.



- **Leptosoles.** Localizados en relieves montañosos con pendientes escarpadas y fuertemente inclinadas.
- **Gleisoles.** Ubicados en las llanuras costeras bajas y las zonas de marisma.
- **Vertisoles.** Se encuentran cerca del río Tempisque, en Santa Ana y en Cartago cerca de Tejar.
- **Fluvisoles.** Asentados en las llanuras aluviales recientes.
- **Phaebozems.** Se ubican cerca del río Tempisque; son altamente productivos.
- **Plinthosoles.** En la zona norte del país.
- **Stagnosoles.** Situados en la zona norte del país.
- **Histosoles.** Cerca de zonas litorales y partes altas de la cordillera de Talamanca.
- **Podzoles.** Encontrados en la parte alta de la cordillera de Talamanca, asociados al bosque nuboso de altura, con un clima frío y húmedo, entre los 2 500 y 3 000 m s.n.m.
- **Arenosoles.** Se sitúan en playas del litoral del Pacífico y del Atlántico (FIG. 63).

FIGURA 63. MAPA DE GRUPOS DE SUELOS DE REFERENCIA PARA COSTA RICA. Existe una gran variedad de grupos de suelos en Costa Rica. Según la clasificación de suelos existen alrededor de 15 grupos, entre los que se encuentran los alisos y luvisoles, los de mayor dominancia. Base referencial mundial del recurso suelo, sistema WRB, Costa Rica.

FUENTE: Manejo y conservación de suelos tropicales, de Wagner Peña Cordero, Roger Muñoz Hernández y Carlomagno Salazar Calvo (2016). Reproducido con fines didácticos, bajo el permiso expreso de los autores.





RESUMEN

La variabilidad edáfica depende de la intensidad de la acción de factores formadores sobre su material parental. La clasificación de suelos siempre ha sido una necesidad y una problemática de los investigadores del tema; pero durante la última década se han asignado esfuerzos a establecer una metodología adecuada para realizarla. Ha sido una tarea difícil por existir tantas variables que considerar.

Costa Rica es un ejemplo de variabilidad edáfica en una extensión relativamente pequeña. Las condiciones agroclimáticas, la geomorfología y la flora y fauna generan diferentes grupos de suelos. Tal ejemplo se repite en toda Latinoamérica, por la acción de los diferentes factores formadores de suelo.

El impulso mundial por el uso de un sistema global de clasificación de suelos responde a las necesidades de cartografía y de planificación. Este tipo de sistema representa una herramienta para los investigadores y los tomadores de decisiones, con el fin de generar más compresión de los suelos y de su importancia e implementarlo en la planificación territorial y conservación de recursos.

Existen dos métodos de clasificación: la Base referencial mundial para recursos del suelo, sistema WRB y la Taxonomía de suelos, sistema USDA; ambos son utilizados ampliamente en el continente americano. La principal similitud es que los dos se guían por el estudio de los horizontes de diagnóstico (epipedón y endopedones) y la diferencia que destaca es que la WRB no incluye datos de clima en su clasificación.







EJERCICIOS DE AUTOEVALUACIÓN

- I. ASOCIAR.** Vincular el término de la izquierda con la descripción de la derecha y, luego, escribir la letra correspondiente dentro de los paréntesis.

- | | |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A. Humods | [] Propiedad formativa del suelo de clima frío |
| B. Aridisoles | [] Suelo con deposición aluvial |
| C. Xerolls | [] Suelo espodosol con horizonte húmico |
| D. Aquoxs | [] Oxisol |
| E. Fluvents | [] Suelo con un horizonte argílico y más de 35 % de saturación de bases |
| F. Vertisol | [] Suelos orgánicos |
| G. Alfisol | [] Molisol con régimen de humedad xérico |
| H. Histosoles | [] Presencia de arcillas 2:1 |
| I. Cry | [] Suelos de áreas desérticas |
| J. Umbert | [] Suelos oscuros similares al Molisol, pero con menos de 50 % de saturación de bases, con presencia de arcillas 2:1 y epipedón úmbrico |

- II. COMPARAR.** Anotar, en la segunda columna, los órdenes en el sistema USDA que son similares a los descritos en el sistema WRB, de la primera columna.

ORDEN WRB	ORDEN USDA
Acrisol	
Crysol	
Ferralsol	
Fluvisol	
Gleysol	
Gypsisol	
Histosol	
Plinthosol	
Podzol	
Regosol	
Solonchak	
Umbrisol	
Vertisol	



RESPUESTA A LOS EJERCICIOS DE AUTOEVALUACIÓN

I. ASOCIAR

- | | |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A. Humods | [I] Propiedad formativa del suelo de clima frío |
| B. Aridisoles | [E] Suelo con deposición aluvial |
| C. Xerolls | [A] Suelo espodosol con horizonte húmico |
| D. Aquoxs | [D] Oxisol |
| E. Fluvents | [G] Suelo con un horizonte argílico
y más de 35 % de saturación de bases |
| F. Vertisol | [H] Suelos orgánicos |
| G. Alfisol | [C] Molisol con régimen de humedad xérico |
| H. Histosoles | [F] Presencia de arcillas 2:1 |
| I. Cry | [B] Suelos de áreas desérticas |
| J. Umbert | [J] Suelos oscuros similares al Molisol,
pero con menos de 50 % de saturación
de bases, con presencia de arcillas 2:1
y epipedón úmbrico |

II. COMPARAR

ORDEN WRB	ORDEN USDA
Acrisol	<i>Ultisoles con arcillas de baja actividad</i>
Crysol	<i>Gelisoles</i>
Ferralsol	<i>Oxisoles</i>
Fluvisol	<i>Entisoles: fluvientes y fluvacuentes</i>
Gleysol	<i>Entisoles</i>
Gypsisol	<i>Inceptisoles, gipsides</i>
Histosol	<i>Histosoles e histeles</i>
Plinthosol	<i>Oxisoles</i>
Podzol	<i>Spodosoles</i>
Regosol	<i>Entisoles</i>
Solonchak	<i>Inceptisoles</i>
Umbrisol	<i>Entisoles, inceptisoles</i>
Vertisol	<i>Vertisoles</i>



CAPÍTULO CUARTO

MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS

SUMARIO

- Calidad y salud del suelo
- Funciones del suelo
- Degradación de suelos
- Metodología para determinar perdida de suelo
- Evaluaciones de calidad de suelo
- Normativa ambiental sobre uso, manejo y conservación de suelos
- Técnicas de manejo y conservación de suelos

SINOPSIS

Los suelos son la base de la agricultura y el medio en el que crecen casi todos los cultivos destinados al consumo humano y animal. Los suelos proporcionan los nutrientes esenciales, el agua, el oxígeno y el sostén para las raíces de las plantas destinadas a la producción de alimentos, para crecer y florecer, además de intervenir en funciones fisiológicas. La calidad del recurso edáfico está directamente relacionada con la forma de uso y manejo, por lo que conocer los procesos que inciden de forma directa e indirecta en la degradación de este recurso se traduce en bienestar humano y ambiental. El establecimiento de proyectos, según el uso conforme de las tierras y basados en criterio técnicos, la implementación de obras de conservación, el establecimiento de proyectos de producción de alimentos de manera sostenible y el manejo adecuado del suelo, son ejemplos de estrategias de una gestión sostenible de las tierras.





OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

OBJETIVO GENERAL

Describir los diferentes procesos que provocan la degradación de los suelos, así como las diferentes prácticas que existen para un manejo adecuado del recurso edáfico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Al finalizar el estudio del presente capítulo, el educando estará en capacidad de:

1. Identificar los factores de degradación del suelo y el manejo que se puede realizar para mejorar la calidad de este en un ecosistema
2. Estimar la importancia de la evaluación de calidad de suelo y de los parámetros biológicos
3. Promover el uso conforme de las tierras para la protección del suelo.
4. Identificar las limitantes de uso de los suelos mediante la clasificación agrológica de las tierras.
5. Interpretar las condiciones de un terreno para el planteamiento de soluciones de manejo y conservación del suelo y las aguas.

CONCEPTOS CLAVE

- calidad de suelo
- salud de suelo
- degradación de suelos
- pérdida de suelo
- normativa ambiental
- manejo de suelo
- conservación de suelo
- Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)
- influencia del trópico
- suelos no disturbados
- suelo ideal





INTRODUCCIÓN

El manejo y la conservación del recurso edáfico actualmente está siendo orientado a un manejo preventivo en torno al panorama actual del estado de los suelos. Por una parte, los países se interesan en hacer cambios en las actividades productivas altamente dañinas con el fin de buscar una sostenibilidad adecuada para este recurso. Por otra, varios organismos públicos y privados se disponen a indagar estrategias adecuadas para usar adecuadamente el suelo, particularmente con planteamientos más integrales y que tomen en cuenta la dinámica hídrica en las regiones como el enfoque de planificación y uso de suelo por cuencas hidrográficas. Mediante este tipo de manejo, los países se pueden asegurar una planificación adecuada del suelo y del espacio en zonas rurales y urbanas, que promueva la protección integral de los recursos.

El proceso de manejo y conservación de los suelos debe estar acompañado del establecimiento de normativas enfocadas en buenas prácticas agropecuarias para una mejor gestión de los suelos con usos agrícolas, que permitan la reducción de la erosión y el establecimiento de sistemas de producción menos degradadores. Para el mundo, y en especial Latinoamérica, el problema de degradación y erosión de suelos es severa; por ello, las políticas de los países se han estado actualizado con miras a la protección del recurso de forma integral. Sin embargo, es necesario acompañar este proceso con una gobernanza adecuada, una política económica integral e inversiones enfocadas en nuevas tecnologías que sean amigables con el ambiente y que protejan el estado del suelo. Dicho actuar no solo puede ser regionalizado, sino más bien debe ser dirigido por la comunidad mundial, ya que el mundo entero se debe comprometer para una gestión más sostenible del suelo y requiere una participación muy intensa de la población interesada, en especial el Gobierno y los agricultores en general.

La conservación y manejo de suelos recientemente agrega la restauración, como parte de los temas conversados en la 22^a Confe-





rencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP22) en Marruecos del 2016, donde la restauración y la estabilización de suelos brindaría beneficios a las comunidades y, además, el desarrollo sostenible ya involucra acciones de adaptación y mitigación contra el cambio climático, acceso al agua y al alimento.

La Alianza Mundial por el Suelo de la FAO indica que hay un vacío a nivel global de la gobernanza del suelo y que, aproximadamente, 33% de los suelos mundiales están degradados. Ahora los dirigentes políticos de todo el mundo están explorando posibilidades con el fin de adoptar el desarrollo sostenible. Para ello, este grupo de trabajo estableció cinco pilares de acción importantes para la conservación del recurso:

- *Promoción del manejo sostenible del recurso suelo y gobernanza.*
- *Fomento de la inversión, cooperación, políticas, educación, concientización y extensión sobre el recurso suelo.*
- *Promoción del desarrollo y la investigación aplicada con enfoque en las brechas y prioridades identificadas.*
- *Mejoramiento de la calidad y cantidad de los datos e información de suelos.*
- *Armonización y establecimiento de guías voluntarias sobre métodos, mediciones e indicadores para el manejo y protección del recurso suelo.*

Por lo anterior, el desarrollo de actividades en torno a estos pilares ha generado una serie de proyectos significativos en cada uno de los países miembros con el fin de mejorar y monitorear el recurso. Cada país adscrito trabaja intensamente en la consecución de estos pilares; sin embargo, se sigue carente en la protección del recurso.

El tema de la conservación de los suelos y las tierras es muy amplio y en este capítulo se espera sintetizar sobre el estado actual de los suelos y las estrategias que se han establecido con miras al manejo preventivo de la calidad y conservación de suelos; asimismo, en esta unidad se busca proponer soluciones que ayuden a optimizar este recurso y evitar que la degradación de dicho bien sea ampliada.





I. **Calidad y salud del suelo**

La calidad del suelo es un concepto que se ha venido redefiniendo en el tiempo, por ejemplo, J. W. Doran y T. B. Parkin (1994), citados por Wagner Peña Cordero (2017, p. 216), definen un suelo de calidad como «aquel que puede mantener su productividad biológica, calidad ambiental y promueve el sano desarrollo de la flora y la fauna y del ser humano a través [sic] del tiempo».

El origen de la definición de calidad de suelo tiene sus primeros indicios en la creación de sistemas paramétricos y no paramétricos de evaluación de suelos, basados en factores limitantes como el caso del índice de Storie en 1933 y el de del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos: «Sistema de Clasificación de Capacidad Agrológica». También existen otros índices como el caso de Riquer, Bramao y Cornet difundido por la FAO en 1970, entre otros. Con el paso de los años, los sistemas evolucionaron para realizar sistemas de evaluación específicos basados en un uso en especial y a la vez se consideran sus limitantes y exigencias. De esta forma se introdujeron así las variables de fertilidad, propiedades físicas e incluso con parámetros socioeconómicos y de conservación de recursos, como el método desarrollado por Sys, el cual dio el paso para ir incorporando los criterios y conceptos de calidad y salud del suelo (BALLESTA Y GONZÁLEZ 2006, p. 127).

Por otro lado, M. R. Carter *et al.* (1997), citados por A. Bautista Cruz, J. Etchevers Barra, R. F. del Castillo y C. Gutiérrez (2004, p. 90), indican que calidad del suelo debe interpretarse como «la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo».

La calidad del suelo se mantiene mientras este cumpla con las funciones de «promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas [...] ; atenuar contaminantes ambientales y patógenos [...] ; y favorecer la salud de plantas, animales y humanos» (BAUTISTA CRUZ *et al.*, 2004, p. 90). A lo largo de los años, se ha acuñado el término de sostenibilidad del suelo, que está más relacionado con el mantenimiento de las funciones de tal recurso con el transcurso del tiempo y para las generaciones futuras.

Peña Cordero (2017, p. 214) agrega que «las funciones básicas de infiltración, degradación y producción de alimentos y hábitat como sustrato básico deben valorarse en los estudios de calidad





de suelo». Asimismo, es necesario hacer valoraciones de los servicios ambientales que se puedan cuantificar.

En la mayoría de los escritos el término de calidad y salud de suelos se consideran como sinónimos; no obstante, calidad de suelos va más relacionado el análisis de las propiedades características del suelo, las cuales se vinculan al estado del suelo para valorarlo en el tiempo con respecto a otros parámetros.

En el caso del segundo término, salud del suelo, se relaciona con la capacidad de mantener las funciones básicas o con el estado de indicadores como por ejemplo el contenido materia orgánica, diversidad de organismos y productos microbianos, que están más relacionados con el estado de las propiedades dinámicas del suelo en un momento o circunstancia determinada (BALLESTA Y GONZÁLEZ 2006, p. 129).

En ciertas ocasiones también estos términos se confunden con capacidad de uso de la tierra, el cual realmente es una metodología utilizada para definir usos adecuados y este representa un complemento de la salud del suelo que resultaría en calidad (BALLESTA Y GONZÁLEZ, 2006).

El fin primordial de la calidad y salud del suelo es mantener un equilibrio ambiental en el cual los trabajos que se lleven a cabo sobre este recurso sean realizados en óptimas condiciones y con buenas prácticas de manejo. Con base en el enunciado anterior se entiende que es imprescindible el uso sostenible de este y todos los recursos, con el fin de enfrentar las problemáticas actuales como lo es el cambio climático.

II. *Funciones del suelo*

En aras de desglosar el tema de calidad y degradación del suelo es necesario conceptualizar el tema de funciones del suelo. Diferentes científicos han trabajado en el tema de calidad y han tratado de distintas formas de desglosar el concepto en relación con la funcionalidad del recurso. El doctor Peña Cordero (2017) resumió dichas funciones del suelo en tres puntos:

- Capacidad de filtrar.
- Degradar los materiales orgánicos aplicados.
- Producir alimentos y mantener un equilibrio ambiental.



Además, podemos agregar: fuente de biodiversidad y recursos genéticos; fuente de patrimonio cultural; secuestrador de carbono y soporte del entorno urbano. Los científicos Raymundo Ballesta y Vanessa González (2006) Judith Prieto Méndez, Francisco Prieto García y Otilio Acevedo Sandoval (2013) agregan:

- Capacidad de disminuir la actividad contaminante por su competencia de filtrar y de favorecer la salud de las plantas, los animales y del ser humano.
- Además de producir alimentos, el suelo es un medio físico químico y biológico que alberga diversidad ecológica y genética y sostiene intercambios de agua, aire y energía.
- Regula la distribución del agua entre la infiltración y la escorrentía y normaliza el flujo de agua.
- Almacena y modera la liberación de los nutrientes de los ciclos de las plantas y otros elementos.
- Actúa como filtro para proteger la calidad del aire, el agua y otros recursos.
- Es el apoyo de estructuras y alberga riquezas arqueológicas asociados a la vivienda humana.
- Filtra, amortigua, degrada, inmoviliza y destoxifica sustancias orgánicas.

El uso irracional del suelo afecta negativamente las funciones antes descritas. Lamentablemente, el ser humano es el único responsable de la degradación del suelo, la desertificación y los cambios de clima extremos que actualmente se viven en el planeta.

III. *Degradación de suelos*

La escena mundial sobre el estado del recurso suelo no es muy favorable. La degradación de este recurso ha sido muy acelerada en los últimos 50 años y el efecto se amplifica por el efecto del calentamiento global y la pérdida de biodiversidad. La FAO (2016b) indica que en el planeta 25 % de las tierras están degradadas y 14 % de la degradación de las tierras se sitúa en Latinoamérica, donde Mesoamérica es una de las regiones más afectadas. Entre las causas más comunes de degradación de las tierras en la región se mencionan: la masiva pérdida de biodiversidad ocurrida en los años 50 por las políticas de expansión agropecuaria, así como las problemáti-





CONCEPTO

erosión. Proceso de pérdida de material por acción de viento o agua. Un ejemplo muy claro y evidente sobre erosión por acción del viento es cuando se visualizan nubes de polvo en los sectores donde recientemente se ha mecanizado el suelo y la región todavía se encuentra en la estación seca. La erosión por efecto del agua se puede observar al ver material arrastrado y depositado en la zona de menor pendiente, luego de algún evento de lluvia.

cas de **erosión** que se agravan ante las malas prácticas agrícolas y la aplicación intensa de agroquímicos que han sucedido en los últimos años. A estos hechos, se suma el fenómeno del sellado de los suelos, que aumenta de la escorrentía, al arrastrar sedimentos hacia los cursos de agua, e incrementar el impacto ambiental y los riesgos en la población a causa del crecimiento urbano.

La preocupación por la degradación y la calidad de los suelos no es reciente, se documenta desde 1953 y, actualmente, es clara la seriedad del panorama con respecto a los suelos. La FAO (2015), en sus últimas compilaciones sobre la degradación de los suelos, indica que cerca de 60 % de los suelos se encuentra en estado vulnerable a la degradación y a la pérdida de tierras por malas prácticas de conservación de suelos, hecho que se encuentra en acelerado aumento.

Es lamentable que el efecto de degradación de las tierras no se pueda ligar únicamente a las afectaciones económicas, puesto que influye directamente en las áreas sociales. A mayor detrimento, mayor dificultad para el acceso a recursos (tierra y agua) y muy triste que las mujeres y los agricultores con pocos recursos se vuelven los sectores más vulnerables, especialmente cuando la concentración de pobreza está en las zonas con mayor degradación (FAO, 2016a).

Por tanto, el trabajo en pro del desarrollo de prácticas de manejo, orientadas a las conservaciones de los suelos y de los recursos, es arduo. Hay que implementar estrategias de conservación de suelos para cada proyecto de desarrollo agrícola o inmobiliario, a fin de aprovechar, de forma sostenible, este recurso, además de asegurar para el futuro la calidad del suelo.

La calidad de los suelos, algunos años atrás, se determinaba por medio de las propiedades físicas y químicas; sin embargo, a partir de los daños ocasionados por las prácticas convencionales de agricultura, se redefine el concepto de calidad de suelo.

Se considera como degradación del suelo toda aquella modificación que conduzca a la pérdida de las funciones del suelo. El nivel de detrimento que presentan los suelos, se puede medir por medio de los índices y las propiedades sensibles a cambios funcionales en el recurso edáfico (PEÑA CORDERO, 2017). A nivel internacional, la FAO (2016b) define como degradación de suelo al cambio que se dé la salud del suelo como respuesta a una actividad antropogénica y



que el cambio en el suelo da como resultado un cambio en la capacidad productiva del ecosistema y de sus servicios.

Los procesos de degradación están también vinculados a un sistema complejo de fenómenos extremos: el clima y el cambio de uso del suelo. Según el proyecto de base de datos de Evaluación Global de la Degradación Humana del Suelo, de la FAO (GLASOD, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS) la degradación del suelo es un fenómeno inducido por el ser humano, que reduce la capacidad actual o futura de mantener la vida humana (GARDI *et al.*, 2014, p. 126).

Este término no solo involucra los efectos sobre el recurso del suelo, sino también sobre los otros recursos que interactúan en él, como el agua, además de los factores sociales y económicos.

En el pasado, los suelos de América Latina y el Caribe fueron muy afectados por las actividades que el sector agropecuario, urbanístico, turístico realizaron; y ahora esta situación se agrava en conjunto con los efectos que el cambio climático y la presión de los modelos de desarrollo que se ejercen sobre este recurso.

Según datos de Ciro Gardi (Y OTROS 13 EDITORES, 2014) la degradación es el principal problema que enfrentan los suelos de América Latina y el Caribe, y es mucho más acentuado en los países de México y Centroamérica. Por ejemplo, la erosión hídrica afecta 75 % de la superficie de El Salvador y hace que se pierdan 274,7 millones de toneladas por hectárea cada año en Guatemala. En Cuba, Honduras y la región andina colombiana, se reporta que 80 % de los territorios están afectados por algún proceso erosivo. El 49 % del territorio chileno se encuentra bajo distintos grados de erosión, lo que en Ecuador es muy similar; mientras que en las zonas andinas de Colombia, 80 % se encuentra afectado por la erosión.

En el continente americano, el sobrepastoreo, la agricultura mecanizada y la expansión urbana son los factores con mayor responsabilidad sobre la degradación del recurso edáfico. Como consecuencia de estos factores mencionados, se producen procesos de degradación más intensos, como sucede con la deforestación, al reducirse la fertilidad del suelo y disminuirse los rendimientos de las cosechas.

La aceleración de la degradación de los suelos se debe a la presión ejercida sobre este recurso, como consecuencia de la alta demanda global de alimentos. Ha resultado en la expansión de la



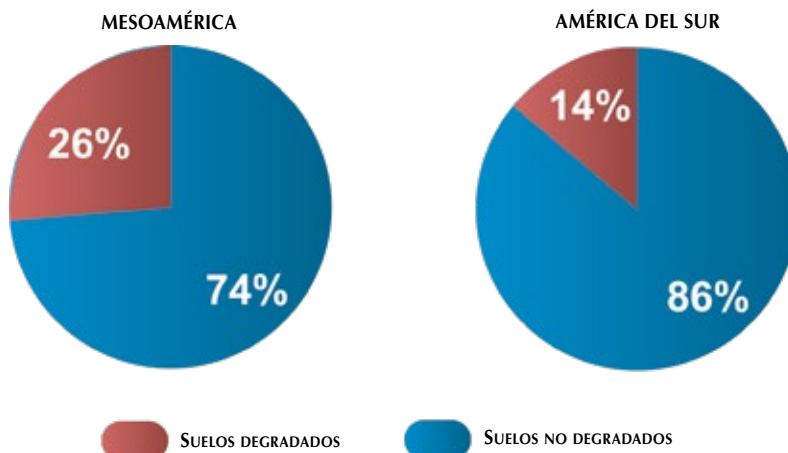
frontera agrícola y por ende se lleve a una pérdida de la cobertura vegetal importante. La pérdida de cobertura afecta la biodiversidad, los flujos de energía, la degradación del suelo y de los servicios ambientales que este ofrece. Según Ciro Gardi (y otros 14 editores más) (2014, p. 117), «desde el año 1990 a 2005, el porcentaje de cobertura vegetal en Latinoamérica y el Caribe ha disminuido de 24,1 a 23,2 %, siendo [sic] una de las regiones que registran las mayores pérdidas netas de bosque a nivel mundial».

En el *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe* (GARDI *et al.*, 2014) se resalta que la erosión, es la pérdida de carbono orgánico y la salinización, son las principales causas de degradación de suelos para la región. Para Benjamín Kiersch (2015), 26 % de los suelos de Mesoamérica están degradados y en general, la erosión se identifica como el principal factor de degradación; el cual no solo genera problemas ambientales, sino también económicos y de salud (FIG. 64).

FIGURA 64. DEGRADACIÓN DE SUELOS EN MESOAMÉRICA Y AMÉRICA DEL SUR.

Según el estudio de Kiersch, el porcentaje de suelos degradados en Mesoamérica es del 26 % y el de América del Sur es de 14 %. De acuerdo con los resultados, esta diferencia se adjudica a que, en suelos de alta productividad no hay buenas prácticas agroconservacionistas pues continuamente se presenta la explotación del recurso.

FUENTE: *Degrado de tierras manejo sostenible del suelo. Seguridad alimentaria. Una visión desde América Latina*, de Benjamín Kiersch (2015, p. 23). Reproducida con fines educativos.



Por ejemplo, Heberto Ramírez-Carballo y Aurelio Pedraza-Sandoval (2007), indican que las principales causas de la degradación de los suelos en México se deben al cambio de uso del suelo (25 %), al sobrepastoreo (25 %), a la deforestación (24 %), así como las prácticas agrícolas ineficientes que se llevan a cabo en las diferentes unidades productivas (16 %).

En el caso de los suelos de Costa Rica, se indica que 10 % del territorio tiene graves problemas de erosión en el suelo; relacionan al mal manejo y a la pérdida de la cobertura boscosa acaecida durante la década de 1970. Se estima que el país perdió cerca de 31 % de la cobertura boscosa debido a la expansión de la frontera agrí-



cola (CADETI, 2004, p. 17). Se identifican otros problemas importantes en el país como la compactación del suelo, por el sobrepastoreo y la mecanización; el primero degrada y promueve la pérdida del recurso suelo; en el caso de la automatismo, hay tratamientos de labranza reducida y labranza vertical que no promueven la pérdida sino el acondicionamiento adecuado; empero, se debe hacer un cambio de paradigma en la forma de mecanizar los suelos de los productores (GÓMEZ-CALDERÓN, SOLORZANO-QUINTANA Y VILLAGRA-MENDOZA, 2016).

Estas problemáticas se agravan por el crecimiento urbano en zonas altas que impermeabilizan los suelos, además de las particularidades propias del relieve del país como las pendientes pronunciadas y la alta pluviosidad existente, los cuales son factores naturales que incrementan la erosión. Los estudios del uso de la tierra y el estado de degradación han detectado áreas de sobreuso muy degradadas; en Costa Rica, esta situación se ha documentado especialmente en la zona de la Cuenca del Tárcoles y la Gran Área Metropolitana (GAM), las cuales son áreas prioritarias que trabajar en los temas de manejo y conservación de suelos (CADETI, 2004).

El cambio climático es otro factor que viene a influir sobre los procesos de degradación, ya que este componente incrementa las problemáticas actuales debido a los eventos climáticos extremos, especialmente en las zonas más expuestas y sensibles (frágiles). Aunado a ello, la falta de políticas sobre protección del recurso del suelo y el desconocimiento en la agenda política sobre el uso, manejo y conservación del recurso agravan el panorama nacional.

A. TIPOS DE DEGRADACIÓN DE SUELOS

La degradación de suelos se divide en dos categorías; por lo tanto, se debe distinguir entre la degradación natural del recurso y la degradación antrópica. Para una mejor visualización se presenta a continuación un esquema comparativo de ambos conceptos (FIG. 65, P. SIG.).

Los procesos de degradación del suelo son asociados a diferentes condiciones, tanto internas del suelo, como los cambios fisicoquímicos y biológicos del suelo; o externas como la pérdida de cantidad del suelo. El deterioro del suelo va en función de su productividad. Por lo tanto, una zona natural que se observa degradada e intervenida de forma antropogénica, pierde su productividad en el ecosistema (FIG. 66, V. P. SIG.).

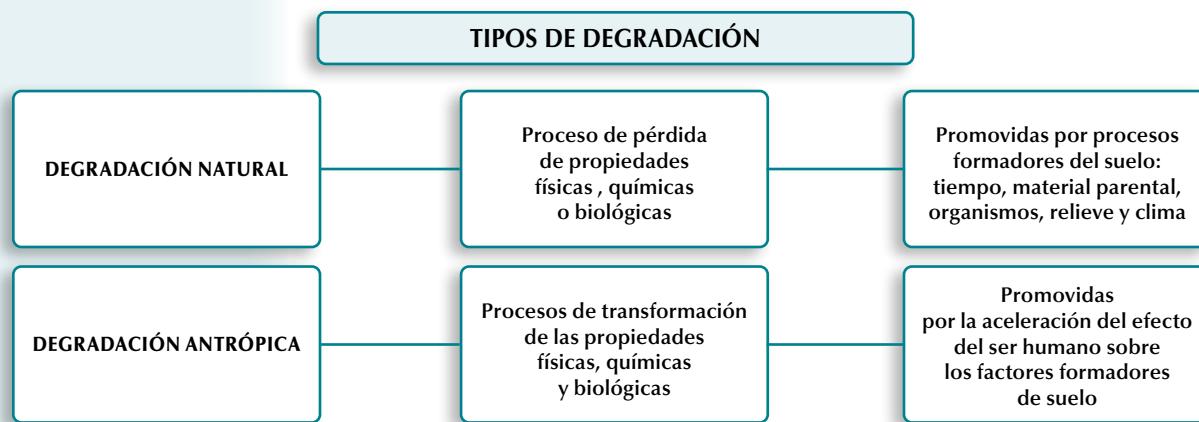
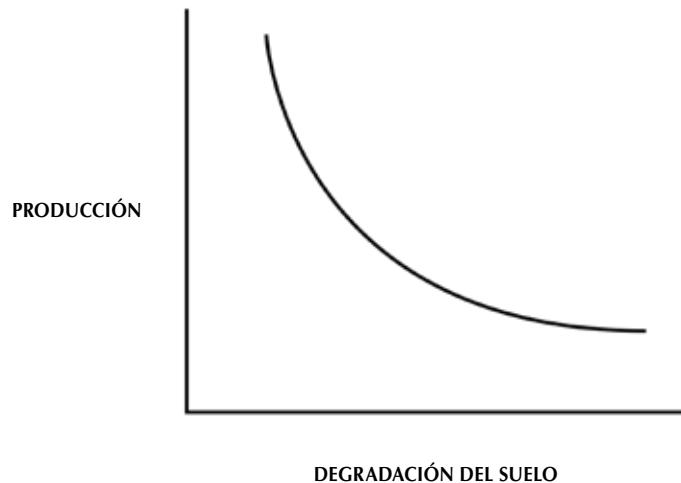


FIGURA 65. CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE DEGRADACIÓN. Existen dos tipos de degradación del suelo: natural y antrópica. Las dos corresponden a degradaciones promovidas por los factores formadores de suelo; no obstante, las degradaciones antrópicas se ven afectadas y aceleradas por los procesos que provoca el ser humano.

FUENTE: adaptada de «Degradación del suelo», de Enrique Barahona (2018).

FIGURA 66. PRODUCTIVIDAD SEGÚN LA DEGRADACIÓN DE UN SUELO. En la figura se puede evidenciar cómo un suelo degradado afecta directamente la producción; o sea, un suelo que ha sido explotado y sin prácticas adecuadas de manejo y conservación de los suelos, tendrá menos capacidad de producción y probablemente más necesidad de insumos.

FUENTE: *Evaluación preliminar del estado de contaminación en suelos de la provincia del Neuquén donde se efectúan actividades de explotación hidrocarburífera*, de Pedro Augusto Brissio (2005). Reproducida con fines educativos.



1. DEGRADACIÓN NATURAL

El proceso de degradación puede desarrollarse de forma natural o por efecto de las actividades humanas. La degradación natural del suelo ocurre, en la mayoría de los casos, por efecto de los procesos de formación de suelo, los cuales pueden generar cambios físicos, químicos y biológicos a lo largo del tiempo. Los cambios más comunes son la toxicidad por aluminio, al igual que los riesgos de erosión y alta fijación de fósforo. La hidromorfía, la baja capacidad de intercambio catiónico, la salinización o la sodificación son efectos que pueden provocarse por motivo de una degradación natural del suelo; sin embargo, estos se presentan en menos proporción.



2. DEGRADACIÓN ANTRÓPICA

La degradación antrópica se relaciona con las actividades humanas y esta puede estar reflejada en procesos de pérdida de la fertilidad, la contaminación y la erosión. Para una mejor comprensión del tema, se puntualizan, a continuación, las diferentes acciones que conllevan a tal fenómeno: degradación de la fertilidad, contaminación y erosión.

a) *Degradación de la fertilidad*

La degradación de la fertilidad es la disminución de la capacidad del suelo para soportar vida. Por esta acción se producen modificaciones en el recurso edáfico, en cuanto a las propiedades físicas, químicas, fisicoquímicas y biológicas que conllevan a su deterioro (Fig. 67).

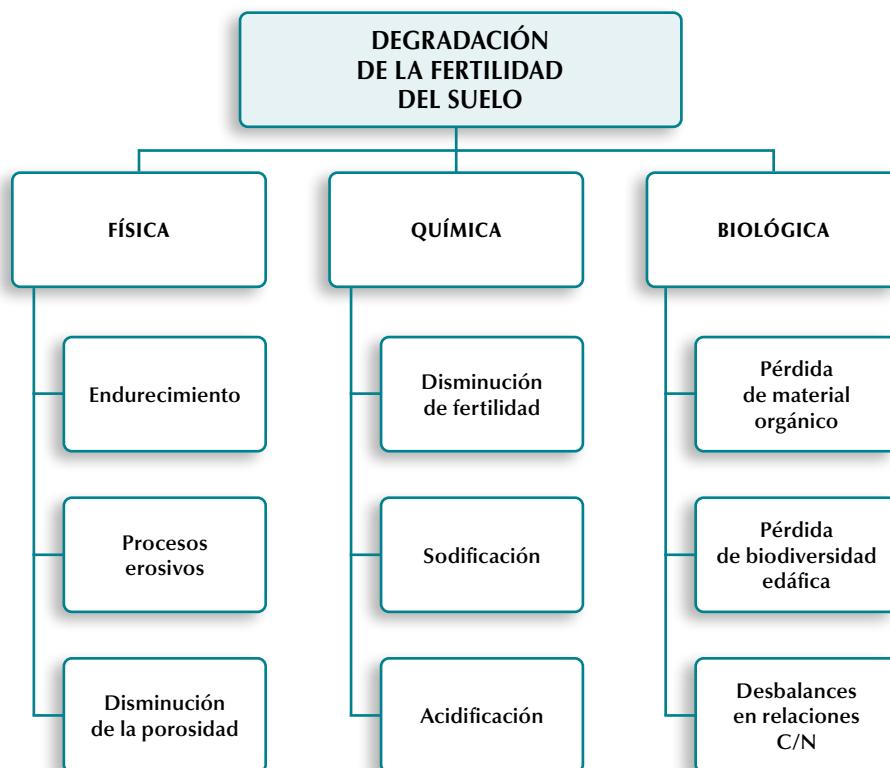


FIGURA 67. DIAGRAMA EXPLICATIVO DE LA DEGRADACIÓN DE LA FERTILIDAD DEL SUELO. La degradación de la fertilidad del recurso edáfico se puede dar por varios factores: físicoquímicos y biológicos. Muchos de ellos son asociados a las malas prácticas agrícolas que se desarrollan en las fincas productivas, al provocar, de esta manera, el desbalance nutricional y el empobrecimiento de los suelos. En el caso de la degradación física, puede ocurrir por un endurecimiento de los suelos, por procesos erosivos y la disminución de la porosidad. La degradación química sucede por una disminución de la fertilidad, la sodificación y la acidificación. Por otro lado, una degradación biológica se produce por la pérdida de materia orgánica y la biodiversidad edáfica, así como por consecuencia de los desbalances en la relación carbono-nitrógeno.

FUENTE: adaptada de *Edafología del trópico*, de Wagner Peña Cordero (2017) y *Manejo y conservación de suelos tropicales*, de Wagner Peña Cordero, Roger Muñoz Hernández y Carlomagno Salazar Calvo (2016). Reproducida con fines didácticos, bajo el permiso expreso de los autores.



Un ejemplo claro de degradación de la fertilidad es la pérdida de la materia orgánica, la cual acarrea graves consecuencias sobre la fertilidad y las propiedades físicas del suelo; debido a su afectación directa sobre la biota edáfica. Ese suceso también puede afectar directamente en la promoción de plagas y enfermedades en zonas agrícolas o boscosas.

La **salinización** perjudica directamente sobre la fertilidad del suelo; un aumento de la concentración de sales en la superficie tiene como consecuencia el daño sobre desarrollo normal de las plantas por toxicidad debido al exceso de dicho elemento. Lo mismo sucede con la alcalinización, la cual es el incremento de las sales de sodio con respecto a las sales de magnesio o, en su defecto, la presencia de calcio, lo que impide el desarrollo de las plantas.

Otro proceso importante que menoscaba la fertilidad es la **acidificación** del suelo, la cual, en consecuencia, disminuye o aumenta la biodisponibilidad de nutrientes, que pueden resultar en deficiencias o en toxicidad en las plantas, al igual que el perjuicio en la respiración microbiana.

La fertilidad también es dañada ante los **cambios en la densidad del suelo**, especialmente en las áreas donde hay un excesivo uso de maquinaria agrícola o por sobrepastoreo. El peso de la maquinaria o el pisoteo del ganado estropean directamente la densidad aparente del suelo, debido a que hay una reducción de la porosidad y una pérdida de la estructura del suelo. Al existir pocos espacios porosos, se crean suelos en forma de bloque. Tal situación reduce el movimiento del agua y el intercambio gaseoso, además de incrementar la dificultad para el desarrollo radicular y la disminución de la capacidad de intercambio catiónico.

b) *Contaminación*

Es un tipo de degradación química que tiene como consecuencia la pérdida parcial o total de la productividad del suelo. Este evento puede presentarse cuando existe algún tipo de acumulación de sustancias tóxicas que alteran los procesos biogeoquímicos normales del suelo. Cualquier residuo industrial o doméstico, proveniente de actividades humanas, puede generar contaminación del suelo, las cuales se presentan tanto en la superficie como debajo de esta.



Peña Cordero (2017) realiza una clasificación del tipo de contaminación del suelo, según las propiedades que son modificadas:

- Una **contaminación física**, relacionada con la modificación del funcionamiento de las propiedades físicas del suelo, puede estar relacionada con parámetros de temperatura, radioactividad y fuerzas de adhesión entre las partículas (estructuras).
En este tipo de degradación se imposibilita el funcionamiento adecuado, debido a que se afecta la capacidad de trasmisión de los fluidos, el volumen de almacenaje y, además, la modificación del balance adecuado del agua y los gases importantes, a fin de disolver los nutrientes que necesitan las plantas y los microorganismos (PEÑA CORDERO *et al.*, 2016).
- Una **contaminación química** se vincula a la adición de elementos o de compuestos en concentraciones que alteran el suelo; por ejemplo, los agroquímicos, los metales pesados, por depósitos de aguas industriales o negras, y los antibióticos. También se considera contaminación química a aquellos hechos indirectos que afectan sobre la acidificación o salinización del agua, como la aplicación excesiva de abonos o materiales orgánicos. Las afectaciones que interfiieren en la transformación de los residuos orgánicos que involucran procesos específicos como el reciclaje de nutrientes y la tasa de mineralización, así como la pérdida de carbono y la alteración de la actividad microbiana, son también acciones consideradas como contaminación química.
- Una **contaminación biológica** concierne a la introducción de especies patógenas. Es decir, el ingreso al sistema de alguna especie que se disemine y cree una afectación patológica en el suelo, la cual no puede luego ser eliminada fácilmente. Por ejemplo, cuando se aplican abonos orgánicos mal elaborados y contaminados en los campos, puede incorporar bacterias u hongos patógenos para plantas o animales e incluso para el ser humano. El mal manejo de las excretas animales o humanas podría representar una fuente de contaminación biológica en suelos, si no son bien manejados.

c) *Erosión*

El término erosión se refiere al proceso de pérdida de material por arrastre de partículas del suelo por acción del agua o del viento, el cual puede ser exacerbado por las malas prácticas de manejo.

La erosión es el tipo de degradación más común y, asimismo, es considerada la de más impacto en las zonas donde existe mayor con-





centración de áreas con pendientes muy pronunciadas, como es el caso de América Central, la región de los Andes, entre otras (UNESCO, 2010).

Por su parte, la erosión del suelo se puede clasificar según su origen en dos tipos: la natural y la antrópica (o también conocida como acelerada).

1º) EROSIÓN NATURAL

La erosión natural ocurre, valga la redundancia, por el efecto natural, debido a los procesos de formación de suelos y en el que es afectado, principalmente, por el relieve, el clima, la vegetación y los suelos.

2º) EROSIÓN ANTRÓPICA O ACELERADA

La erosión antrópica está relacionada con la intervención del ser humano. Dicho proceso acelera la erosión natural, debido al mal uso y manejo de los suelos como, por ejemplo, no usar curvas de nivel, y la siembra en zonas no aptas, las prácticas intensivas de producción sin obras de conservación de suelo, entre otras.

Ambos tipos de erosión tienen como agentes causales: el viento o el agua. Según Jorge Núñez Solís (2001, p. 109), la erosión eólica se presenta en las regiones que tienen un régimen pluvial estacionalmente seco y que están sujetas a la acción de vientos fuertes: aquellos que superen los 40, 50 o 70 km/h se consideran erosivos porque son capaces de poner en suspensión las partículas del suelo y a la vez transportarlas hacia otras regiones.

Otra causa de la erosión es el cambio del uso del suelo de bosque a monocultivos, como por ejemplo las plantaciones forestales. Estos cambios tienen un impacto en el recurso edáfico debido a que incurren en la preparación del terreno con maquinaria y en la que hay una eliminación de la vegetación original, introducción de especies exóticas y quema de residuos. Y durante el crecimiento de la plantación se da un aumento de escorrentía superficial de las aguas pluviales, ocasionando movimiento de partículas de suelo.

Una vez finalizado el ciclo productivo, existe también un impacto importante sobre el suelo debido a que se deja el suelo desnudo nuevamente y el impacto de la maquinaria que ha ocasionado un deterioro importante en las propiedades que puede favorecer a los procesos erosivos.





Los tres mecanismos por los que se lleva a cabo este tipo de erosión son: en **suspensión**, por **saltación** y por **desplazamiento paulatino**. Sin embargo, en el caso de la erosión antrópica es el ser humano quien acelera los procesos que activan los agentes causales.

La erosión hídrica es provocada de forma directa por la agresividad de las lluvias, debido a sus características de intensidad, duración y frecuencia. Dicho tipo de erosión se ve severamente intensificado en zonas montañosas y con mal manejo de los suelos y con poca cobertura vegetal.

La erosión hídrica se subclasiifica, según la forma erosiva que se presente en el suelo; a saber: laminar, por surcos, cárcavas, en terracetas o por deslizamiento del material o remoción en masa (*FIG. 68*). El tipo de erosión hídrica que se presente está relacionado con el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo.

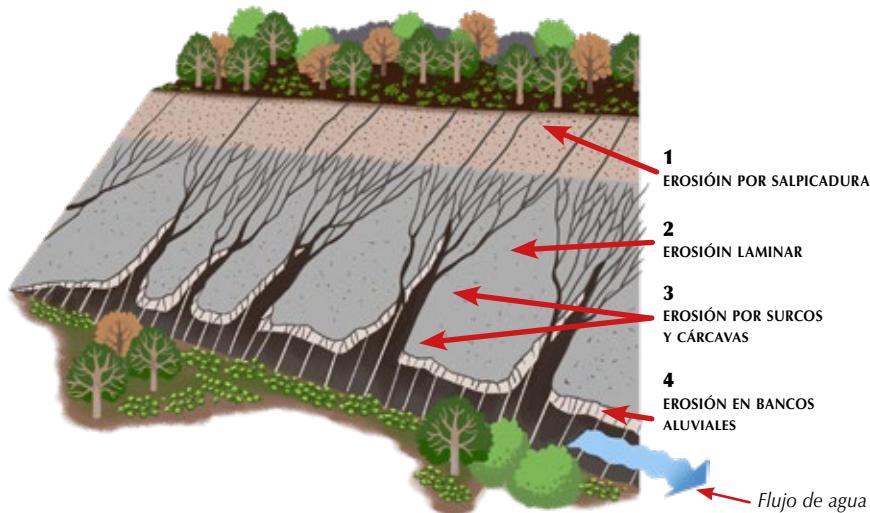


FIGURA 68. CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE EROSIÓN. Los distintos tipos de erosión en el suelo se observan en la ilustración: laminar, por surcos y cárcavas, por terracetas y por remoción en masa. Tales procesos erosivos son comunes en distintas zonas debido al mal manejo de los suelos y por la ausencia de obras para la conservación.

FUENTE: adaptada de *Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la Región de Coquimbo, Chile*, de Roberto Pizarro, Carolina Morales, Leonardo Vega, Claudio Olivares, Rodrigo Valdés y Francisco Balocchi (2009, p. 17). Reproducida con fines didácticos.

A continuación, se describen los tipos de erosión hídrica:

- **Erosión laminar.** Es la erosión superficial, en donde se pierde una capa fina y uniforme del suelo. Este evento es el más común en situaciones lluviosas normales; ocurre cuando existe movimiento de la capa superficial de suelo, y deja como evidencia su arrastre en la zona baja del terreno.
- **Erosión por surcos.** Sucede cuando hay remoción de partes del suelo, en forma de canales pequeños. Este tipo de erosión sucede especialmente cuando hay falta de cobertura vegetal y tienden a visualizarse las formaciones de canales de mejor forma luego de eventos lluviosos moderados.



- **Erosión por cárcavas.** Cuando existe una pérdida de grandes cantidades de suelo. El efecto erosivo en cárcavas está muy relacionado con la falta de cobertura vegetal y por las malas prácticas de conservación de suelos.
- **Erosión en terracetas.** Se produce por efecto de la presencia del ganado sobre el suelo. Se indica que es en forma de terracetas, debido a que en el terreno se forman pequeñas terrazas en curvas en las zonas de pendiente por el efecto del pastoreo. Este proceso sucede especialmente en potreros ubicados en zonas de pendientes y por el mal manejo de pasturas y la rotación del ganado.
- **Erosión por deslizamiento o remoción en masa.** Movimiento en masa pendiente abajo de suelo o roca por acción directa de la gravedad. El término de «remoción en masa» engloba las expresiones de deslizamiento, derrumbe avalancha, flujo de barro y hundimiento, que están relacionados con los procesos coluviales (IRIONDO 2006, p. 86). Generalmente, esas acciones tienen que ver con la gravedad, como agente de transporte; no obstante, son situaciones que se pueden agravar si se presentan condiciones de saturación del suelo, sismo, deforestación o situaciones de erosión extremas.

3º) FACTORES QUE PROPICIAN LA EROSIÓN Y SUS CONSECUENCIAS

Son varios los factores que contribuyen a la erosión, como la más común de las degradaciones de mayor impacto en el suelo. Entre ellos destacan el clima: viento, temperatura y precipitación; el tipo de suelo: textura, estructura, porosidad y relieve; la ausencia de vegetación y el uso y manejo del suelo.

Como consecuencia de dichas circunstancias, hay varios efectos y las consecuencias del deterioro del suelo, entre las que destacan: la pérdida de cultivos, suelos y terrenos; el menoscabo de la calidad de la capa más fértil del suelo en detrimento de la superficie arable y, a su vez, la disminución de la capacidad productiva del terreno y el efecto social en las poblaciones más vulnerables. Existen problemas en el manejo de aguas que atentan contra la estabilidad del terreno, ante eventos intensos de lluvia y, en consecuencia, se provocan efectos sobre la diversidad y los ecosistemas al destrozar el bosque y el hábitat de muchas especies; lo anterior incluye la contaminación de la cuenca hidrográfica por la gran cantidad de sedimentos, y la disminución de la capacidad hidráulica, entre otros.



A continuación, se describen los factores que contribuyen a la erosión:

- **Clima.** Es uno de los factores que influyen en la erosión del suelo, donde la precipitación, el viento y la temperatura inciden e incrementan el desgaste de la superficie. En zonas donde las precipitaciones son de prominente intensidad, ocurren con frecuencia y tiene una alta duración, condicionan a los terrenos a ser más susceptibles a ser erosionados. Lo mismo sucede con el viento, el cual, según la dirección e intensidad en una región, puede agravar los problemas erosivos. En el caso de la temperatura, esta puede afectar sobre la ruptura de materiales rocosos, situación que puede provocar desprendimientos de material, luego de que la roca se reviente por acción de la fluctuación de la temperatura (efecto de dilatación y contracción del material) (Hudson, 2013).
- **Vegetación en el suelo.** Este factor ejerce mucha influencia en los procesos erosivos porque en los suelos desnudos la escorrentía superficial aumenta y, por ende, incrementa la tasa de erosión, especialmente donde la pendiente es alta.
- **Tipo de cobertura vegetal y sus características.** Es una circunstancia que ejerce gran influencia sobre el control de la erosión en un terreno. Corresponde a una práctica cultural de gran importancia, para la conservación del suelo, ya que utiliza barreras, ya sea muertas o vivas, o incorporadas como abonos verdes, en procura de proteger al suelo de los diferentes procesos erosivos.
- **Tipo de suelo.** Corresponde a otro factor influyente sobre la erosión, ya que, según el perfil de suelo, texturas, estructuras y porosidad, puede verse mayor o menor la afectación. Las texturas más gruesas son susceptibles a desprendimientos de materiales en lluvias más intensas; las arenas más finas son más susceptibles a erosionarse. Los suelos de texturas arcillosas son menos susceptibles a la erosión, pero sí hay movimiento de material cuando están saturados, ya que las partículas empiezan a flotar y se movilizan. Los más susceptibles son los suelos intermedios, ya que el limo es fácilmente movilizado.
- **Uso y manejo del suelo.** Es un agente que también promueve la erosión, especialmente cuando se le realiza un manejo intenso. En el caso de las tierras agrícolas, son muy susceptibles porque el uso intensivo de maquinaria agrícola y la disminución del material orgánico provocan una pérdida de la estabilidad (estructura) y, por ende, mayor erosión; además, de la nula instalación de obras de conservación de suelos que prevengan el movimiento, tales como



terrazas, canales guardia, adecuados sistemas de drenaje y diseño de sistemas de riego de alta eficiencia, para evitar escorrentía.

Como se expuso al inicio del subapartado, varias consecuencias pueden ocurrir por los efectos de la erosión; de seguido se describen cada una de ellas:

- **Pérdida de cultivos, suelo y hasta terrenos.** En procesos erosivos intensos, se puede desprender parte o todo el terreno y deslizarse pendiente abajo o depositarse en un cauce del río, con perdidas de cultivos, suelo y el terreno.
- **Merma de la calidad y de la producción de cultivos.** Al existir pérdida de los primeros centímetros del suelo, se presenta también pérdida de la capa más fértil, lo que se traduce en una disminución de la producción y de la calidad.
- **Detrimiento de la capa arable.** Conforme persistan las malas prácticas de manejo, la pérdida del suelo va a ser más intensa y con el tiempo se genera un detrimento de la capa arable.
- **Problemas de manejos de aguas.** El mal manejo de aguas dentro de un terreno complica la estabilidad del suelo en eventos de lluvia intensos, a causa de que la ausencia de drenajes en fincas provoca movimientos de agua sin control al provocar procesos erosivos por volumen de agua y velocidad. Por ende, se perderá el suelo, los cultivos e incluso el terreno.
- **Consecuencias sociales por problemas en disminución de capacidad productiva.** Al existir la pérdida de calidad y productividad de suelos, existen menos cosechas y menos ingresos a la economía familiar. Estas dos condiciones ocasionan efectos sociales importantes en los sectores más vulnerables como las personas ubicadas en pobreza extrema, mujeres o adultos mayores.
- **Efectos sobre la diversidad y los ecosistemas por pérdida de hábitats de especies.** En los procesos erosivos de más intensidad puede existir un gran riego sobre los ecosistemas naturales, debido a que, a nivel de una cuenca hidrográfica, si existe un mal manejo de los terrenos en la zona alta de cuenca, se puede exponer a toda la región a los efectos de erosión por remoción en masa, al devastar el bosque y el hábitat de cantidad considerable de especies.
- **Contaminación por sedimentos en ríos, pérdida de capacidad hidráulica de estos y el consecuente riesgo de inundaciones en las partes bajas de las cuencas.** Retomando el ejemplo de la cuenca hidrográfica, los efectos por depósitos de sedimentos en el cauce del río traen importantes efectos sobre él, con el deterioro de la calidad de las aguas



CUADRO 26

FACTORES O CIRCUNSTANCIAS QUE CONTRIBUYEN
LA EROSIÓN Y SUS CONSECUENCIAS

FACTOR O CIRCUNSTANCIA	DESCRIPCIÓN	EFFECTOS
Clima	<ul style="list-style-type: none">Precipitación: duración, intensidad, frecuencia.Temperaturas: mínima y máxima.Viento: velocidad y dirección.	<ul style="list-style-type: none">Pérdida de cultivos, suelos y terrenos por efecto de la escorrentía superficial y el movimiento del suelo.Pérdida de la capa más fértil del suelo (horizonte A).Problemas en el manejo de aguas que atentan contra la estabilidad del terreno, ante eventos intensos de lluvia.Efectos sobre la diversidad y los ecosistemas cuando hay movimientos de tierra, pérdidas de cobertura y alteración del ecosistema.
Vegetación	<ul style="list-style-type: none">Tipo de cobertura: sistema radicular.	<ul style="list-style-type: none">En los suelos desnudos la escorrentía superficial aumenta y, por ende, incrementa la tasa de erosión y el efecto se agrava cuando la pendiente es mayor.
Relieve	<ul style="list-style-type: none">Tipo de relieve.Porcentaje de pendiente.	<ul style="list-style-type: none">Contaminación por alta cantidad de sedimentos en ríos, pérdida de capacidad hidráulica de estos y el consecuente riesgo de inundaciones en las partes bajas de las cuencas.Detrimiento de la capa arable. Esto se produce conforme persistan las malas prácticas de manejo ya que la pérdida del suelo va a ser más intensa.
Suelo	<ul style="list-style-type: none">Perfil del suelo.Tipo de textura.Tipo estructura.Porcentaje de porosidad y tipo.Movimiento del agua (drenaje, escorrentía superficial).	<ul style="list-style-type: none">El tipo de suelo, corresponde a otro factor influyente sobre la erosión, ya que, según el perfil de suelo, texturas, estructuras y porosidad, estas pueden verse afectadas en grado mayor o menor.Las texturas más gruesas son susceptibles a desprendimientos de materiales ante lluvias más intensas.Las arenas más finas son más sensibles a erosionarse.Los suelos de texturas arcillosas son menos dispuestos a la erosión, pero si existe movimiento de material cuando estos están saturados, en vista de que las partículas empiezan a flotar y, por el efecto, se movilizan.Los más delicados son los suelos intermedios, ya que el limo es fácilmente movilizado.
Uso	<ul style="list-style-type: none">Tipo de actividadPrácticas de manejo y conservación del suelo.	<ul style="list-style-type: none">En el caso de las tierras agrícolas, son muy susceptibles porque el uso intensivo de maquinaria agrícola y la disminución del material orgánico provoca una pérdida de la estabilidad (estructura) y, por ende, mayor erosión.Altas huellas constructivas, en zonas de uso agropecuario, impermeabilizan el suelo y provoca menos área de infiltración y problemas con la escorrentía superficial. De la misma forma, el manejo inadecuado de las aguas pluviales en los terrenos provoca una pérdida del mismo.La falta de instalación de obras de conservación de suelos que prevengan el movimiento del agua, como terrazas, canales guardia. Así como la falta de instalación de sistemas de drenaje y diseño de sistemas de riego de alta eficiencia intensifican el proceso de escorrentía.

en el cauce del río y, subsecuentemente, la vida en torno a él. Adicionalmente, se incrementa el riesgo por inundación en las zonas bajas.

El Cuadro 26 resume los factores y las circunstancias que contribuyen a la erosión y sus consecuencias:

FUENTE: adaptado de *Manejo y conservación de suelos tropicales*, de Wagner Peña Cordero, Roger Muñoz Hernández y Carlomagno Salazar Calvo (2016). Reproducido con fines didácticos, bajo el permiso expreso de los autores.

B. PRÁCTICAS INADECUADAS EN EL MANEJO DEL SUELO

Se han mencionado diferentes formas de degradación en el suelo y sobre los diferentes efectos de la erosión en el suelo. Poco a poco, se ha introducido el efecto de la falta de cobertura y las



malas prácticas de manejo que llevan a la degradación; sin embargo, este tema es amplio y varias prácticas se realizan erróneamente sobre el suelo, las cuales se deben de analizar, a fin de evitar o intervenir su ejercicio como las indicadas a continuación:

- **Sobrepastoreo.** Esta práctica, en la producción agropecuaria, prevé aumentar el número de animales por hectárea, a pesar de que no exista disponibilidad de alimento. Así aumenta el pisoteo del área, compacta el terreno y, además, debilita la recuperación de las pasturas, pues genera problemas de infiltración de agua e incrementa los procesos erosivos como las terracetas en el suelo.
- **Deforestación.** Una de las prácticas más comunes que conlleva a la problemática de degradación del recurso edáfico actual. La pérdida de cobertura vegetal en los suelos incrementa su degradación.
- **Quemas.** Al igual que la deforestación esta es otra de las prácticas comunes en los sistemas de producción agropecuaria, por generar grandes pérdidas de cobertura, con la consecuente aceleración de los procesos erosivos.
- **Cultivos en laderas.** El efecto de la preparación y siembra de cultivos en laderas en los trópicos hace que se aceleren los procesos erosivos. Preferiblemente, no se deben sembrar cultivos en terrenos de pendiente mayor a 30 %.
- **Labranza intensiva.** Aquellos sistemas de producción intensiva son más propensos a la degradación del suelo, especialmente si no se hacen obras de conservación de suelos y si persisten los procesos de mecanización entusiasta. Idealmente, se prefieren sistemas de producción orgánica, bajo sistemas de labranza mínima y el uso de coberturas vegetales en suelo.
- **Uso irracional de insumos agropecuarios químicos.** Los insumos agropecuarios alteran las propiedades químicas del suelo, como es el caso de los fertilizantes: sales que afectan el pH y la capacidad de intercambio catiónico. El uso de abonos en exceso puede provocar salinidad y contaminación de mantos acuíferos, por ende, degradación del recurso. En el caso de otros elementos como plaguicidas, estos pueden contaminar aguas y ocasionar grandes efectos sobre la flora y la fauna edáfica y circundante, crear desbalances en el medio y ocasionar la aparición de plagas y enfermedades.
- **Mal manejo de insumos orgánicos.** En ocasiones el mal empleo de insumos orgánicos también puede ocasionar grandes daños en el suelo. El ejemplo más claro es la aplicación de los residuos orgánicos.



cos que, de acuerdo con las fuentes y los controles en los procesos de compostaje o fermentación, pueden resultar en un desbalance en la relación C/N o contaminaciones biológicas.

- **Cambio en la tenencia de la tierra.** El paso de la tenencia de la tierra de pequeños productores a grandes productores o multacionales ha ocasionado un fuerte aumento en la degradación de los suelos, debido a que la capacidad de preparación del terreno y los procesos productivos de estas grandes empresas difieren de los sistemas implementados por los pequeños productores que, en consecuencia, tienden a degradar el suelo.
- **Falta de ordenamiento territorial** con un enfoque de cuenca hidrográfica ha encadenado múltiples problemas de degradación de tierras. Altos porcentajes de coberturas que impermeabilizan el suelo en zonas de alta fragilidad ambiental y el crecimiento urbano desordenado también incrementan el problema de degradación.
- **Cambios de uso de los terrenos.** Así como los sistemas de agricultura convencionales han degradado el suelo, el cambio de uso de suelo agrícola a finalidad urbana, también tiene su efecto negativo sobre éste. La compactación, la falta de zonas de infiltración y el sellado de los suelos por altas coberturas de las edificaciones, provocan un deterioro en el recurso, al igual que un aumento en la escorrentía superficial que afecta a nivel de cuenca.
- **Falta de política pública** para la protección del recurso edáfico y de las tierras, da como resultado poco interés en la gestión integral de los recursos y en la conservación de estos.
- **Falta de planificación** del territorio con miras a la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático.
- **Falta de la integración** de la planificación de las tierras uso agro-ecológico en la planificación del territorio.



ATENCIÓN

El índice por Método Racional (IMR) es un modelo empírico en el que cada una de las variables está representada por un factor cuantificado, que se basa en la determinación de la escorrentía en una cuenca en un evento de lluvia. Este método va en función de las condiciones físicas del suelo (textura, estructura, relieve y geología) y los factores externos (lluvia, y cobertura vegetal).

IV. *Metodología para determinar pérdida de suelos*

Existen diversas metodologías que son diseñadas para determinar la pérdida de suelo. El método más usado es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS), pero existen otros, menos conocidos, como el **Índice por Método Racional** (IMR).

La ecuación universal fue diseñada por Walter H. Wischmeier (1911-2001) y Dwigh D. Smith (1905-1995), aparte de otras instituciones



de agricultura de los Estados Unidos. Dicha metodología, por medio de la instalación de parcelas experimentales, localizadas en Norteamérica, logra determinar, por medio de un índice indirecto, la pérdida de suelo (PEÑA CORDERO *et al.*, 2016).

El índice que se diseñó se plantea con la siguiente fórmula:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Donde:

A = Pérdida media anual de suelo por unidad de superficie, expresada en unidades seleccionadas para K y el periodo comprendido en R, expresada en ton/ha-1/año-1.

R = Factor de erosividad y escurrimiento expresado en MJ (mega joule) cm/ha-1/hora.

K = Factor de erodabilidad expresada en ton ha h ha-1 MJ-1 cm-1.

L = Factor de longitud de pendiente, adimensional.

S = Factor de gradiente de pendiente, adimensional.

C = Factor de cobertura, adimensional.

P = Factor de práctica de conservación.

- Según Peña Cordero *et al.* (2016), la erosividad está determinada por la influencia de la lluvia sobre la erosión de los suelos: la lluvia genera un desprendimiento de partículas de suelo que por más pequeña que sea la gota, genera una separación de partículas que pueden ser arrastradas por la escorrentía. El suelo está determinado por la energía cinética de la lluvia, por lo que este factor se establece mediante dos características de la lluvia: la energía cinética y la intensidad máxima, durante 30 minutos.
- La erodabilidad es el factor (K) en el que se identifica la vulnerabilidad o susceptibilidad del suelo a la erosión y está relacionado con las características físicas y químicas de este.
- El factor de longitud (L) de la pendiente tiene que ver con la influencia del relieve y, a su vez, está relacionado con el volumen del agua que pasa por la pendiente.
- El factor S, el cual es la gradiente de pendiente, está vinculado con la gravedad en el movimiento del flujo del agua (velocidad de movimiento del flujo).
- El factor C de cobertura se liga a la protección del suelo, ya que mientras mayor cobertura, menor será el impacto de la lluvia sobre el suelo.



ACTIVIDAD

Con el fin de repasar acerca de los factores utilizados en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés), se recomienda consultar la unidad didáctica *Manejo y conservación de suelos tropicales*, de Wagner Peña Cordero, Roger Muñoz Hernández y Carlo Magno Salazar Calvo, publicada por la editorial de la UNED en 2016.



- Y, por el último, el factor P se relaciona con las prácticas de conservación de suelos realizadas en el área. Esta se da según la relación esperada de pérdida de suelo entre una parcela con práctica de control de la erosión y otra sin prácticas conservacionistas.

Entonces, podemos indicar que los factores A, R, K son derivados de fórmulas que se expresan en unidades, ya sea de longitud, tiempo, área o fuerza. El factor de pendiente se determina en forma de porcentaje, si se toma en cuenta la longitud y el grado de inclinación. Los factores de manejo de la cobertura y de las prácticas de conservación son estimados con base en parámetros indirectos.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) ofrece la ventaja de que se emplea para condiciones específicas del uso de la tierra. Además, puede ayudar a orientar a seleccionar sistemas de producción de cultivo enfocados en la conservación del suelo. Por otra parte, este sistema permitiría relacionar los datos de pérdida de suelo, con lo que resultaría un cambio de uso del suelo en el territorio de una cuenca (PEÑA CORDERO *et al.*, 2016).

No obstante, este sistema de evaluación ha recibido varias críticas, especialmente por la complejidad de su aplicación. Igualmente los valores para los coeficientes fueron determinados en parcelas de diferente región; por tanto, para ambientes tropicales podrían estarse subestimando los valores, principalmente por la intensidad de las lluvias tropicales.

Además, Peña Cordero *et al.* (2016) indican que dicha ecuación se recomienda para evaluaciones a largo plazo y que el diseño de la secuencia no contempla la producción de sedimentos en un área. Los valores determinados para cada factor no presentan tampoco valores absolutos, ya que fueron establecidos en parcelas con condiciones específicas.

A pesar de ello, algunos países han realizado estudios sobre la pérdida del suelo al utilizar la ecuación universal; sin embargo, algunos científicos han optado realizar estudios específicos por factor; es decir, realizar investigaciones enfocadas en alguno de los componentes de la ecuación. Por ejemplo, solo investigar sobre el valor de C, para realizar evaluación de coberturas en una cuenca o territorio específico, sin realizar el estudio completo con todos los factores.



EN LA RED...

DETERMINAR
PÉRDIDA DE SUELOS

Con el fin de repasar sobre otros métodos, puede incursionar en la obra *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía*, de N. W. Hudson, editado por la FAO, en 1997, específicamente en lo que corresponde al capítulo séptimo: «Estimaciones a partir de modelos». Para ello, puede acceder al documento, gracias a la siguiente dirección: <<http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s09.htm#modelos> para calcular la pérdida de suelo> o dé lectura al primer código QR, bajo estas líneas.

Además, para conocer sobre las técnicas isotópicas en estudios de degradación de suelos, puede revisar el artículo de Juan Luis Rouanet M., Inés Pino, Ana María Prada y Adriana Nario, «Efecto de tres sistemas de manejo de suelo en la eficiencia fisiológica de uso de nitrógeno fertilizante en trigo», publicado en la revista *Agricultura Técnica* en 2001. Accédalo mediante la dirección siguiente: <https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0365-28072001000400008> o dé lectura al segundo código QR, bajo estas líneas.



El método racional es otro de los índices diseñados para calcular la cantidad de la escorrentía en función de las condiciones físicas del suelo (textura, estructura, relieve y geología) y factores externos (lluvia, y cobertura vegetal) (PEÑA CORDERO *et al.*, 2016).

Este índice se calcula de la siguiente manera:

$$Q = CIA / 360$$

Donde:

Q = volumen o caudal de la escorrentía ($m^3 \bullet s^{-1}$).

C = coeficiente de escorrentía (adimensional), se expresa en forma decimal y está relacionado con pendiente del terreno, la textura, la vegetación, la infiltración y la capacidad del suelo en retener agua.

I = intensidad de la lluvia por unidad de tiempo ($mm \bullet h^{-1}$).

A = área del terreno o la cuenca en estudio (Ha, m^2).

Existen otras metodologías para determinar la pérdida de suelo. Se basan en observaciones en campo, recolección de datos en parcelas experimentales o simuladores, o con el uso de técnicas isotópicas para ver el arrastre de nutrientes y determinar la degradación química en los suelos.

No esta de más indicar que el estudio de pérdida de suelo y de degradación debe ser integral y el concepto de cuenca debe estar conformado en todo momento, ya que la pérdida de suelo y degradación no solo se presentan por eventos específicos en un terreno, sino más bien como la suma de eventos de la cuenca, subcuenta o microcuenca.

v. *Evaluaciones de calidad de suelo*

Después de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo o Cumbre para la Tierra, en Río de Janeiro de 1992, se determinó la necesidad de formular metodologías para determinar el estado de los recursos naturales y, de ese modo, monitorear cambios ocurridos y ayudar a realizar un mejor análisis del panorama mundial de los problemas para atender de manera eficaz la aplicación de nuevas estrategias. Ante tal panorama, se desarrollaron metodologías específicas para el análisis, con el fin de evaluar el impacto de las actividades sobre los recursos



y en especial en el del suelo, en la cual se generalizaron el uso de índices o indicadores para la evaluación de calidad de suelos o manejo sostenible (BALLESTA Y GONZÁLEZ, 2006).

Para valorar los indicadores que determinan un suelo de calidad, primero se analizan los elementos de sostenibilidad, los cuales involucran los aspectos sociales, ambiental y económico. Este último discrepa muchas veces del objetivo pues los aspectos económicos sobresalen ante los ambientales y para el cumplimiento de los servicios ecosistémicos que este recurso (el suelo) ofrece, las condiciones financieras se deben hacer a un lado o buscar un punto neutral, ya que se trata de asegurarse un futuro para la vida en el planeta.

Por medio de los indicadores se describen los procesos del ecosistema y se integran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; asimismo, se deben reflejar los atributos de sostenibilidad que se quieren medir; por lo tanto deben ser sensibles a variaciones del clima y del manejo del suelo y, al mismo tiempo, ser reproducibles.

Peña Cordero (2015, pp. 225-227) acuña de John W. Doran y Timothy B. Parkin (1994), Carmen Trasar-Cepeda *et al.* (2000) y Franklin Rosales *et al.* (2008), los siguientes indicadores:

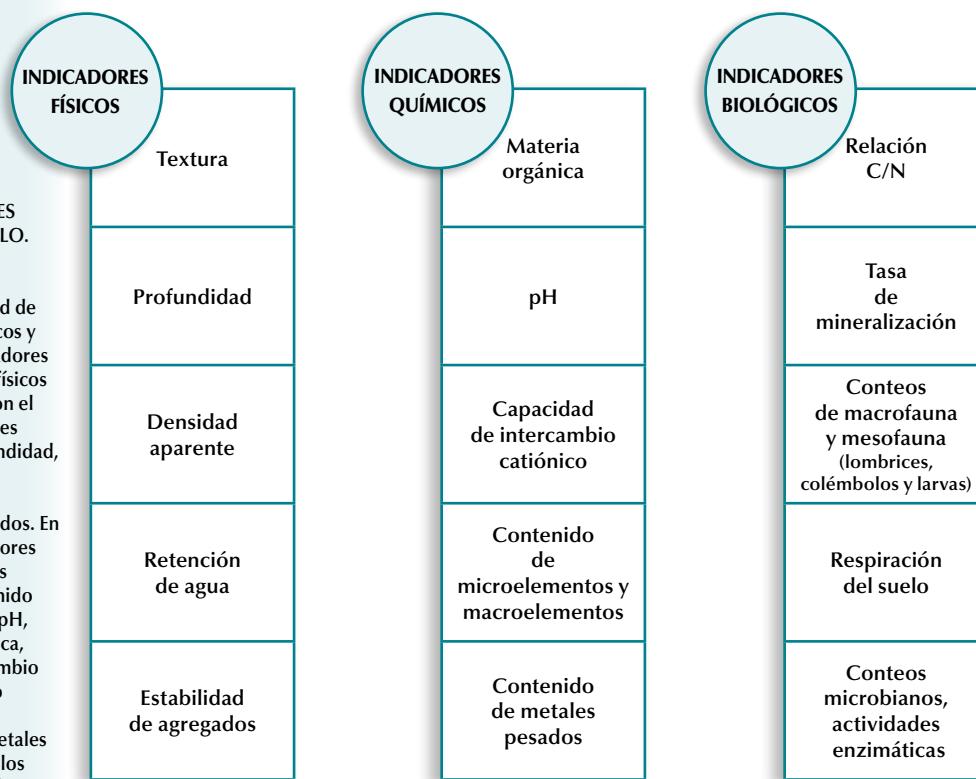
- **Indicadores físicos.** Se refiere a los siguientes: textura, profundidad, densidad aparente, estabilidad de agregados y capacidad de retención de agua.
- **Indicadores químicos.** Corresponden al contenido de materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico y contenido de microelementos, macroelementos y metales pesados.
- **Indicadores biológicos.** Se consideran los de más peso dentro del ecosistema. Estos se refieren a la relación C/N, tasa de mineralización, respiración del suelo, conteos microbianos, actividades enzimáticas, conteos de macrofauna y mesofauna (lombrices, colémbolos y larvas). Para medir tales cambios en el suelo se pueden usar diferentes índices; de acuerdo con lo citado por los autores M. J. Singh y K. L. Khera (2009), el uso de los índices para calificar la degradación del suelo es de gran importancia, en razón de que agrupan el efecto de varias propiedades, lo cual le da un peso específico a cada una, conforme a su funcionamiento en el suelo. Los índices toman en cuenta atributos o propiedades que reflejan aspectos de la producti-



vidad o funcionalidad ambiental. También son utilizados para determinar si la calidad del suelo se mantiene estable o que disminuye debido a un proceso de degradación (Fig. 69).

FIGURA 69. INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO. Se pueden definir tres categorías, como indicadores de calidad de suelos: físicos, químicos y biológicos. Los indicadores de calidad de suelos físicos están relacionados con el análisis de propiedades como: textura, profundidad, densidad aparente, retención de agua y estabilidad de agregados. En el caso de los indicadores químicos son aquellos que evalúan el contenido de materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico y contenido de microelementos, macroelementos y metales pesados. En cuanto a los biológicos son relación C/N, tasa de mineralización, respiración del suelo, conteos microbianos, actividades enzimáticas, conteos de macrofauna y mesofauna (lombrices, colémbolos y larvas).

FUENTE: investigación y propuesta de Paola Brenes Rojas, en 2017.



Durante años, se han desarrollado manuales o sistemas de evaluación de suelos a fin de designar su calidad, como la Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo (USDA, 1999), útil para implementarse en cualquier parte del mundo. Y también existen guías para interpretar la calidad de suelo en ambientes agrícolas específicos, como es el caso del manual que se desarrolló con la finalidad de determinar la calidad de suelo en agroecosistemas de café (ALTIERI Y NICHOLLS 2002).

A. GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD Y LA SALUD DE USDA

La *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo* evalúa y toma en cuenta las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En el caso de las propiedades físicas analizadas, incluye la densidad aparente, el contenido de agua, la velocidad de drenaje, el desleimiento y las estimaciones morfológicas. Entre las propiedades biológicas estudiadas se encuentran: respiración del suelo y



lombrices. Las propiedades químicas abarcan: pH, conductividad eléctrica (CE) y niveles de nitratos (USDA, 1999).

1. PROPIEDADES FÍSICAS

De acuerdo con la guía (USDA; 1999, p. 57), la densidad aparente del suelo puede servir como un indicador de la compactación y de las restricciones al crecimiento del sistema radicular, así como de la resistencia a la penetración y la capacidad de retención de humedad. Se trata de una propiedad dinámica que varía según la estructura del suelo, y que puede ser fácilmente alterada por los sistemas de siembra, pisoteo de animales, maquinaria agrícola y clima o por el impacto de las gotas de lluvia.

Cuando las capas del suelo están compactas, en general presentan una alta densidad aparente (resistencia a la penetración mayor a 1,5) (CASTILLA, 2013) e inhiben el movimiento del aire y del agua a través del suelo. Las densidades aparentes del suelo varían entre 1,0 y 1,7 g/cm³ y, generalmente, aumentan con la profundidad en el perfil. En aquellos suelos que contienen altas proporciones de arcillas expandidas las densidades aparentes fluctúan con el contenido del agua.

Otro parámetro evaluado en la guía es el desleimiento del suelo, el cual es el proceso de fragmentación que ocurre cuando los agregados son repentinamente inmersos en agua. Este fenómeno ocurre porque los agregados no son suficientemente fuertes como para soportar el estrés producido por la veloz absorción del agua (USDA, 1999, p. 72).

El test de desleimiento funciona a partir de rangos de estabilidad. Se establece un rango de 0 a 6, para un suelo bien estable y 0 o 3 si son relativamente inestables. La clase 4 indica cierta estabilidad, pero muy poca resistencia. Clase 5 y 6 representan fragmentos o agregados de suelo relativamente estables. También se puede utilizar un equipo medidor de estabilidad de agregados. Este equipo mide la resistencia de la estructura del suelo contra las fuerzas destructivas del suelo, tanto de forma mecánicas o físicas por procesos de laboreo.

2. PROPIEDADES BIOLÓGICAS

Entre las propiedades biológicas que se evalúan se determina la respiración del suelo, la cual se realiza mediante la medición de

EN LA RED...

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD

Para obtener más información sobre estos sistemas de evaluación de la calidad del suelo, se le recomienda localizar los siguientes documentos:

- *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica (USDA, por sus siglas en inglés). Puede accederlo en la siguiente dirección: <https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf>.
- «Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales», de Miguel A. Altieri y Clara Inés Nicholls, publicado en la revista Manejo integrado de plagas, n.º 64, en 2002. Puede accederlo en la siguiente dirección: <<http://repositorio.bibliotecaorto.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6866/A2039e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

Accédalos a las direcciones indicadas o dé lectura al código QR, en el orden correspondiente.





la producción de dióxido de carbono (CO_2) como resultado de la actividad biológica en el suelo; es realizada por microorganismos, raíces vivas, y macroorganismos, tales como lombrices, nemátodos o insectos (USDA, 1999, p. 52).

La actividad ideal de un suelo es de 35,84 a 71,68 kg C (en CO_2) /ha/d, el cual es un indicador de un suelo en estado ideal de actividad biológica y presenta adecuada materia orgánica y activas poblaciones de microorganismos (USDA, 1999, p. 53).

Los conteos de lombrices son otra propiedad biológica indispensable de determinar, ya que las poblaciones de lombrices pueden variar de acuerdo con una serie de características del sitio donde se encuentren y, generalmente, se relacionan con suelos sanos. Se indica que 100 lombrices/ m^2 corresponde a un suelo sano para zonas agrícolas y, en sistemas de pastoreo rondan 500 lombrices/ m^2 . La presencia de lombrices en el suelo incrementa la actividad de los microrganismos edáficos y la fertilidad del suelo; así mismo, la mejora de otras propiedades físicas del suelo.

3. PROPIEDADES QUÍMICAS

El pH es uno de los parámetros de las propiedades químicas que más se utilizan como indicadores de suelos, ya que afecta la disponibilidad de los nutrientes, la actividad de los microorganismos, y la solubilidad de los minerales presentes en suelo.

Los nitratos del suelo (NO_3^-) son una forma inorgánica de nitrógeno asimilable por las plantas, el cual es producto de la mineralización de compuestos orgánicos; sin embargo, no representan problemas en la calidad del medio hasta que estos se lixivien (movimiento de sustancias solubles a través del perfil del suelo) a aguas más profundas, que pueden ser dañinas para animales o personas.

La conductividad eléctrica es otro de los parámetros evaluados. En general, los valores de la CE 1:1 de entre 0 y 0,8 dS/m son aceptables para el crecimiento de muchos cultivos.

B. PROPUESTA DE CALIDAD DE SUELO SEGÚN ALTIERI

En Centroamérica por haber países altamente productores de café, los investigadores en agroecología Miguel A. Altieri y Clara



Inés Nicholls desarrollaron un sistema para evaluar los suelos de áreas cultivadas de café. A fin de acceder a este sistema, es necesario buscar y revisar el siguiente material: «Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales», de los autores mencionados (2002).

La evaluación de los suelos es primordial para desarrollar los planes remediales del recurso. Todos los seres vivos dependen de los recursos naturales para sobrevivir y uno de estos es el suelo. Actualmente, la conservación de suelos es de interés público. En la mayoría de los países, debe considerarse tanto en el ordenamiento territorial como en el desarrollo inmobiliario, áreas protegidas e incluso zonas verdes como los jardines de las casas de habitación; todo en el marco de una visión integral de manejo de una cuenca.

Según lo mencionado por Altieri *et al.* (1999), en su manual de agroecología, los diversos factores que determinan la calidad del suelo son esencialmente aquellas propiedades que ejercen más influencia en el crecimiento del cultivo. Muchas de estas propiedades no son fundamentales respecto de la fertilidad del suelo.

Los contenidos de sodio y arcilla expandible y la estabilidad agregada constituyen propiedades que influyen en la susceptibilidad de un suelo para desarrollar una costra superficial. Otras propiedades que afectan la calidad del suelo son: la profundidad disponible para la exploración de raíces, el pH, la salinidad, la capacidad de intercambio catiónico, el nitrógeno mineralizable, la presencia de patógenos y la biomasa microbiana del suelo.

Según ese mismo manual, la mejor manera para desarrollar un suelo de alta calidad es manejar el suelo y los cultivos para incentivar la estructura y mantenimiento de altos niveles de materia orgánica; incluso, el de una cantidad activa de la materia mencionada (ALTIERI *ET AL.*, 1999).

Además, el mismo autor establece que solo hay dos caminos para estructurar y mantener cantidades aceptables de materia orgánica en los suelos: aumentar la tasa de incorporación de materia orgánica a los suelos y disminuir la tasa de pérdida de materia orgánica.

Se crea la necesidad de establecer rotaciones de cultivos con el fin de mantener la diversidad biológica. El uso de leguminosas


EN LA RED...

OTRAS METODOLOGÍAS PARA CULTIVOS

Existe otra propuesta de metodología para cultivos; en específico es la *Guía de diagnóstico de la calidad y salud de suelos bananeros*, de Franklin E. Rosales (Ed.), Luis E. Pocasangre, Javier Trejos, Edgardo Serrano y Wagner Peña Cordero (2010), la cual propone el análisis de diversos indicadores para el diagnóstico de los suelos con cultivo de banano.

Si tiene interés en este valioso documento, puede accederlo en la siguiente dirección: <https://www.bioversityinternational.org/fileadmin/_migrated/uploads/tx_news/Guia_de_diagnostico_de_la_calidad_y_salud_de_suelos_bananeros_1375.pdf> o dé lectura al código QR, bajo estas líneas.



**ATENCIÓN**

Los manejadores de recursos naturales y agentes de cambio deben insistir en la conservación de los suelos y en la necesidad de un manejo adecuado de estos y, a la vez, servir de vigilantes para el desarrollo de estrategias aptas para la conservación y el manejo de los recursos naturales. Tener presente este enunciado como profesionales, beneficiará no solo a la mejora del recurso como tal sino también al apoyo de las problemáticas de deficiencia alimentaria, adaptación y mitigación al cambio climático y restauración de ecosistemas.

también aporta beneficios importantes al ecosistema y, además, mejora las propiedades físicas y químicas del suelo.

La labranza reducida adicionalmente evita el disturbio del suelo y, por ende, permanecen más estables los agregados del suelo. Por lo tanto, se deben asentar sistemas de siembra de labranza reducida o labranza cero para mantener la calidad del suelo. Esta última estrategia debe estar acompañada de prácticas de conservación de suelos como el uso de mulch y curvas a nivel, con miras a evitar problemas erosivos, entre otros, si la profundidad de la capa arable lo permite.

La labranza vertical es otro tipo de manejo que propicia la conservación del suelo. Consiste en evitar los implementos agrícolas de corte y volteo, que normalmente corresponden a arados de cinceles o subsoladores, azadas mecánicas (palín) y rastras rotativas (cuchillas sin ángulo de corte).

La determinación o evaluación de la calidad de un suelo no se puede ejecutar de forma puntual, sino que debe realizarse periódicamente a lo largo del tiempo para monitorear los cambios en las propiedades del suelo. Esto permitirá hacer comparaciones entre los sistemas de manejo, en la degradación sobre los valores propios o entre los valores de otras investigaciones o medios más conservados (zonas boscosas no intervenidas) y, con ello, revisar los efectos de las prácticas que se realizan sobre el recurso.

vi. *Normativa ambiental sobre uso, manejo y conservación de suelos*

**CONCEPTO**

manejo de suelos.
Prácticas que se hacen para modificar, mantener o mejorar las características químicas, físicas y biológicas del suelo, con el fin de optimizar su productividad y función ambiental y evitar su degradación o contaminación con el paso del tiempo.

Las normativas sobre el manejo y uso de los recursos en los países son primordiales para ayudar con la protección de los recursos naturales. Y cada día más los efectos de degradación son más evidentes en nuestros países, especialmente a causa del cambio climático.

Las últimas estadísticas indican que el cambio climático afectará negativamente en zonas donde las precipitaciones serán más extremas y habrá zonas donde los procesos de desertificación se acelerarán. Por consiguiente, la necesidad de establecer normativas pertinentes al uso, al **manejo y la conservación de suelos** es vital, particularmente si están enfocadas hacia la conservación de los servicios ambientales que se brindan y los otros recursos que allí se establecen.



En el caso del suelo se deben de tener muchas consideraciones, sobre todo por la variabilidad que lo suelos presentan y por los múltiples usos para este recurso. Muchos países han establecido leyes sobre el manejo y conservación de suelos desde hace décadas; sin embargo, en los últimos años muchos de los países han realizado cambios a las normativas hacia enfoques más integrados y más dirigidos a la población (FAO, 2002).

A. MARCO NORMATIVO DE USO, MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS: CASO COSTA RICA

Las normativas establecidas por algunos países del trópico destacan a Costa Rica, ya que desde 1985 el Gobierno ha trabajado en los temas de desarrollo sostenible y a partir de 1994 se aúnan esfuerzos en elaborar una metodología común para determinar la capacidad de uso de la tierra.

Esta normativa, en relación con el uso, el manejo y la conservación de suelos de Costa Rica, está vigente desde el 21 de mayo de 1998 bajo la Ley 7779, fue desarrollada con el fin de proteger, conservar y mejorar los suelos, y evitar la erosión y la degradación, por diversas causas naturales o artificiales. También es declarada de interés y utilidad pública la acción estatal o privada para el manejo integrado y sostenible de los suelos en armonía con los demás recursos y riquezas naturales en todo el territorio nacional. Esta ley no solo permitió establecer un mecanismo de manejo y conservación: creó una herramienta para estimular el desarrollo participativo de la agricultura de conservación (ALCR, 1998).

La determinación de la capacidad de uso de los suelos agroecológicos es una de las primeras propuestas utilizadas para reconocer y caracterizar los suelos y, a la vez, ponderar de manera sencilla distintas propiedades analizadas que determinaban la capacidad de un suelo para su uso adecuado. Muchas fueron las metodologías que desarrollan en esta línea. En el caso de la de Costa Rica adopta esta propuesta la cual es simple y práctica de aplicar en el campo; se usa para determinar prácticas adecuadas y para prevalecer la conservación de los terrenos agrícolas y forestales ante el desarrollo urbano del país.

Tal sistema también logra atender los conflictos de subutilización y sobreutilización de las tierras en el país y que puede ser como



CONCEPTO

agricultura conservacionista.
La utilización racional de las tierras para los fines de producción, busca aumentar la productividad para satisfacer las necesidades de la población, al evitar, reducir y controlar las prácticas y los procesos mediante los cuales ellas se degradan, por medio del uso de tecnologías capaces de cumplir con estos objetivos y adaptadas a los sistemas de producción locales (FAO, 1996, p. 5).



una herramienta base para plantear cualquier estrategia que conlleve el uso racional del recurso. Por ejemplo, definición de áreas de protección con incentivos y definición de zonas agrícolas según clasificación de tierras adecuadas; aunque no debe ser la única herramienta para definir aptitud de tierras para usos específicos. Representaría un uso importante en los planes de ordenamiento territorial del país, como una estrategia adecuada para la planificación de tierras agrícolas, que, por cierto, a nivel político Costa Rica se encuentra rezagada.

Para entender mejor sobre la ley en mención y su aplicabilidad se desarrollaron varias definiciones importantes en el Reglamento a la Ley 29 375 de Uso, Manejo y Conservación de Suelos publicado en el diario *La Gaceta* en el 2001, (ALCR, 2001), las cuales se explican a continuación:

- a) **Evaluación de tierras.** Proceso de clasificación mediante el cual se evalúan las cualidades de la tierra y se armonizan con los requerimientos de un tipo de uso definido, con base en sus características, potencialidades y limitaciones ecológicas y socioeconómicas.
- b) **Capacidad de uso de las tierras.** Grado óptimo de aprovechamiento de un área de terreno determinada, con base en la calificación de sus limitantes para producir cultivos en forma sostenida y por períodos prolongados.
- c) **Tierras agrícolas.** Tierras con capacidad para el desarrollo de actividades productivas agrícolas definidas según las clases de capacidad de uso establecidas en la «Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica» (ALCR, 1998)
- d) **Uso conforme del suelo.** Aquel uso del suelo que se ajuste a las normas consideradas en la «Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica» (ALCR, 1994) y a las normas técnicas de manejo y conservación del suelo establecidas en la Ley 7779 (ALCR, 1998).
- e) **Uso potencial de la tierra.** Uso que se le podría dar a la tierra una vez que se lleven a cabo las enmiendas y mejoras necesarias mediante prácticas racionales de manejo y conservación de suelos y aguas para lograr un beneficio social y de la tierra.

El Reglamento de la Ley de Uso, Manejo y Conservación, Decreto Ejecutivo 29 375, (ALCR, 2000) también define varios objetivos





en consonancia con las normativas que se definen en la ley, las cuales son importantes de destacar por su visión integral:

- **Impulsar el manejo**, la conservación y recuperación de los suelos en forma sostenida e integrada con los demás recursos naturales.
- **Establecer los mecanismos** apropiados para utilizar el recurso suelo en forma racional, en concordancia con los lineamientos de la legislación vigente en materia de ordenamiento territorial.
- **Facilitar los mecanismos** para la acción integrada y coordinada de las instituciones competentes en la materia.
- **Promover la planificación**, por medio de inventarios ambientales, para el aprovechamiento balanceado entre la capacidad de uso y el potencial productivo, al mejorar así las condiciones de vida de la población.
- **Fomentar la participación activa** de las comunidades y los productores, en la generación de las opciones sobre el manejo y la conservación de los suelos.
- **Promover la agroecología**, como forma de lograr convergencia entre los objetivos de la producción agrícola y la conservación de los recursos suelo y agua.
- **Incentivar el mejoramiento** y el desarrollo conservacionista de los sistemas de uso de los suelos, a partir de los principios enunciados en el Artículo 12 de la ley que aquí se reglamenta.
- **Impulsar el uso de las prácticas** comprobadas de manejo, conservación y recuperación de suelos en los sistemas de producción agrícola.
- **Propiciar las medidas** y criterios técnicos para el adecuado manejo de residuos de productos de fertilización y agrotóxicos.
- **Garantizar la conservación** de la biodiversidad y su empleo sostenible en el plan nacional y los planes de manejo, conservación y recuperación de suelos por área.
- **Velar porque los funcionarios** de las instituciones involucradas den cumplimiento de la ley que aquí se reglamenta.
- **Incentivar toda práctica** y manejo integral y sostenible del suelo.

En el Artículo 3 tanto de la Ley como del Reglamento se reconoce y se declara los suelos, como recurso natural, y constituyen el activo de mayor importancia patrimonial y productiva para la empresa agraria. Asimismo, en el Artículo 56 se deja muy claro que se respetara y

EN LA RED...

LEY 7779 Y NORMATIVAS

Se recomienda consultar los siguientes documentos:

- Ley 7779, Uso Manejo y Conservación de Suelos (ALCR, 1998): http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=26421&nValor3=96838¶m2=1&strTipM=TC&Resultado=2&strSim=simp
- Reglamento a la Ley 29 375 de Uso, Manejo y Conservación de Suelos (MAG-MINAE-S-HACIENDA-MOPT, 2000): <http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=46035&nValor3=97496¶m2=1&strTipM=TC&Resultado=2&strSim=simp>.
- Metodología Determinación Capacidad Uso Tierras Costa Rica. Decreto Ejecutivo 23 214 (Diario La Gaceta 107 del 6 de junio de 1994): <http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_norma.aspx?param1=NRM&nValor1=1&nValor2=17871&nValor3=69087&strTipM=FN>.





se reservaran los suelos agrícolas en la planificación del urbanismo. Ambos artículos conforman la base legal para el desarrollo de políticas de planificación e tierras de uso agroecológico y que con la metodología de capacidad de uso de las tierras se refuerza la metodología a utilizar desde la perspectiva físico espacial y ambiental.

B. METODOLOGÍA SOBRE LA CAPACIDAD DE USO DE LAS TIERRAS: CASO DE COSTA RICA

El proceso de planificación territorial, para el desarrollo de un área, requiere la estimación de la capacidad de uso de las tierras de uso agroecológico con el fin de determinar si es viable la actividad a realizar, así como sus potencialidades y limitaciones. La metodología para la determinación de la capacidad de uso de Costa Rica se establece en el Decreto Ejecutivo 41 960 MAG-MINAE, del 12 de noviembre del 2019, el cual sustituía una estructura establecida en 1994.

El sistema de determinación de capacidad de uso de las tierras nace con base en la metodología establecida en Estados Unidos por el Departamento de Agricultura, basado en los trabajos establecidos por Hugh Bennett en 1950 y Albert Klingebiel y P. H. Montgomery en 1961.

La metodología es adoptada en la mayoría de los países de América y llega a Costa Rica gracias a los programas de cooperación técnica con ese país del norte (NÚÑEZ SOLÍS, 2001).

Cada país modificó y adaptó la metodología e identificó factores específicos relevantes para la clasificación, al establecer rangos cuantitativos para cada factor, según condiciones de cada país, así como la inclusión de las variables de zonas de vida y de los sistemas potenciales de manejo.

Esta fue elaborada por el Centro Científico Tropical (CCT), basada en el *Manual de Conservación de Suelos* de la USDA. La misma metodología es utilizada para la clasificación de tierras de uso forestal y se emplea para definir zonas adecuadas o no para el establecimiento de una plantación forestal.

Recientemente se modificó la metodología de capacidad de uso de las tierras en el cual se integró la definición de los parámetros de clasificación de manera más clara para la determinación de



las unidades de tierra, así mismo se dispuso la obligatoriedad de realizar análisis químico de suelos en laboratorio para determinar la fertilidad cuantitativa de estos.

De la misma forma se incorporó el término de tierras de **uso agroecológico** con el fin de indicar que esta metodología solo deberá de ser utilizada para la determinación de la clasificación en este tipo de tierras.

El sistema de clasificación que rige actualmente establece una estructura, la cual comprende tres niveles: clases, subclases y la unidad de manejo.

El *primer nivel* es la clase de capacidad de uso, la cual se define como conjuntos de tierras que comparten condiciones similares en cuanto a sus limitantes y riesgo de degradación para su uso sostenible, que se divide en ocho (8) clases. Según su clasificación, así está determinado el uso que se puede desarrollar (*CDR. 27*).

CUADRO 27

CLASES DE CAPACIDAD DE USO DE SUELO

CLASE	CAPACIDAD DE USO DE SUELO
I	
II	
III	Desarrollo de cualquier actividad agrícola.
IV	
V	Se limita a cultivos semiperennes y permanentes.
VI	Los anuales se puede desarrollar únicamente en forma ocasional.
VII	Bosque, zona forestal, regeneración natural y protección.
VIII	No se permite ninguna actividad productiva, pecuaria o forestal solo para la protección de recursos.

CONCEPTO

uso agroecológico.

Actividad agraria (agrícola, pecuaria y forestal) o combinada con procesos de sostenibilidad de los recursos suelo, agua y vegetación, en relación con la ecología y el desarrollo.

FUENTE: *Manejo y conservación de suelos tropicales*, de Wagner Peña Cordero, Roger Muñoz Hernández y Carlomagno Salazar Calvo (2016). Reproducido con fines didácticos, bajo el permiso expreso de los autores.

En el *segundo nivel* se establecen las subclases de capacidad de uso, las cuales son grupos de tierras que pertenecen a una clase pero que poseen limitantes del mismo tipo. Estas se subdividen en cuatro subclases, las cuales se definen en suelo, drenaje, erosión y clima.

El *tercer nivel* es la unidad de manejo, la cual es la división de la subclase que indican los factores específicos que limitan su uso en actividades agropecuarias o forestales (*CDR. 28, V. P. SIG.*).

Estas tierras son lo suficientemente homogéneas como para requerir sistemas de manejo y conservación de suelos similares.



CUADRO 28

SUBCLASES, LIMITACIONES Y PARÁMETROS
PARA DETERMINAR LA UNIDAD DE MANEJO

SUBCLASE	LIMITACIONES	PARÁMETRO PARA DETERMINAR LA UNIDAD DE MANEJO
Suelo (s)	Relacionada profundidad efectiva, textura, pedregosidad, fertilidad y salinidad	Profundidad (s1) Textura (s2) Pedregosidad (s3) Toxicidad (s4) Fertilidad (s5) Salinidad (s6)
Drenaje (d)	Exceso o deficiencia de humedad en el suelo o por riesgos de inundación	Drenaje (d1) Riesgo de inundación (d2)
Erosión (e)	Perdida de suelo actual o futura	Pendiente (e1) Erosión sufrida (e2)
Clima (c)	Características climáticas que afectan el crecimiento de plantas	Zona de vida (c1) Periodo seco (c2) Neblina (c3) Viento (c4)

FUENTE: *Manejo y conservación de suelos tropicales*, de Wagner Peña Cordero, Roger Muñoz Hernández y Carlomagno Salazar Calvo (2016). Reproducido con fines didácticos, bajo el permiso expreso de los autores.

Entonces, para determinar la clase de capacidad de uso de un suelo se deben conocer de antemano ciertas características como: pendiente dominante, erosión, profundidad efectiva, textura del suelo, pedregosidad, fertilidad, toxicidad y salinidad, drenaje, riesgo de inundación nulo, zona de vida, periodo seco, neblina y viento.

Se puede usar la «Planilla de campo para la descripción de la capacidad de uso de las tierras» (VER ANEXO 2, AL FINAL DE LA OBRA), para la toma de datos en el campo y realizar la determinación de las unidades de manejo conforme la metodología.

Para ello, se debe realizar, antes de la clasificación, una muy detallada descripción de los suelos, la cual consta de:

- **Planificación previa al muestreo**, el cual incluye fotointerpretación, tipo y densidad de muestreo, material básico y escalas de la información primaria utilizada.
- **Observaciones en el campo** y, además, la apertura de una calicata y la realización de muestras por medio de barreno en el campo.
- **Descripción del suelo** según lo que se solicita en *Field Book for Describing and Sampling Soils* (Libro de campo para describir y muestrear suelos) y con base en las claves para la taxonomía de suelos (*Keys to Soil Taxonomy*), sistema USDA, mínimo a nivel de subgrupo.



ATENCIÓN

Se debe hacer notar que la capacidad de uso de la tierra no es la única metodología que se puede usar para realizar planificación territorial en una zona, ya que se pueden considerar otros factores importantes como vulnerabilidad al cambio climático, servicios ambientales, entre otros (LIANES, 2008).

Sin embargo, en el caso de Costa Rica, representa una herramienta legal para definir áreas de uso agropecuario y definir líneas de acción en los planes locales de ordenamiento territorial, como los Planes Reguladores.



A modo de ejemplo, se aporta el siguiente estudio de caso:



ESTUDIO DE CASO

ESTUDIO DE CASO 7

PLANTEAMIENTO

Una parcela agroecológica ubicada en la zona del Bajo de los Rodríguez, en San Carlos, Costa Rica, cuenta con las siguientes características:

Pendiente: 55 %, Erosión sufrida: moderada, profundidad efectiva > de 30 cm, textura franco-limosa (media), sin pedregosidad, fertilidad media, no hay toxicidad y salinidad, drenaje moderadamente lento, riesgo de inundación nulo y bh- T, neblina moderado y viento moderado.

PROBLEMA: ¿Cómo determinar, en este caso, la clasificación de la unidad de manejo?

DESARROLLO

Según las categorías presentadas en el Cuadro 29, Factores y limitantes para la evaluación de la capacidad de uso de las tierras se puede determinar la unidad de manejo, si se siguen los siguientes pasos:

- PASO 1. Analizar los datos y clasificar cada uno en la clase que le corresponde.
- PASO 2. Para definir esta clase se compara con la clase I y se define la clase para cada parámetro evaluado. La clase más alta o la de mayor limitante se le asignan como clase, que para este ejemplo sería VI (Cdr. 29, v. p. sig.).
- PASO 3. Posteriormente, se definen los otros factores limitantes, los cuales son los que van de acuerdo a los cuatro factores en estudio. Por último, se determina la unidad de manejo. Para las clases III a VII, el factor de mayor limitación que diferencia a una clase con la anterior se debe indicar con subíndices subrayado.

RESPUESTA

De acuerdo con el ejemplo, sería:

VIIe₁₂s₁₄d₂c₁₃₄

En la zona de clase VI Las tierras presentan severas limitaciones para el desarrollo de actividades agrícolas anuales y semiperennes, pecuarias, y constituye el nivel máximo en el que se pueden desarrollar actividades de producción forestal u otros cultivos perennes. Las plantaciones forestales que se establezcan en esta clase, deberán desarrollarse con prácticas de manejo adecuadas a las limitaciones de la tierra y los requerimientos de la especie.

Las limitaciones que presenta esta unidad están asociados al factor de erosión y su fertilidad principalmente.

Una vez obtenido el resultado de la determinación de la capacidad de uso de las tierras agroecológicas, se pueden consultar los anexos de la metodología y asociar, según la clase, las prácticas de manejo, la conservación y la recuperación de los suelos que se recomiendan.

Estas prácticas idealmente deberán ser tomadas en cuenta en los procesos de planificación territorial como lineamientos a seguir para el manejo correcto de los suelos, tomando en cuenta los aspectos agroecológicos y socioeconómicos específicos del área considerada. Así mismo, este resultado a escala cantonal será un instrumento en la toma de decisiones para definir las zonas con las mejores características para el desarrollo agropecuario y cuáles son las limitaciones que presentan las tierras para ese objetivo.



CUADRO 29
FACTORES Y LIMITANTES PARA LA EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE USO DE LAS TIERRAS

CLASES	PENDIENTE (%)	EROSIÓN	EROSIÓN			SUELO			DRENAJE			CLIMA		
			PROFUNDIDAD EFECTIVA (CM)	TEXTURA SUPERFICIAL (0-30 CM)	TEXTURA SUBSUELO (31-60 CM)	PEDREGOSIDAD	FERTILIDAD	TOXICIDAD DE COBRE	SALINIDAD	DRENAJE	RIESGO O INUNDACIÓN	ZONA DE VIDA	PERÍODO SECO	NEBLINA
e1	e2	s1	s2	s2	s3	s4	s5	s6	d1	d2	c1	c2	c3	c4
I	0-3 Plana o casi plana	Nula	>120 Muy profunda	Medias Mod. gruesas Mod. finas	Ausente	Alta	Nula	Nula a leve	Bueno	Nulo	bh-T, bh-P, bh-MB	Moderado	Ausente	Ausente
II	4-8 Ligeramente ondulada	Leve	91-120 Profunda	Mod. finas o Mod. gruesas	Finas	Ligeramente pedregoso	Media		Mod. lento o Mod. Exc.	Leve	bmh-T, bmh-P, bmh-MB	Ausente o fuerte	Moderada	Moderada
III	9-15 Moderadamente ondulada	Modera- damente	61-90 Moderada- damente profunda	Finas o muy finas	Muy finas	Moderadamente pedregoso		Leve		Moderado	bs-T, bmh-M	Muy Fuerte		
IV	16-30 Ondulada					Pedregoso	Baja							
V			31-60 Poco profunda	Gruesas	Gruesas	Fuertemente pedregoso			Moderada	Lento o excesivo	Severo		bp-P, bp-MB, bp-M	
VI	31-55 Fuerte- menie ondulada	Severa					Muy baja					Muy severo		
VII	56-75 Fuerte- menie escarpa- da								Fuerte					
VIII	>76 Fuerte- menie escarpa- da	Muy severa	≤ 30 Superfi- cial							Fuerte	Nulo	pp-SA		

FUENTE: Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras agroecológicas de Costa Rica (Decreto Ejecutivo 41960 publicado el 2/11/2019).



VII. **Técnicas de manejo y conservación de suelos**

Existe una serie de obras y actividades que permiten el manejo adecuado y la conservación de los suelos, en pro del mantenimiento del recurso a largo plazo y la conservación de los otros recursos que allí se desarrollan o interactúan.

Se han establecido diferentes prácticas: agroconservacionistas o comúnmente llamadas culturales, las prácticas estructurales o las prácticas mecánicas y las prácticas agronómicas, las cuales son actividades que buscan manejar adecuadamente el suelo, al tratar de eliminar que factores externos e internos minimicen la productividad de los cultivos que allí se desarrollan.

El principio de esas actividades es lograr mantener un estado adecuado del suelo al evitar lo siguiente: procesos erosivos con el manejo de las aguas y las coberturas; establecimiento de estructuras y la utilización de insumos como prácticas agronómicas para no provocar la degradación química y biológica del suelo.

Para estas prácticas, es necesario conocer la pendiente de los terrenos y en este apartado se revisará la forma de obtener medidas de pendiente.

A. PRÁCTICAS AGROCONSERVACIONISTAS O PRÁCTICAS CULTURALES

Tales prácticas culturales se derivan de prácticas tradicionales de manejo de suelos y se basan en una conducción adecuada de las aguas y del viento dentro de las fincas o terrenos, así como la implementación de estrategias de siembra para conservar el suelo: como las curvas de nivel, las cortinas rompevientos, las coberturas vivas o muertas y las fajas protectoras que se exponen a continuación:

1. CURVAS DE NIVEL

El establecimiento de las curvas de nivel es la definición de las líneas con puntos con igual de altitud, sobre el nivel del mar. Estas se trazan en terrenos agrícolas o forestales para definir líneas de siembra de manera opuesta al paso del agua de lluvia, con el fin de lograr disminuir la velocidad del agua y lograr una mayor infiltración. Para



el trazado de las curvas a nivel se usa el codal (nivel), que es una herramienta construida para realizar este tipo de curvas o desnivel (FIG. 70 Y 71). Específicamente, esta técnica se basa en el trazado de una línea madre en el terreno como guía, con el fin de seguir simultáneamente la demarcación de cada curva en todo el terreno. Estas líneas pueden estar a nivel o con pendiente no mayor a 1%.

El codal puede ser utilizado de la siguiente manera:

- Al iniciar el trazado se coloca una estaca y una de las patas del codal se ubica junto a ella, para luego, con la otra pata, buscar el punto de nivel. En este punto se hace una nueva marca y de seguido se reinicia con el proceso, sin olvidar poner otra estaca para de nuevo encontrar el nivel.
- Si se usa el codal preparado para definir una curva con pendiente de 1%, la pata del codal debe ser más corta y esta es donde se pone directamente la estaca; con el pie largo se busca el nivel, se coloca otra estaca y así sucesivamente.
- Luego de terminar la primera línea, la curva de nivel puede corregirse levemente, si hubiese algún detalle fuera de línea.

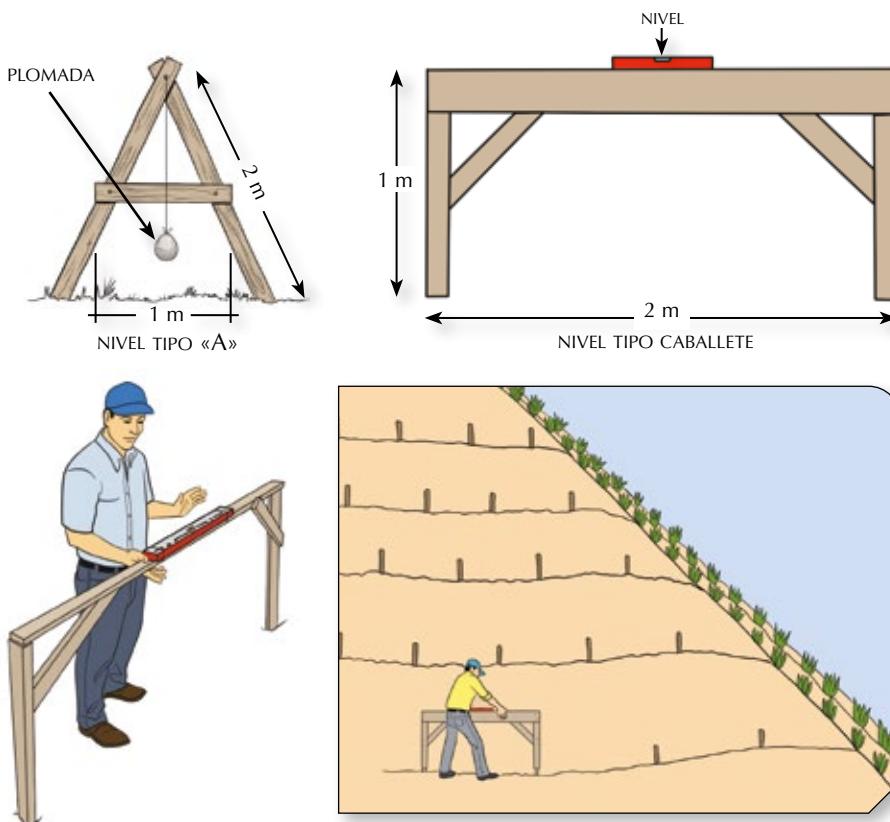


FIGURA 70. CODAL COMO INSTRUMENTO PARA REALIZAR CURVAS DE NIVEL. El codal es una herramienta que se usa para determinar las curvas en una pendiente. La figura muestra como en terrenos con pendiente se utiliza el codal para trazar las curvas y establecer las siembras a contorno.

FUENTE: *Manejo y conservación de suelos tropicales*, de Wagner Peña Cordero, Roger Muñoz Hernández y Carlonagno Salazar Calvo (2016, p. 159). Reproducido con fines didácticos, bajo el permiso expreso de los autores. ILUSTRACIONES: José Francisco (Franco) Céspedes.



FIGURA 71. CURVAS DE NIVEL.
En la zona alta de Cartago se puede observar, al establecer curvas de nivel, la mejor manera para el cultivo de la zanahoria.

FUENTE: «Efecto del rastrojo de *Crotalaria spectabilis* Roth en la germinación y crecimiento del Piáta *Brachiaria brizantha* cv. BRS Piáta, durante el establecimiento de pasturas sostenibles en San Carlos, Alajuela», de Emmanuel Chaves González (2015). FOTOGRAFÍA: Cortesía de Emmanuel Chaves González, 2015.

2. COBERTURAS

Las coberturas son otras prácticas culturales implementadas en la agricultura y son, particularmente, de gran importancia para la conservación del suelo. En los sistemas de producción agrícola, se utilizan diferentes tipos de cobertura: muertas, abonos verdes y vivas, los cuales se describen de seguido:

a) Coberturas muertas

Esta práctica consiste en aplicar e incorporar al suelo aquellos residuos o rastrojos de diferentes cosechas. Se pretende evitar que el salpique de la gota arrastre el material y, además, que haya un reciclaje de los macronutrientes y micronutrientes, que contienen los tejidos de los diferentes residuos aplicados al suelo (FIG. 72).

FUENTE: «Composición y estructura de la vegetación de la línea de costa de un bosque tropical seco, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica», de Paola Brenes Rojas (2013) y «Efecto del rastrojo de *Crotalaria spectabilis* Roth en la germinación y crecimiento del Piáta *Brachiaria brizantha* cv. BRS Piáta, durante el establecimiento de pasturas sostenibles en San Carlos, Alajuela», de Emmanuel Chaves González (2016). FOTOGRAFÍAS: cortesía de: Paola Brenes Rojas (2013) (Izq.) y Emmanuel Chaves González (2016) (Der.).



FIGURA 72. COBERTURAS MUERTAS. A) Vetiver en sistemas de producción hortícola, zona de Guanacaste. B) Aplicación de desechos de banano y raquis de banano picado como cobertura muerta en el cultivo de Musáceas en la zona Atlántica.



b) Abonos verdes

Según Núñez Solís (1985), los abonos verdes corresponden a la siembra de materiales vegetativos, especialmente leguminosas, que cumplen primero con una función de cobertura como material vivo y, luego, como material muerto. También se denominan como coberturas vivas.

El fríjol terciopelo (*Mucuna pruriens var. utilis*) se destaca como la especie más utilizada como abono verde, en cultivos de maíz tradicionales en Centroamérica (específicamente en Honduras, El Salvador y Nicaragua), al igual que en otros programas de desarrollo en el mundo (PRAGER MOSQUERA *et al.*, 2012) (FIG. 73).

FIGURA 73. COBERTURA DE ABONOS VERDES. Cultivo de *Mucuna pruriens* para ser incorporada al suelo como abono verde, antes de sembrar tubérculos en la zona de San Carlos, Costa Rica.

FUENTE: «Efecto del rastrojo de *Crotalaria spectabilis* Roth en la germinación y crecimiento del Piatá *Brachiaria brizantha* cv. BRS Piatá, durante el establecimiento de pasturas sostenibles en San Carlos, Alajuela», de Emmanuel Chaves González (2016). FOTOGRAFÍA: Emmanuel Chaves González (2016).



c) Coberturas vivas

Se prefieren coberturas vivas con leguminosas porque aportan nitrógeno al suelo, por medio de la simbiosis con bacterias del género *Rhizobium*. Este tipo de plantas son sembradas dentro del cultivo, con el fin de que cubran el suelo y, a la vez, más reciclaje de elementos como el nitrógeno, el fósforo y el azufre.

Según Simón Anderson *et al.* (1997), citados por Barry Pound (1998), en América Latina se presentan diferentes cultivos con gran variedad de coberturas vivas (CDR. 30).



CUADRO 30
COBERTURAS VIVAS UTILIZADAS EN AMÉRICA LATINA

CULTIVO PRINCIPAL	CULTIVO DE COBERTURA	PAÍS / REGIÓN
Maíz	<i>Canavalia ensiformis</i>	México
	<i>Vigna spp.</i>	Honduras
	Leucaena	Paraguay
	<i>Dolichos lablab</i>	El Salvador
	<i>Mucuna pruriens</i>	Guatemala
	<i>Phaseolus coccineus</i> (Chinapopo)	Nicaragua
Maíz y mijo	<i>Canavalia ensiformis</i>	Honduras
	<i>Mucuna pruriens</i>	Nicaragua
	<i>Phaseolus vulgaris</i>	El Salvador
	<i>Vigna unguiculata</i>	
Mijo	<i>Phaseolus vulgaris</i>	El Salvador
		Honduras
Calabacín y maíz	<i>Vigna spp.</i>	México
	<i>Phaseolus vulgaris</i>	Honduras
Maíz y tomate	<i>Vigna spp.</i>	México
	<i>Canavalia ensiformis</i>	
Chiles	<i>Canavalia ensiformis</i>	México
Arroz	<i>Mucuna pruriens</i>	Belice
	<i>Dolichos lablab</i>	
	<i>Canavalia ensiformis</i>	
Patatas, cebada, avena	<i>Medicago hispida</i> (Garrotilla)	Bolivia
Verduras	<i>Cajanus cajan</i> (Guandul)	Honduras

FUENTE: *Cultivos de Cobertura para la Agricultura Sostenible en América*, de Barry Pound (1998).

En la mayoría de las tierras del trópico, el uso de coberturas se ha utilizado en diferentes cultivos como el banano, en combinación con *Arachis pintoi* y *Desmodium*. También está implementado el uso de Kudzu en el cultivo de palma africana (aceitera); igualmente existe una serie de investigaciones relacionadas con el uso de otras coberturas como frijoles, *Vigna spp*, *Canavalia spp*, entre otras, en diferentes cultivos como arroz, café, maíz, entre otros (SANCHOL Y CERVANTES, 1997).

A partir de 2016, la Universidad Estatal a Distancia (UNED, COSTA RICA), por medio de la Vicerrectoría de Investigación y la Vicerrectoría Académica ha estado evaluando especies nativas como cultivos de cobertura; tal es el caso del *Lupinus costarricensis* en la zona alta de Cartago, y otras especies leguminosas en la zona de San Carlos, con estudiantes del programa de Bachillerato de Ingeniería Agronómica.



En adición, existen gramíneas como abonos verdes, entre las que sobresalen los siguientes: centeno (*Secale cereale*), avena negra (*Avena strigosa*), avena caldas (*Avena sativa*), trigo (*Triticum aestivum*), trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*), higuerilla (*Ricinus communis L.*), quinua (*Chenopodium quinua*) y girasol (*Helianthus annus L.*) (PRAGER *et al.*, 2001; VITERI *et al.*, 2008). En Costa Rica, es común ver plantaciones de papaya con la aplicación de poáceas como cobertura (Fig. 74).

FIGURA 74. COBERTURAS VIVAS. Uso de cobertura viva como el zacate (poáceas) en plantación de papaya en la Estación Experimental Fabio Baudrutt, ubicado en Alajuela, Costa Rica.

FUENTE: «Efecto del rastrojo de *Crotalaria spectabilis* Roth en la germinación y crecimiento del Piatá *Brachiania brizantha* cv. BRS Piatá, durante el establecimiento de pasturas sostenibles en San Carlos, Alajuela», de Emmanuel Chaves González (2016). FOTOGRAFÍA: Emmanuel Chaves González (2016).



Las coberturas antes expuestas también pueden utilizarse muertas; es decir, como material vegetal cortado y utilizado como protector del suelo; generalmente, se usan especies de Poaceae, ya que por su composición permanecen por un periodo más largo que una leguminosa en el suelo.

3. CORTINAS ROMPEVIENTOS

Las cortinas rompevientos son una opción para la conservación de los suelos: reducen la velocidad del viento en parcelas con fines agropecuarios y controlan la erosión eólica para prevenir la pérdida de fertilidad del suelo (MENDIETA Y ROCHA 2007) (Fig. 75).

4. FAJAS PROTECTORAS

Las fajas protectoras son una opción para la conservación de los suelos; se utilizan especies de árboles en contorno para minimizar el



paso del viento y para estabilizar el terreno. Son muy parecidas a las cortinas rompevientos, pero colocadas en curvas a nivel. En algunas ocasiones, dicha técnica también es llamada barreras vivas.

B. PRÁCTICAS ESTRUCTURALES O PRÁCTICAS MECÁNICAS

Existen prácticas estructurales o prácticas mecánicas que ayudan en la mejora y conservación del recuso del suelo, principalmente en los eventos pluviales duraderos y de alta intensidad, localizadas en zonas con condiciones topográficas extremas, ya que favorecen el desarrollo de fuertes procesos de desgaste, como la erosión en surcos o en cárcavas. De ahí surge la posibilidad de construir una serie de obras para evitar el proceso de degradación, como los canales guardia, las acequias de ladera y las zanjas de drenaje, las vías de agua empastada, las terrazas y las zonas de infiltración. A continuación, el detalle:

1. CANALES GUARDIA

La construcción de este tipo de estructuras se lleva a cabo con la finalidad de interceptar el agua de escorrentía, a través de canales, los cuales pueden ser de diferentes formas; a saber:



FIGURA 75. CORTINAS ROMPEVIENTOS. Especie de árboles utilizados en finca ganadera de leche, en Ciudad de los Niños, Cartago, como cortinas rompevientos. Esto les permite tener refugio para los animales y proteger el suelo de erosión eólica, desecación y pasturas.

FUENTE: «Efecto del rastrojo de *Crotalaria spectabilis* Roth en la germinación y crecimiento del Piatá *Brachiaria brizantha* cv. BRS Piatá, durante el establecimiento de pasturas sostenibles en San Carlos, Alajuela», de Emmanuel Chaves González (2016). FOTOGRAFÍA: Emmanuel Chaves González (2016).



triangulares, rectangulares y trapezoidales. La función principal de esos canales guardia es la de evitar que se formen cárcavas y surcos, lo mismo que procesos de erosión laminar (*FIG. 76*).

FIGURA 76. CONSTRUCCIÓN DE CANALES GUARDIA. Se detalla la construcción de canales de guardia en plantaciones de banano para evitar que durante un evento de lluvia el agua arrastre el suelo. Dicho tipo de canales minimiza la velocidad del agua y permite un mejor manejo del suelo y, por ende, su conservación.

FUENTE: «Efecto del rastrojo de *Crotalaria spectabilis* Roth en la germinación y crecimiento del Piatá *Bracharia brizantha* cv. BRS Piatá, durante el establecimiento de pasturas sostenibles en San Carlos, Alajuela», de Emmanuel Chaves González (2016). FOTOGRAFÍA: Emmanuel Chaves González (2016).



2. ACEQUIAS DE LADERA Y ZANJILLAS DE DRENAJE

Este tipo de obras, al igual que los canales guardia, cumplen la función de interceptar el agua de escorrentía y son obras que presentan la ventaja de que su mantenimiento sea fácil. Las acequias de ladera pueden tener diferentes formas, entre ellas están las triangulares y el canal guardia trapezoidal en su sección transversal (*FIG. 77*).

FIGURA 77. ACEQUIAS DE LADERA. En la figura se puede apreciar el establecimiento de una acequia de ladera para recolectar las aguas de la finca y canalizarlas a una velocidad menor, lo cual permite más infiltración y menos problemas erosivos en la finca. Esparza, Puntarenas, Costa Rica.

FUENTE: *Acequias de ladera*, de N. Solórzano (2015). FOTOGRAFÍA: N. Solórzano.





3. VÍAS DE AGUA EMPASTADA

Son utilizadas para recolectar el agua de la estructura denominada canales guardia, acequias de ladera y zanjillas de drenaje; estas vías de agua fluyen en sentido contrario de la pendiente de la ladera (NÚÑEZ SOLÍS, 2001, p. 231).

4. TERRAZAS

Son terrenos que han sido preparados en áreas de pendiente, que se elaboran con pendiente inversa al sentido general de la pendiente de la ladera, y con zanjillas laterales, ubicadas al fondo de la terraza, para evacuar excedentes de agua de lluvia. Existen cuatro tipos de terrazas: terrazas de base ancha, terrazas de huerto, terrazas de banco y terrazas individuales (NÚÑEZ SOLÍS, 2001, p. 232).

5. ZONAS DE INFILTRACIÓN (CONSERVACIÓN DE AGUA)

A pesar de no ser una práctica muy habitual, la construcción de zonas de infiltración y captación de líquidos y sedimentos, donde el agua de escorrentía se ha depositado, representan áreas importantes en el diseño de cualquier área de cultivo, jardín e incluso viviendas (Fig. 78).

A esta última estrategia se le pueden agregar otras prácticas como canales de infiltración, melgas para escurrimiento de agua o de contorno, estanques y surcos en contorno en zonas planas.

Lo más importante en estos tipos de prácticas es el propósito por disminuir la velocidad del agua y que los sedimentos sean captados de manera adecuada.

FIGURA 78. ZONAS DE INFILTRACIÓN Y CAPTACIÓN DE AGUAS Y SEDIMENTOS. En los jardines se pueden establecer zonas de infiltración y captación de aguas y sedimentos, como es el caso de los localizados en una urbanización de la zona de Guanacaste, Costa Rica.

FUENTE: «Composición y estructura de la vegetación de la línea de costa de un bosque tropical seco, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica», de Paola Brenes Rojas (2013). FOTOGRAFÍAS: cortesía de Paola Brenes Rojas (2013).





También se pueden usar materiales de la zona como paja o algún otro material vegetal, como es el caso del uso de palmas envueltas, hasta formar un tubo que permita construir curvas para disminuir la velocidad del agua. Es posible establecerlas en combinación con zacate vetiver (*Fig. 79*).

Las plantas de zacate vetiver se siembran a una distancia entre 10 y 15 cm entre plantas establecidas a curvas de nivel. Se realizan tramos de siembra de vetiver cada 40 m en zonas con pendiente de 2 % o cada 4 m en zonas con pendiente de 60 % (BM, 1990).

Igualmente, existen otras plantas que pueden utilizarse en el control de erosión; pocos países utilizan especies autóctonas para realizar las estrategias de manejo y conservación de suelos. Idealmente, prefiere el uso de especies nativas en la conservación y la restauración del suelo, puesto que son especies más adaptadas y, por lo tanto, requieren menos cuidados.

Para Costa Rica se puede consultar el texto de las científicas Virginia Alvarado y Auxiliadora Zúñiga (2018) sobre las especies para el control de erosión, con fin de valorar especies nativas para utilizar en los procesos de conservación de suelos.

FIGURA 79. OTROS MATERIALES APLICADOS EN ZONAS DE INFILTRACIÓN. A) Uso de palmas en forma de tubo para reducir la velocidad del agua en zona de pendiente o B) uso de pacas de zacate en zonas con poca pendiente, en la zona de Guanacaste, Costa Rica.

FUENTE: «Composición y estructura de la vegetación de la línea de costa de un bosque tropical seco, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica», de Paola Brenes Rojas (2013). FOTOGRAFÍAS: cortesía de Paola Brenes Rojas (2013).





c. PRÁCTICAS AGRONÓMICAS

Existen las prácticas agronómicas que están más relacionadas con el uso de semillas, fertilizantes y enmiendas minerales para la mejora del suelo, entre otras. Uno de los ejercicios de más importancia es la incorporación de material orgánico al suelo, el cual se detalla en las siguientes líneas.

De acuerdo con lo descrito por Núñez Solís (2001), la incorporación de residuos orgánicos al suelo va a promover que este mejore sus condiciones físicas y químicas; las mejoras en las diferentes propiedades físico-químicas del suelo se pueden lograr gracias a la incorporación de residuos de cosecha, estiércol de caballos, ovinos, bovinos, porcinos o gallináceas, además del uso del compost, procesado en las diferentes unidades productivas.

El objetivo principal al incorporar el compost al suelo, es controlar la susceptibilidad del recurso edáfico, ante el proceso de la erosión. El compost es «el producto humificador de residuos orgánicos, mezclados con ceniza, tierra o cal, y combinaciones de ceniza, tierra y cal» (NÚÑEZ SOLÍS, 2001, p. 122).

La incorporación de materia orgánica se puede hacer mediante enmiendas como el compostaje o por abonos verdes. Un ejemplo de la incorporación de materia orgánica al suelo fue la investigación realizada en Florencia, zona norte de San Carlos. En un metro cuadrado se aplicaron 100 g de *Crotalaria* (*Crotalaria spectabilis* Roth), en una parcela sembrada con pasto Piatá (*Brachiaria brizantha* cv *BRS Piatá*). Se notó un efecto notorio con respecto al porcentaje de materia orgánica al inicio, ya que hubo un incremento de 29,46 % (CHAVES, 2016).

Otra alternativa para el aprovechamiento de insumos como los fertilizantes químicos es el uso de Zeolita, el cual es un complemento de manejo para mejorar la producción de monocultivos más intensos y en búsqueda de una conservación del estado del suelo. Prueba de ello es una investigación realizada en Costa Rica, liderada por el ingeniero agrónomo Manuel Pérez, en pastos de alta calidad como Maralfalfa (*Pennisetum* sp). Se usa zeolita como complemento al programa de fertilización. Entre los principales resultados, según el autor, es el mejoramiento que se observa en las



ATENCIÓN

El vetiver (*Vetiveria zizanioides*) es una planta que se usa en conservación de suelos para evitar la erosión; ha sido bastante usada en países como China, India, África y en el continente americano. Su introducción como planta para usar en barreras data de 1987 y se adapta a suelos ácidos y rojos hasta en pendientes de 60%; además, puede aguantar sequías extremas e inundaciones. Se ha ampliado su uso por sus características de fácil adaptación y de bajo costo e, incluso, porque solo se propaga por divisiones radiculares.



ATENCIÓN

Las investigadoras Virginia Alvarado García y María Auxiliadora Zúñiga Amador han trabajado en una guía de «Plantas Nativas para el Control de Erosión» (2018) de Costa Rica. El texto ofrece indicaciones prácticas sobre cómo utilizar diversas plantas autóctonas, para minimizar los efectos erosivos en laderas con pendientes moderadas o taludes socavados; tanto en zonas urbanas como rurales, sitios de cultivo, orilla de carreteras, o en cualquier condición que presente inestabilidad de terreno. El documento contiene 60 especies, sobre todo hierbas y arbustos, muy distribuidas en Costa Rica, pertenecientes a 30 familias botánicas. Las más abundantes son la Asterácea, la Fabácea y la Heliconiaceae.



propiedades del suelo, especialmente aquellas relacionadas con el complejo de cambio; y un mejor aprovechamiento del nitrógeno por la planta proveniente del suelo, al menos 90 % con respecto al derivado del fertilizante (PÉREZ, 2017).

Ramón Rigoberto Hernández-Colorado, Ana L. Alvarado y Rosaura M. Romero (2012) mencionan que en México esta técnica ha brindado grandes beneficios al reducir el uso de fertilizantes químicos y, de esta forma, incrementar la concentración y la disponibilidad de macronutrientes como el nitrógeno y el potasio, aparte de mejorar las condiciones físicas del suelo, específicamente de su estructura.

D. MEDICIÓN DE DISTANCIAS Y PENDIENTES

Es básico, a la hora de determinar estrategias para manejo y uso de suelo, contar con una descripción real del área de trabajo. Bajo ese panorama hay dos mediciones fundamentales que se deben realizar: medición de distancias y de pendientes.

Para medir distancias en terrenos planos se usa la cinta métrica. Se coloca en dos puntos definidos y se tensa mientras se realiza la medición. Una vez efectuado este proceso se anota el resultado en centímetros.

A fin de medir las distancias de zonas inclinadas o terrenos con pendientes, se debe hacer por segmentos, de forma tal que el punto de lectura inicial [A] debe estar al mismo punto de lectura (nivel) del segundo punto [B], según se observa en la Figura 80.

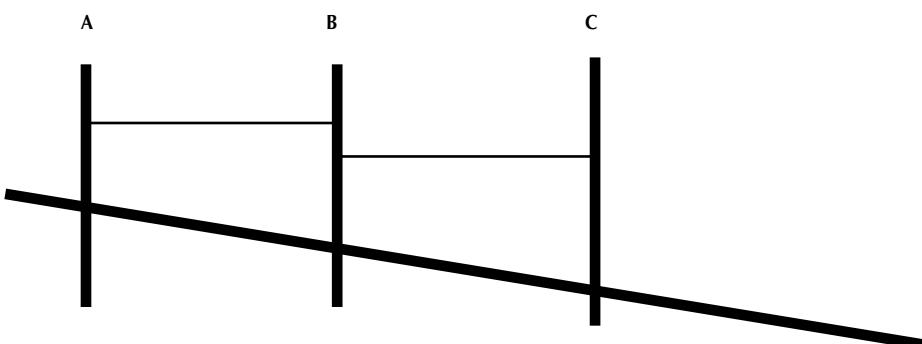


FIGURA 80. MEDICIONES DE DISTANCIA EN ZONAS CON PENDIENTE. Para medir las distancias de zonas inclinadas o terrenos con pendientes se debe de hacer por segmentos (A-B, B-C), de modo tal que el punto de lectura inicial debe estar al mismo punto de lectura del segundo punto.

FUENTE: investigación y propuesta de Paola Brenes Rojas, en 2017.





Para realizar mediciones de pendiente, primero se debe utilizar un instrumento denominado nivel, el cual se emplea para indicar si hay nivelación o no en una zona. Específicamente, el nivel de burbuja, el cual es utilizado en albañilería, que es uno de los instrumentos más económicos de utilizar para determinar una pendiente.

En primer lugar, se debe colocar una cuerda tensada entre dos puntos. Luego, se coloca el nivel en el centro de la cuerda (entre los dos extremos seleccionados), en procura de que la burbuja del nivel se ubique en la parte central del tubo transparente. Para este proceso, se debe subir o bajar la cuerda hasta lograr que la cuerda quede a nivel.

Posteriormente se mide la distancia de la cuerda del suelo del punto inicial [A] al punto final [B] y la altura del punto final [B], que corresponde a la altura del Punto B: la determinada entre el suelo y donde está la cuerda (*FIG. 81*).

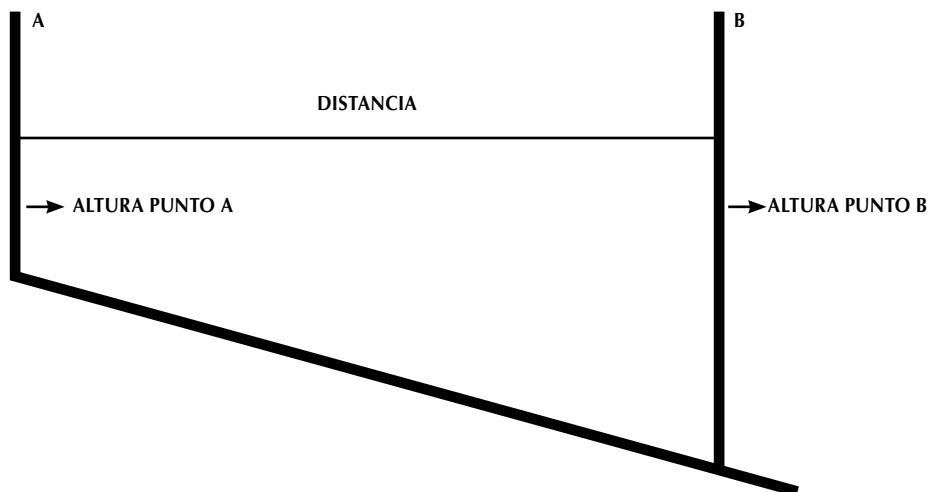


FIGURA. 81. DETERMINACIÓN DE LA PENDIENTE. Se mide la distancia de la cuerda del suelo del punto inicial [A] al punto final [B] y la altura del punto final [B]. Luego se aplica la ecuación: $\text{PORCENTAJE DE PENDIENTE} = (\text{DIFERENCIA DE ALTURA ENTRE ALTURA DE A Y B} / \text{DISTANCIA}) \cdot 100$.

FUENTE: investigación y propuesta de Paola Brenes Rojas, en 2017

Además, se tiene que determinar la diferencia entre la altura del punto A y el punto B, al aplicar la siguiente ecuación:

Porcentaje de pendiente =

(diferencia de altura entre dos lecturas /distancia) • 100

* * *

Actualmente existen múltiples herramientas que se pueden usar en el campo para determinar pendientes; entre ellas, se destacan el clinómetro y las aplicaciones para celulares inteligentes.



Idealmente, en el campo se debería de contar con un equipo preciso como el clinómetro; sin embargo, no se descarta para usos generales las aplicaciones en celulares.

RESUMEN

El suelo cumple, al menos, tres funciones básicas que se deben determinar en el estudio de su calidad: la capacidad de filtrar cualquier líquido, la de degradar los residuos de los organismos y la de producir los alimentos.

A nivel mundial, hay una preocupación por la degradación de las tierras y muchos países han iniciado a describir los principales factores de degradación para establecer políticas de conservación y manejo de suelos.

La conservación del recurso suelo se define como el conjunto de prácticas de manejo para la gestión integral del uso de la tierra y los suelos, que se lleva a cabo para proteger, conservar y mejorar el suelo. Estas deben de ser planificadas según las características físicas, químicas y biológicas del suelo.

Por lo tanto, existen diferentes metodologías para medir pérdida de suelo en forma de erosión y calidad de suelo, según se necesite.

Finalmente, existen diferentes obras de conservación que se pueden realizar en los suelos según la clasificación de tierras, según la normativa de cada país.



EJERCICIOS DE AUTOEVALUACIÓN

I. ESTUDIO DE CASO. *Lea con atención el enunciado y resuelva lo que se le solicita.*

De la evaluación agrológica de una parcela en San Isidro de Heredia, con cultivos de granos (maíz y frijol), el ingeniero agrónomo obtuvo los siguientes datos:

- Pendiente dominante: < 30 %
- Erosión sufrida: leve
- Profundidad efectiva superior: a 120 cm
- Textura en el suelo: franco-arcilloso (moderadamente fina)
- Textura en el subsuelo: arcilloso (< 60 % de arcilla fina)
- Sin pedregosidad
- Fertilidad media
- Sin problemas de toxicidad y salinidad
- Drenaje moderadamente lento
- Riesgo de inundación nulo
- Zona de vida: Bosque Húmedo Tropical
- Sin problemas por neblina o viento

De acuerdo a la evaluación realizada por el ingeniero agrónomo, y los datos que se le brindaron anteriormente y, con el uso del Cuadro 29: «Clasificación de uso del suelo según el manejo», determine la clase, la subclase y la unidad de manejo de la parcela e indique las principales limitaciones, si las tiene, y cuáles son las alternativas para su mejoramiento.

II. ASOCIAR. *Vincular la práctica agrícola de la izquierda con la función de la derecha. y, luego, escribir la letra correspondiente dentro de los paréntesis.*

- | | |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A. Barreras vivas | [] Incremento de materia orgánica al mejorar la capacidad de retención de agua |
| B. Rotación de cultivos | [] Método de conservación de suelos |
| C. Cortinas rompevientos | [] Ruptura del ciclo de vida de las plagas |
| D. Fajas de contorno | [] Protección de las tierras bajo uso agrícola, ganadero y forestal de erosión por escorrentía |
| E. Siembras en curvas de nivel | [] Proteger los cultivos a sotavento, y daños por erosión eólica |





III. RESPUESTA CORTA. *Lea con atención cada enunciado y responda lo que se le solicita.*

- A. Existen tres modelos o sistemas de cobertura para terrenos agrícolas, mencionelos:
- B. Cite dos funciones que ejercen los abonos verdes y las coberturas vivas o muertas en el beneficio del suelo:
- C. Si se maneja una cobertura dentro de un cultivo agroindustrial durante cuatro años o más, con poda o con chapeas periódicas, la modalidad de manejo se identifica como:
- D. Con respecto a las clases del sistema de capacidad de uso de las tierras, las clases IV, V, VI, se caracterizan por:
- E. Procesos que se producen por el flujo del agua pluvial en la superficie de los terrenos:



RESPUESTA A LOS EJERCICIOS DE AUTOEVALUACIÓN

I. ESTUDIO DE CASO

La unidad de manejo del terreno, en el que se lleva a cabo la producción de frijol y maíz es:

IVe₁₂s₂₄d₁c₂

Esta unidad de manejo lo que quiere decir es que pertenece a la clase número IV, por lo que el uso de esta tierra se restringe al desarrollo de cultivos semi-permanentes y permanentes, en caso de cultivos anuales se pueden desarrollar únicamente en forma ocasional.

Las mayores limitaciones que se presentan en la zona a trabajar son: pendiente, erosión sufrida, fertilidad, además de limitaciones en el drenaje.

Para corregir las limitaciones de pendiente y erosión sufrida se pueden implementar obras de manejo y conservación de suelos como es la siembra en contorno, uso de las siembras en surcos, eras, confección de terrazas.

En el caso de la fertilidad, se puede incrementar al adicionar materia orgánica, a través del uso de abonos verdes como el uso de Mucuna, coberturas vivas o muertas, además de agregar compost.

Para el drenaje, se puede corregir si se establecen obras como canales guardia, acequias de ladera o vías de agua empastada, con el fin de lograr evacuar el exceso de agua.

II. ASOCIAZ

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A. Barreras vivas | [D] Incremento de materia orgánica al mejorar la capacidad de retención de agua |
| B. Rotación de cultivos | [E] Método de conservación de suelos |
| C. Cortinas rompevientos | [B] Ruptura del ciclo de vida de las plagas |
| D. Fajas de contorno | [A] Protección de las tierras bajo uso agrícola, ganadero y forestal de erosión por escorrentía |
| E. Siembras en curvas de nivel | (C) Proteger los cultivos a sotavento, y daños por erosión eólica |

**III. RESPUESTA CORTA**

- A. Tres modelos o sistemas de cobertura para terrenos agrícolas: coberturas muertas, abonos verdes y coberturas vivas.
- B. Dos funciones que ejercen los abonos verdes y las coberturas vivas o muertas en el beneficio del suelo: incrementan el contenido de materia orgánica, protegen los suelos del impacto directo de las gotas de lluvia.
- C. Si se maneja una cobertura dentro de un cultivo agroindustrial durante cuatro años o más, con poda o con chapeas periódicas, la modalidad de manejo se identifica como: cobertura viva.
- D. Clases IV, V, VI, se caracterizan por: uso restringido para cultivos semipermanentes y permanentes.
- E. Procesos que se producen por el flujo del agua pluvial en la superficie de los terrenos: laminar, en surcos y en cárcavas.



FUENTES CONSULTADAS

IMPRESAS

- ACON, J.; L. Alpízar y R. Wing Chin. 2013. «Percolación y lixiviación de nutrientes en suelos bananeros al este del Río Reventazón, Costa Rica». *Agronomía mesoamericana*, 24(2):329-336.
- ALCR (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica). (1998). «LEY 7779: Uso, manejo y conservación de suelos». *La Gaceta*. San José Costa Rica: Imprenta Nacional.
- ALFARO, E.; E. Alvarado y A. Chaverri. 2001. «Cambios edáficos asociados a tres etapas sucesionales de un bosque tropical seco en Guanacaste, Costa Rica». *Agronomía Costarricense*, 25(1):7-20.
- ALOÉ, J. M. y M. Toribio. 2007. «Análisis de suelos: Guía Práctica de muestreo». *Profértil: Investigación y Desarrollo*, 12, 1-8.
- ALTIERI, M. A. H.; S. Liebman; M. Magdoff; F. Norgaard; R. Sikor; O. Thomas y A. Jose. (1999). *Agroecología: bases científicas para una agricultura sustentable*. Nordan-Comunidad.
- ALTIERI, M. y C. I. Nicholls. (2002). «Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales». *Manejo integrado de plagas*, 64(3), 17-24.
- ALVARADO GARCÍA, V. y M. A. Zuñiga Amador. (2018). *Plantas nativas para el control de erosión*. Cartago, Costa Rica. Costa Rica: ET. 162 pp.
- ALVARADO, A. (1985). *El origen de los suelos*. Turrialba, Costa Rica: Ed. CATIE.
- ALVARADO, A. y W. Forsythe. (2005). «Variación de la densidad aparente». *Agronomía Costarricense* 29(1), 85-94.
- ALVARADO, H. A. (1985). *El origen de los suelos*. Turrialba, Costa Rica: Ed. CATIE.
- ARIAS, A. C. (2001). *Suelos Tropicales*. San José, Costa Rica: EUNED.
- ARIAS, A., P. Brenes, L. Sánchez y W. Peña Cordero. (2018). «Mineralización de Mucuna pruriens y Crotalaria juncea en dos órdenes de suelos en Costa Rica». *Repertorio Científico*. [En proceso de edición y publicación].
- ARISTILDE, L.; B. Lansomb; J. Miéhé-Brendléc y L. Charlet. (2016). «Enhanced Interlayer Trapping of a Tetracycline Antibiotic within Montmorillonite Layers in the Presence of Ca and Mg.» *Journal of Colloid and Interface Science*, 454, 153-159.
- BADÍA, D.; C. Martí y R. M. Poch. (2011). «A soil top sequence characterization in the irrigable lands protected area contact zone of El Basal, NE Spain». *Arid Land Research and Management*, 25(1), 1-18. Doi: 10.1080/15324982.2010.528152.
- BALLESTA R. y V. González. (2006). «La calidad de suelos como medida para su conservación». *Edafología*, 13(3), 125-138.
- BARBE, S.; L. Van Mellaert y J. Anné. 2006. «The use of clostridial spores for cancer treatment». *Journal of applied Microbiology*, 101(3), 571-578.
- BARRIOS, I. (1985). «La edafología: origen, desarrollo y conceptos». *Euskoikakuntza*, 87-114.
- BAUTISTA CRUZ, A.; J. Etchevers Barra; R. F. del Castillo y C. Gutiérrez. (2004). «La calidad del suelo y sus indicadores». *Ecosistemas*, XIII, 1-15.
- BERTSCH, F. (1986). *Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica*. San José, Oficina de Publicaciones, UCR.
- BLANCO, R. y J. M. Senclades. (2001). «La influencia de los factores en variaciones de las características y propiedades de suelos de los montes de Málaga». *Baetica*, 23, 9-24.
- BM (Banco Mundial). (1990). *Vetiver: barrera contra la erosión*. Washington: Banco Mundial.



- BOGGIANO, M. 2015. «Los 10 países del mundo con más agua». *Revista diplomacia*, 129, 3-114.
- BOLAÑOS, R.; V. Watson y J. Tosi. (2005). *Mapa Ecológico de Costa Rica (Zonas de Vida, según sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L. R. Holdridge, Escala 1:750 000.* San José, Costa Rica: Centro Científico Tropical.
- BRENES, P. (2013). «Composición y estructura de la vegetación de la línea de costa de un bosque tropical seco, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica». (Tesis de maestría para optar por el grado de MSc. en Manejo de Recursos Naturales), Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica (UNED).
- BRENES, P.; M. Ocampo; O. Chacón; W. Peña Cordero y A. Fallas. (2014). «Caracterización de la vegetación de la línea de costa de Callejones, Venado y Marbella en Santa Cruz, Guanacaste». En Picón, J., Rodríguez, R. y Bravo, J. *Experiencias de manejo, conservación y restauración de ecosistemas marino-costera*. Nicoya, Costa Rica: UNED.
- BRISSIO, P. (2005). *Evaluación preliminar del estado de contaminación en suelos de la provincia del Neuquén donde se efectúan actividades de explotación hidrocarburífera*. Comahue: Universidad Nacional del Comahue.
- BUOL, S.; F. D. Hole y R. J. McCracken. (1989). *Soil genesis and classification* (3a. ed.). Ames, USA: Iowa University Press.
- BUOL, S.; R. Southard; R. Grahan y P. McDaniel. (2003). *Soil Genesis and Classification*. [5a. ed.]. Iowa: A Blackwell Publishing.
- CABALCETA, G. y Cordero, A. (1991). «Efectos de salinidad en arroz bajo riego en Guanacaste». *Agronomía Costarricense*, 15(112), 167-172.
- CADETI (Comisión Asesora sobre Degradación de Tierras). (2004). *Programa de Acción Nacional de lucha contra la degradación de tierras*. San José, Costa Rica: MINAE; CADETI.
- CAIRO, P. y O. Herrera. (1994). *Algunas propiedades físicas de los suelos*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- CALVO, S. (2011). *Bacterias simbóticas fijadoras de nitrógeno*. Salamanca: Universidad de Salamanca (USAL).
- CAMARGO, S.; N. Montaño; J. de la Rosa y S. Montaño. (2012). «Micorrizas, una gran unión debajo del suelo». *Revista Digital Universitaria*, 13(7), 1-19.
- CAMPOS, R.; I. Barrios y A. González. (2013). *Proyecto PmaCO: porosidad y mecanismos de atrapamiento de CO. La formación utrillas en el Sondeo SD-1 (Tejada Burgos): porosidad y modelización del sistema poroso*. Madrid: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria.
- CANTERO, J.; J. Sfragulla; J. Núñez; A. Bonalui; J. Mulko; A. Amuchastegui y A. Espinar. (2011). «Flora de los afloramientos de mármoles y serpentinitas de las Sierras de Córdoba» (Argentina). *Kurtziana*, 36(2), 11-45.
- CASTILLA, F. (2013). «Siembra Directa. La elegida para conservar el suelo: una decisión agronómica que combina rotación de cultivos, fertilizantes y agricultura de precisión para aumentar la producción y preservar los recursos naturales». *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 39(2), 118-123.
- CHAVES GONZÁLEZ, E. 2016. «Efecto del rastrojo de Crotalaria spectabilis Roth en la germinación y crecimiento del Piatá Brachiaria brizantha cv. BRS Piatá, durante el establecimiento de pasturas sostenibles en San Carlos, Alajuela». Tesis de Bachillerato en Ingeniería Agronómica. San José, Costa Rica. Universidad Estatal a Distancia (UNED). 58 pp.
- CHINCHILLA, M.; R. Mata y A. Alvarado. (2011). «Caracterización de la densidad de algunos suelos ultisoles en la zona de los Santos, Talamanca, Costa Rica». *Agronomía Costarricense*, 35(1), 59-81.
- CLAPPERTON, M. J. (2003). «Increasing Soil Biodiversity Through Conservation Agriculture. Managing the Soil as Habitat». *Proceedings II Congresso Mundial sobre Agricultura Conservacionista*. Paraná, Brasil: Confederación de Asociaciones Americanas para la Agricultura Sustentable (CAAPAS). (pp. 136-145)



- CLAPPERTON, M. J. (2003). «Increasing Soil Biodiversity through Conservation Agriculture-Managing the Soil as Habitat». *Proceedingsp. II Congresso Mundial sobre Agricultura Conservacionista*. Paraná-Brasil. CAAPAS. (pp. 136-145)
- DENYER, P. y S. Kussmaul. (2000). *Geología de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: ET.
- DUCHAFOUR, P. (1984). *Edafología: Edafogénesis y clasificación*. París: Masson.
- EIMIL, C.; F. Sánchez Rodríguez y R. Rodríguez Soalleiro. (2012). «Macro y micronutrientes en acículas de Pinus pinaster de diferentes clases de edad y su relación con el índice de sitio de las plantaciones». *Revista de la Real Academia Galega de Ciencias*, 31, 137-162
- ESPINOSA, J.; E. Molina. (1999). *Acidez y encalado de suelos*. Georgia: International Plant Nutrition Institute (IPNI).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (1996) *Agricultura Conservacionista, un enfoque para producir y conservar*. San José, Costa Rica
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2013). *Afrontar la escasez de agua: un marco de acción para la agricultura y seguridad alimentaria*. Roma: FAO.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Luxemburgo: FAO.
- FAO. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2002). *Agricultura de conservación: estudio de casos en América Latina y África*. Roma: FAO.
- FASSBENDER, H. W. (1993). *Modelos de edafología de sistemas agroforestal*. [Serie de materiales de enseñanza]. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- FASSBENDER, H. W. y E. Bornemisza. (1987). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. San José: IICA, 418.
- FERNÁNDEZ, L.; P. Zalba y M. Gómez. (2005). «Bacterias solubilizadoras de fosfato inorgánico aisladas de suelos de la región sojera». *Ciencia del suelo*, 23(1), 31-37.
- FIGUEROA, L. y R. Álvarez. (2011). «Evaluación de suelos de manglar en dos localidades de la ensenada de Tumaco, Pacífico Colombiano». *Arq. Cién. Mar, Fortaleza*, 44(1), 12-20.
- FLACH, K. W. (1963). «Soil Investigations and the Seventh Approximation». *Soil Sci. Soc. Am. J.* 27, 226-228.
- GABRIELS, D. y Lobo, D. (2011). «Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo». *Venesuelos*, 14, 44.
- GARCÍA, F. (2008). *Identificación y caracterización de cepas que nodulan Phaseolus en diferentes regiones de España*. España: Universidad de Salamanca (USAL).
- GARDI, C.; M. Angelini; S. Barceló; J. Comerma; C. Cruz Gaistardo; A. Encina Rojas, A. Jones, P. Krasilnikov, M. de L. Mendoça Santos Brefin, L. Montanarella, O. Muñiz Ugarte, P. Schad, M. I. Vara Rodríguez y R. Vargas (Editores). (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Luxemburgo: Comisión Europea, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea: EUROCLIMA.
- GLIEMMANN, S. (2000). *Agroecology: Ecological Processes in Sustainable Agriculture*. Florida: CRC/Lewis Publishers.
- GÓMEZ-CALDERÓN, N.; M. Solorzano-Quintana y K. Villagra-Mendoza. (2016). «Cuantificación de la erosión hídrica en función de diferentes técnicas de mecanización para minimizar la contaminación del agua por sedimentos en la parte alta de la cuenca del río Reventazón». [Informe final]. Cartago, Costa Rica.
- GONZÁLEZ, M. (2011). *Combinación de sustratos y solución nutritiva en chile manzano (Capsicum pubescens RYP)*. Mexico : Universidad de Chapino.
- HENDRICKSON, A. J. y F. J. Viehmeyer. (1931). «Influences of dry soil on root extension». *Plant Physiol* 6: 567-576.
- HENRÍQUEZ C, Cabalceta G. (1999). *Guía práctica para el estudio introductorio de suelos con un enfoque agrícola*. San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS).



- HERNÁNDEZ-COLORADO, R. R.; A. L. Alvarado y R. M. Romero. (2012). «Acumulación de cobre en plantas silvestres de zonas agrícolas contaminadas con el metal». *Ciencia y tecnología*, 28, 55-61.
- HERNÁNDEZ-LEÓN, R.; I. Velázquez-Sepúlveda; M. C. Orozco-Mosqueda y G. Santoyo. (2010). «Metagenómica de suelos: grandes desafíos y nuevas oportunidades biotecnológicas». *Phyton*, 79(2), 133-139.
- HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, O. A.; D. L. Ojeda-Barrios; J. C. López-Díaz y A. M. Arras-Vota. (2010). «Abonos orgánicos y su efecto en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo». *Tecnociencia. Chihuahua*, 4, 1-6.
- HUDSON, N. (2013). *Conservación del suelo*. Barcelona: Reverte.
- INTA-MAG (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia Tecnológica Agropecuaria-Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2015). «Suelos de Costa Rica». *Boletín técnico 2*. San José, Costa Rica: MAG.
- INTA-MAG (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia Tecnológica Agropecuaria-Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2015). «Suelos de Costa Rica». *Boletín técnico 3*. San José, Costa Rica: MAG.
- INTA-MAG (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia Tecnológica Agropecuaria-Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2015). «Suelos de Costa Rica». *Boletín Técnico 5*. San José: MAG.
- INTA-MAG (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia Tecnológica Agropecuaria-Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2015). «Suelos de Costa Rica». *Boletín Técnico 6*. San José, Costa Rica: MAG.
- INTA-MAG (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia Tecnológica Agropecuaria-Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2015). «Suelos de Costa Rica». *Boletín técnico 8*. San José, Costa Rica: MAG.
- IRIONDO, M. (2006). *Introducción a la Geología*. [3ra. ed.]. Córdoba Brujas
- IUSS-WRB/GRUPO DE TRABAJO. (2007). «Base Referencial Mundial del Recurso Suelo». *Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos N.º 103*. Roma: FAO.
- IUSS-WRB/WORKING GROUP. (2014). *World Reference Base for Soil Resources 2014*. Roma: WRB.
- JANSSON, H. y L. López-Llorca. (2001). «Biodiversidad del suelo: control biológico de nematodos fitopatógenos por hongos nematófago». *Cuadernos de diversidad N.º 6*, 12-15.
- JOHNSON, L. J. (1979). *Introductory Soil Science*. New York: MacMillan Publ. Co. Inc.
- JOHNSTON, A. (1991). «Soil Fertility and Soil Organic Matter». In: *Advances in Soil Organic Matter Research: The Impact on Agriculture and the Environment*. UK: The Royal Society of Chemistry. Cambridge.
- JULCA-OTINIANO, A. E.; L. Meneses-Florión; R. Blas-Sevillano; S. Bello-Amez. (2006). «La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura». *IDESIA*, 24 (1), 49-61.
- KABATA-PENDIAS, A. y Pendias, H., 2001. *Trace elements in soil and plants*. Ed. CRC Press, Boca Raton (USA).
- KASS, D. (1998). *Fertilidad de suelos*. San José, Costa Rica: EUNED.
- KRUPENIKOV, I. A. (1992). *History of Soil Science*. Rotterdam: A. A. Balkema.
- KUHNS, L. J. 1985. *Fertilizing woody ornamentals*. University Park, PA: Pennsylvania State University, College of Agriculture. 16 p.
- LAMPRECHT, H. (1990). Trad. A. Carrillo. *Silvicultura en los trópicos: los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas, posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido*. Eschborn, Alemania: Instituto de Silvicultura de La Universidad de Göttingen. GTZ.
- LEIVA, L.; O. Mata; O. Rocha; M. Gutiérrez. (2009). «Cronología de la regeneración del bosque tropical seco en Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica. I. Características edáficas». *Rev. Biol. Trop.*, 57(3), 801-815.



- LIANES, E. (2008). «Estudio del factor vegetación “factor C” de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo. Revisada “Rusle” en la cuenca del Río Birris (Costa Rica)». [Tesis Doctoral]. Barcelona: Universidad Politécnica de Madrid.
- LÓPEZ, B.; M. Barreto; J. Conde. (2011). «Caracterización de los manglares de zonas semiáridas en el noroccidente de Venezuela». *Interciencia*, 36(12), 888-893.
- MASSOL, A. (2002). *Manual de laboratorios: ecología de microorganismos*. Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico.
- MEZA, E.; K. Geissert. (2003). «Estructura, agregación y porosidad en suelos forestales y cultivados de origen volcánico del Cofre De Perote, Veracruz, México». *Forestal Veracruzana*, 5(2), 57-60.
- MOLINA, E. y Meléndez, G. 2002. «Tabla de interpretación de análisis de suelos». Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. Mimeo
- MONTES DE OCA, P.; R. Mata y M. A. Chaves. (1996). «Estudios de salinidad en la provincia de Guanacaste». *Agronomía Mesoamericana*, 7(2), 77-83.
- MUÑOZ, R. (2016). *Manual de laboratorio de edafología*. San José, Costa Rica: EUNED. (¿?)
- NAVARRO GARCÍA Y S. Navarro García. (2013). *Química agrícola: química del suelo y de nutrientes esenciales*. España: Mundi-Prensa.
- NÚÑEZ SOLÍS, J. (1981). *Fundamentos de edafología*. [2a. ed.]. San José, Costa Rica: EUNED.
- NÚÑEZ SOLÍS, J. (2001). *Manejo y conservación de suelos*. San José, Costa Rica: EUNED. 263 p.
- ORTEGA, A. y E. Malavolta. (septiembre de 2012). «Los más recientes micronutrientes vegetales». *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (IAH)*, (7), 16-25.
- ORTIZ, R. (2015). «Síntesis de la evolución del conocimiento en Edafología». *Revista Eubacteria*. [Cien años de avances en ciencias de la vida]. 34, 51-64.
- OVALLES, F. (2003). «El color del suelo». *Revista Digital del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Venezuela*, 3, 1-5.
- PARK, J. y S. Cousins. (1995). «Soil biological health and agro-ecological change». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 56, 137-148.
- PEÑA CORDERO W.; R. Muñoz Hernández y C. M. Salazar Calvo. (2016). *Manejo y conservación de suelos tropicales*, San José, Costa Rica: EUNED.
- PEÑA CORDERO, W. (2017). *Edafología del Trópico*. San José, Costa Rica: EUNED.
- PEÑA CORDERO, W. y M. de la Peña. (2006). «Propiedades generales y bioquímicas de suelos forestales en áreas serpentinizadas de Galicia». *Agronomía Costarricense* 29(3), 71-78.
- PEÑA CORDERO, W.; M. Leirós y J. Briceño. (2005). «Propiedades generales y bioquímicas de suelos forestales en áreas serpentinizadas de Galicia». *Agronomía Costarricense* 29(3), 71-78.
- PÉREZ, J. M. (2017). «Evaluación de la zeolita natural utilizada como una tecnología productiva y limpia, aplicada al pasto Maralfalfa (Pennisetum sp) como un complemento en el uso de los fertilizantes nitrogenados» (Tesis de maestría). Tecnológico de Costa Rica (TEC), Cartago.
- PIZARRO, R.; C. Morales; L. Vega; C. Olivares; R. Valdez y F. Balocchi. (2009). *Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la Región de Coquimbo*, Chile. Chile: UNESCO.
- PORTA CASANELLAS, J.; M. López-Acevedo Reguerín y C. Roquero de Laburu. (2003). *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*. (3a. ed.). Madrid: Mundi-Prensa.
- PORTA, J. y D. Villanueva. (2012). «Formación de neologismos en Ciencias del Suelo». *Spanish Journal of Soil Science, SJSS* 2(2), 90-103.
- PRAGER MOSQUERA, M.; O. E. Sanclemente Reyes; M. Sánchez de Prager; J. Miller Gallego; D. I. Á. Sánchez. (2012). Abonos verdes: tecnología para el manejo agroecológico de los cultivos. *Agroecología* 7, 53-62.
- PRIETO, J.; F. Prieto; A. Gutiérrez y C. Ramírez. (2009). «Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua». *Tropical and Subtropical Agro-ecosystems* 10(1), 29-44.



- PRIETO, J.; F. Prieto; F. Garcia y O. Acevedo. (2013). «Indicadores e índices de calidad de los suelos (ICS) cebaderos del sur del estado de Hidalgo», México. *Agronomía Mesoamericana* 24(1):83-91.
- RAMÍREZ-CARBALLO, H.; A. Pedroza-Sandoval. (2007). «Evaluación participativa de la degradación del suelo en la reserva de la biosfera de Mapimi, Durango, México». *Rev. Chapingo serie Zonas Áridas* 6: 247-254
- REYES JARAMILLO, I. (2014). «Una ojeada a la clasificación de suelos de México». *Contactos* 91(3), 0-40.
- REYES, W. (2010). «Evaluación de la susceptibilidad de la compactación en cuatro series de suelo bajo uso agrícola». *Bioagro*, 22, 29-36.
- RODRÍGUEZ, A.; B. Wurr; F. Ferrari; M. Ferreira. (septiembre, 2014). «Papel fisiológico do níquel: Essencialidade e toxidez em planta». *Informaciones Agronómicas*, 147:1-15.
- ROMÁN, P.; M. Martínez; A. Pantoja. (2013). *Manual de compostaje del agricultor*. Chile: FAO.
- SÁNCHEZ, S; M. Reines. 2001. «Papel de la macrofauna edáfica en los agroecosistemas». *Pastos y forrajes* (24)3.
- SANCHOL, F.; C. Cervantes. (1997). «El uso de plantas de cobertura en sistemas de producción perennes y anuales en Costa Rica». *Agronomía costarricense* 21(1), 111-120.
- SCHOENEBERGER, P. J.; D. A. Wysocki y E.C. Benham; SSS (Soil Survey Staff). 2012. *Field book for describing and sampling soils*. [Version 3.0]. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE., page 55.
- SCHWAB, A. P. (2000). «The soil solution». En M. Sumner. (Ed.), *Handbook of soil Science*. 122. Boca Ratón: CRC Press.
- SHERMAN, G. D. (1952). «The genesis and morphology of the alumina-rich laterite calys». In *Problems of clay and laterites genesis*. New York: Ins.MIn.Met. and Pet.
- SILVA, L. (2002). *Manual de prácticas de laboratorio de suelos*. Bogotá: Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UCDA).
- SINGH, M. J y K. L. Khera. 2009. «Physical Indicators of Soil Quality in Relation to Soil Erodibility Under Different Land Uses». *Arid Land Res. Manage.* 23, 152-167.
- SOTO, G.; G. Meléndez. (2004). «Cómo medir la calidad de los abonos orgánicos». *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología* (Costa Rica), 72, 91-97.
- SSS (SOIL SURVEY STAFF). (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos*. Washington, DC: USDA-Natural Resources Conservation Service.
- STOLZE, M.; A. Piñor; A. Häring y S. Dabbert. (2000). *The Environmental Impacts of Organic Farming in Europe*. Stuttgart-Hohenheim, Germany: University of Hohenheim.
- TARBUCK, E. J. y F. K. Lutgens. (2005). «Materia y minerales». En E. J. Tarbuck y F. K. Lutgens, *Ciencias de la Tierra* (8.a ed.). España: Prentice Hall.
- THOMPSON, L.; E. Troeh. (1988). *Los suelos y su fertilidad*. Barcelona, España: Revert S. A., 135-169.
- TORRES, G., Escobar, I., Palfe, G. y Casanova, A. (2012). Mycotrophy in Gilliesieae, a threatened and poorly known tribe of Alliaceae from central Chile. *Rev. chil. hist. na.* 85(2), 183
- TOVAR, J. (2008). *Evaluación de la capacidad antagonista «in vivo» de aislamientos de Trichoderma spp. frente al hongo fitopatógeno Rhizoctonia solani*. Bogotá: Universidad Javeriana.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) (2010). «Procesos de erosión. Sedimentación en causes y cuencas». Vol. 1. [José Daniel Brea, Francisco Balocchi. Editores]. Programa Hidrológico Internacional de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la UNESCO.
- USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. EE.UU: USDA.
- USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). (2006). *Manual de Taxonomía de Suelos*. EE.UU: USDA.



- USDA (United States Department of Agriculture). (2012). *Field Book for Describing and Sampling Soils- Version 3.0*. USDA Official website of the United States government-PDF; 6,9 MB.
- USDA-SSS (United States Department of Agriculture-Soil Survey Staff /Ministerio de Agricultura de los Estados Unidos- Servicio de Conservación de Suelos). (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos*. USA: NRSC-USDA.
- USDA/NRCS (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos/Servicio de Conservación de Recursos Naturales). (2014). *Claves para la taxonomía de suelos (Soil Survey Staff)*. [12a. Ed.]. EUU: USDA/ NRCS.
- VALVERDE, J. C. (1999). *Riego y Drenaje*. San José, Costa Rica: EUNED.
- VÁZQUEZ, A. y N. Bautista. (1993). *Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua*. México: Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- VITERI, S.; Martínez, J.; Bermúdez y J. 2008. «Selección de Abonos verdes para los suelos de Turmequé (Boyacá)». *Agronomía Colombiana* 26(2): 332- 339.
- ZALDÚA, S. y E. Sanfuentes. (2010). «Control de Botrytis cinerea en miniestacas de Eucalyptus globulus Utilizando Cepas de Clonostachys y Trichoderma». *Chilean journal of agricultural research*, 70(4), 576-582.

DIGITALES

- AGRICULTURES. (2015). «Las plantas se comunican mediante una internet de hongos». Agricultures. Recuperado de Red de especialistas en agricultura. Consultado 24 jul. 2015. Disponible en <<http://agriculturers.com/las-plantas-se-comunican-mediante-una-internet-de-hongos/>>.
- ALCR (Asamblea Legislativa de la Republica de Costa Rica). Decreto Ejecutivo 41960, MAG-MINAE del 12 de noviembre del 2019. «Metodología para la determinación de la Capacidad de uso de las tierras agroecológicas». *La Gaceta*, San José, Costa Rica. Recuperado de <http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=90001&nValor3=118346&strTipM=TC>.
- ALCR (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica). «Decreto Ejecutivo 29375, MAG-MINAE-S-HACIENDA-MOPT, del 21 de 03 del 2001». *La Gaceta*. San José, Costa Rica. Recuperado de <http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=46035&nValor3=97496¶m2=1&strTipM=TC&lResultado=2&strSim=simp>.
- ALTIERI, M; C. Nichoells. 2000. *Agroecología: teoría y práctica para una agricultura sustentable*. México: PNUMA. Recuperado de <<http://www.agro.unc.edu.ar/~biblio/AGROECOLOGIA2%5B1%5D.pdf>>.
- ALVARADO, A.; R. Mata y M. Chinchilla. (2014). «Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el periodo 1931-2014: Historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas». *Agronomía Costarricense*, 38(1), 75-106. Recuperado de <http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0377-94242014000100006&script=sci_arttext>.
- BARAHONA, E. (2018). «Degradación del suelo» (Lección 10). *Edafología.net*. Recuperado de <<http://www.edafologia.net/conta/tema10/tipos.htm>>. o <<http://edafologia.ugr.es>>.
- BARRIUSO, J.; M. Martín; S. Sánchez. (1º de junio de 2015). *Las micorrizas en sistemas agroforestales*. Recuperado de Researchgate.net, <https://www.researchgate.net/publication/279188543_Las_micorrizas_en_los_sistemas_agroforestales>.
- BAUTISTA-CALLES, J.; R. García-Espinosa; J. Pérez-Moreno; E. Zavaleta-Mejía; R. Montes-Beltmont y R. Ferrera-Cerrato. (2008). «Inducción de supresividad a fitopatógenos del suelo. Un enfoque holístico al control biológico». *Interciencia*, 33(2), 96-102. Recuperado de <http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000200005&lng=es&tlang=es>.



- BERTSCH, F.; R. Mata y C. Henríquez. (1993). «Características de los principales órdenes de suelos presentes en Costa Rica». En *Agricultura de hoy para la Costa Rica del mañana*. IX Congreso Nacional Agropecuario y de Recursos Naturales. (18-22 octubre, 1993, Colegio de Ingenieros Agrónomos, San José, Costa Rica). Sesiones de Actualización y Perspectivas. Resúmenes (15, pp. 1-19). Recuperado de <http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_ix/A01-1277-15.pdf>.
- CAIRO, P.; O. Herrera. (1994). *Algunas propiedades físicas de los suelos*. La Habana, Cuba: Editorial Pueblo y Educación. En García, Y; Ramírez, Wendy y Sánchez, Saray. «Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso». *Pastos y Forrajes* (2012), vol. 35, n.º 2. Recuperado de: <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0864-0394.
- CARVALHO, P. C. F. (6 de julio de 2016). «Perfiles por país del recurso pastura/forraje». Brasil. Recuperado de <http://www.fao.org/ag/agpc/doc/counprof/spanishtrad/brazil_sp/brazil_sp.htm#2>.
- CASANOVA, M.; W. Vera; W. Luzio y O. Salazar. (2017). *Manual de Edafología*. Recuperado de <http://www.grn.cl/MANUAL%20EDAFOLOGIA%20_2004.pdf>.
- CHÁVEZ-SIFONTES, M. y M. E. Domíne. (2013). «Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial». [Avances en Ciencias e Ingeniería]. Recuperado de <<http://oai.redalyc.org/articulo.oa?id=323629266003>>.
- CHINCHILLA, M.; A. Alvarado y R. Mata. (2011). «Factores formadores y distribución de suelos de la subcuenca del río Pirrís, Talamanca, Costa Rica». *Agronomía Costarricense* 35(1), 33-57. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/rev_agr/v35n01_completa.pdf>.
- CIA (Centro de Investigaciones Agronómicas, UCR). *Mapa digital de suelos de Costa Rica* (2016) [Portal del CIA-UCR]. Recuperado de <http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139>.
- CROSARA, A. (2017). «Práctica 1 de Edafología». *Curso de edafología*. Montevideo. UNICIEP. Recuperado de <<http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Practico%201.pdf>>.
- DE BUSTOS, M. (2013). «Muestreo de suelos». Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Recuperado de <<http://inta.gob.ar/documentos/muestreo-de-suelos-0>>.
- DOMERGUE, F. L. y M. Filella. (1998). «Boletín de las Unidades Españolas de Traducción de la Comisión Europea». Recuperado de <<http://ec.europa.eu/translation/bulletins/puntoycoma/51/pyc516.htm>>.
- DÖRNER, J.; R. Horn; W. Blum; S. Valle; O. Wendroth; F. Zúñiga; O. Thiers y O. Seguel. (2015). «Why do we have to celebrate the International Year of Soils?» *Agro Sur* 43(2), 1-2. DOI:10.4206/agrosur.2015.v43n2-01.
- DORRONSORO F. C. (13 de 08 de 2016). «Libros web, monografías, trabajos de investigación, conferencias, atlas ... sobre la Edafología y los suelos». *Edafología.net*. Recuperada de <<http://www.edafologia.net/index.htm>>.
- DRÉO, J.; (23 de abril de 2015). «Diagrama con el ciclo del Nitrógeno». [File: Ciclo del nitrógeno.svg]. Wikimedia Commons. Recuperada de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ciclo_del_nitr%C3%B3geno.svg>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2009). *Guía para la descripción de suelos*. [Traducido y adaptado al castellano por Ronald Vargas Rojas]. [Proyecto FAO-SWALIM, Nairobi, Kenya-Universidad Mayor de San Simón, Bolivia]. Recuperado de <<http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2015). «¿Qué es el suelo?». Definiciones clave. [Portal de Suelos de la FAO]. Recuperado de <<http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2015). «Salud Global del Suelo». Degradación del suelo. [Portal de Suelos de la FAO]. Recuperado de <<http://www.fao.org/soils-portal/degradacion-del-suelo/evaluacion-de-los-indicadores-globales-de-la-salud-del-suelo/salud-global-del-suelo/es/>>.



- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2016). «Conservación de los recursos naturales para una Agricultura sostenible». Recuperado de <http://www.fao.org/ag/ca/Training_Materials/CD27-Spanish/ba/organic_matter.pdf>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2015). *Carta Mundial de los Suelos*. Recuperado de <<http://www.fao.org/3/b-i4965s.pdf>>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). «Las funciones del suelo». (2015). [Infografía, PDF]. Recuperada de <<http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/294325/>>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2006). *Simple Methods for Aquaculture-Version 2*. Roma, Italia: FAO-CD-ROM. Recuperado de <<http://www.fao.org/3/a-a0840t.pdf>>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (Marzo del 2020) «Soil Clasification». Recuperado de <<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-classification/en/>>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2017). «Dominant Soils. Mapa de suelos dominantes del Mundo». Portal de Suelos de la FAO. (1988). Recuperado de: <<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/otros-mapas-y-bases-de-datos-globales-del-suelo/es/>>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma). (2016). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos*. Recuperado de <<http://www.fao.org/3/i3794es/i3794es.pdf>>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2016a). «Escasez y degradación de las tierras y el agua: creciente amenaza para la seguridad alimentaria». [Informe]. Recuperado de <<http://www.fao.org/news/story/es/item/95186/icode/>>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2016b). «Degradación del suelo». Portal de Suelos de la FAO. Recuperado de <<http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/es/>>.
- García Navarro, A. (2005). «Lección 4. Componentes del suelo. Fase sólida. Componentes minerales. Minerales primarios». Edafología. Ciencias Ambientales. [Área de Edafología y Química Agrícola. facultad de Ciencias]. Universidad de Extremadura, España. Recuperado de <<http://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/ECAL4FSCMMinPrim.htm>>.
- INBio (Instituto Nacional de Biodiversidad, Costa Rica). (2011). «Plumeria rubra». INBio. Heredia. Recuperado de <<http://www.crbio.cr:8080/neoportal-web/species/Plumeria%20rubra>>.
- INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria). (30 de enero 2020). «Plantilla de campo para la descripción de la capacidad de uso del suelo» [Versión: 06]. Órganos de inspección. Instructivos y Registros Departamento de Servicios Técnicos. Recuperado de <<https://www.inta.go.cr/servicios-y-productos/area-de-suelos>>.
- Kiersch, B. (2015). «Degradación de tierras, manejo sostenible del suelo, seguridad alimentaria. Una visión desde América Latina». FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). Recuperado de <<http://es.slideshare.net/FAOoftheUN/degradacion-de-tierras-manejo-sostenible-del-suelo-seguridad-alimentaria-una-visin-desde-amrica-latina>>.
- L'Abate, G.; C. Caracciolo; F. Villa; E. A.C. Constantini. (2016). «Opening Soil Data through Semantics an Linked data Vocabularies». GARR2016. [CREA-FAO-BC3-IKERBASQUE]. PowerrPoint presentation. Aprover (Year). Identifier <https://www.popdata.bcca/publishing_research_materials/citingsources>. Recuperado de <<https://eventi.garr.it/it/conf16/home/materiali-conferenza-2016/presentazioni/75-presentazione-g-l-abate/file>>.



- Marquez, D. (2010). Humedad en el suelo.jpg. Recuperado de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Humedad_en_el_suelo.jpg?useurlang=es>.
- Martínez M., J. J. (2013). «Evaluación del uso de un aislado fúngico micopatógeno aplicado en sustrato en plántulas de melón». (Trabajo final de maestría en Ingeniero Técnico Agrícola). Universidad de Almería, España. Recuperado de <<http://repositorio.ual.es:8080/jspui/bitstream/10835/26361/Trabajo.pdf>>.
- Martínez, J. (2013). Evaluación del uso de un aislado fúngico micopatógeno aplicado en sustrato en plántulas de melón. Universidad de Almería, España. Recuperado de <<https://core.ac.uk/download/pdf/143456735.pdf>>.
- Mata Chinchilla, R.; A. Rosales Ibarra; D. Sandoval Chacón. (2016). *Mapa de órdenes de suelo de Costa Rica*, según USDA. Recuperado de <http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139>.
- Melo, I, & Faull, J.L. (2000). «Parasitism of Rhizoctonia solani by strains of Trichoderma spp». *Scientia Agricola*, 57(1), 55-59. Recuperado de: <<https://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162000000100010>>.
- Mendieta López, M. y L. R. Rocha Molina. (2007). *Sistemas agroforestales*. Universidad Nacional Agraria. Managua, Nicaragua. Recuperado de <http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/training_material/docs/1_RENF08M538.pdf>.
- Molina, E. (2014). «Componentes de la acidez del suelo». Acidez de suelos y uso de enmiendas. Recuperado de <<https://www.slideshare.net/EloyMolinaRojas/acidez-de-suelos-y-uso-de-enmiendas-2014-elyo-molina-38144517>>.
- Moreira, I.; L. Fournier. (2003). «Análisis del sistema radicular del almendro (Dipteryx anamnesis –Pitt.– Record & Mell) en la zona norte de Costa Rica». *Revista Tecnología en Marcha* 16(4) 13-21, oct. 2003. Recuperado de: <http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/1487>.
- Pinochet, F. 1991. «Los suelos forestales de la región de Maule». *Universum* (Revista de Humanidades y Ciencias Sociales). Universidad de Talca. Instituto de Estudios Humanísticos. Recuperado de: <http://universum.utalca.cl/contenido/index-91/Fernando_Pinochet.pdf>.
- Pound. B. (1998) Cultivos de Cobertura para la Agricultura Sostenible en América. Recuperado de <<http://www.fao.org/livestock/agap/frm/agrofor1/Pound7.htm>>.
- RAE (Real Academia Española). (2017). *Diccionario de la Lengua Española (DELE)*. 23^a edición. Madrid: RAE. Recuperado de <<http://dle.rae.es/?w=diccionario>>.
- Rodas R., H. y Cisneros I., P. (Setiembre de 2000). «El riego por goteo a nivel familiar». MAG, San Salvador. Recuperado de <<http://m.exam-10.com/biolog/33305/index.html>>.
- Rosales, F. E. (Ed.); L. E. Pocasangre; J. Trejos; E. Serrano y W. Peña. (2010). *Guía de diagnóstico de la calidad y salud de suelos bananeros*. Recuperado de <https://www.bioversityinternational.org/fileadmin/_migrated/uploads/tx_news/Guia_de_diagnostico_de_la_calidad_y_salud_de_suelos_bananeros_1375.pdf>.
- Salcedo-Pérez, E.; A. Galvis-Spinola; T. M. Hernández-Mendoza; R. Rodríguez-Macias; F. Zamora-Natera; R. Bugarín-Montoya; R. Carrillo-González. (2007). «La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo». *Terra Latinoamericana*, 25(4), 419-425. Recuperado de <<http://www.redalyc.org/pdf/573/57315558010.pdf>>.
- Semarnat. (06 de enero de 2017). «Suelos». Recuperado de <http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf>.
- Solano, J. y Villalobos, R. (15 de julio de 2016). «Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica». Recuperado de <www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica>.
- Solórzano. N. (2015). «Aquejas de ladera». Consultado 29 de septiembre de 2016. Recuperado de <<https://centroagricolaesparza.wordpress.com/tag/acequia-de-ladera/>>.
- Tencio Camacho, R. (2014). «Uso de microorganismos benéficos en la agricultura orgánica o ecológica en Costa Rica. Costa Rica». Coordinación Regional de Producción Sostenible,



- MAG. Recuperado de <<http://drco-mag.yolasite.com/resources/Aplicacion%20de%20Microorganismos%20de%20Monta%C3%B1a%20en%20agricultura%20CR%202014%20por%20RTencio.pdf>>.
- UCA-Agrarias. (2015). «Morfología: Conceptos de Taxonomía». Recuperado de <http://es.slideshare.net/suelos_IPA/tema-iii-morfología-y-diagnósticos>.
- UNAD (Universidad Nacional Abierta y a Distancia). (31 de julio de 2016). «Lección 26. Densidad aparente, Porosidad y Estabilidad de agregados». Recuperado de <http://dataoteca.unad.edu.co/contenidos/30160/leccin_26_densidad_aparente_porosidad_y_estabilidad_de_agregados.html>.
- USDA (United States Department of Agriculture). (2016). «Soil Textures Calculator. EE.UU.: Natural Resources Conservation Service Soils. Soil Survey». Recuperado de <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167>.
- USDA-NRCS (United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service). (2015). *Soil Survey Staff. Illustrated guide to soil taxonomy*. National Soil Survey Center, Lincoln, Nebraska. USA: USDA-NRCS (pp. 3-71 y 3-98). Recuperado de <https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1247203.pdf>.
- USDA-NRCS (United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service). (1999). *Soil taxonomy. A basic system of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. [2a. ed.]. USA: USDA-NRCS (Agriculture Handbook, Number 436, pp. 53-74). Recuperado de <https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051232.pdf>.
- USDA/NRCS (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos/Servicio de Conservación de Recursos Naturales). (2006). «Claves para la Taxonomía de Suelos. (Soil Survey Staff)». [10^a. ed.] Recuperado de <http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_agronomicas/u2008411230spanish_keys.pdf>.
- Zapata Hernández, R. D. (2002). «Capítulo 2. Química de la acidez del suelo». [Inédito] Recuperado de: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/1735/3/9583367125.3.pdf>>.





ANEXOS

ANEXO 1

**FORMULARIO PARA DOCUMENTAR OBSERVACIONES
DE CAMPO DURANTE UN MAPEO DE SUELOS**

ANEXO 2

**PLANTILLA DE CAMPO PARA LA DESCRIPCIÓN
DE LA CAPACIDAD DE USO DEL SUELO**







ANEXO 1

FORMULARIO PARA DOCUMENTAR OBSERVACIONES DE CAMPO DURANTE UN MAPPO DE SUELOS

HOJA TOPOGRÁFICA				PERFIL N.º	
RESPONSABLE				FECHA	
PROVINCIA				DISTRITO	
LOCALIZACIÓN					
LONGITUD	LATITUD	ALTITUD (m s.n.m.)			
UNIDAD TIPOGRÁFICA					
LOCALIZACIÓN DEL PERFIL EN LA UNIDAD FISOGRÁFICA					
TOPOGRAFÍA VECINA				RELIEVE (%)	
TEMPERATURA EDÁFICA (°C)	AMBIENTAL (°C)	NIVEL FREÁTICO (m)			
PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL (mm)					
RÉGIMEN DE TEMPERATURA		DISTRIBUCIÓN			
RÉGIMEN DE HUMEDAD		RÉGIMEN DE HUMEDAD			
MATERIAL PARENTAL					
MATERIAL GEOLÓGICO					
VEGETACIÓN NATURAL					
USO ACTUAL DE LA TIERRA E INTENSIDAD					
EVIDENCIAS DE EROSION					
PROFUNDIDAD EFECTIVA					
LIMITANTE DE PROFUNDIDAD					
INUNDACIONES VISIBLES		TIPO DE INUNDACIÓN	FRECUENCIA		
DRENAJE	EXTERNO	INTERNO	CADA — AÑOS		
		INUNDACIONES TIPO			NATURAL
HORIZONTES DIAGNÓSTICOS		DRENAJE EXTERNO			
		EPEDÓN			
		ENDOPEDÓN			
CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DEL SUELO					
IDENTIFICAR FACTORES Y PROCESOS PEDOGENÉTICOS MÁS IMPORTANTES					
IDENTIFICAR PRINCIPALES LIMITANTES PARA VARIOS USOS					



CARACTERÍSTICAS		HORIZONTES					
NOMENCLATURA							
ESPESOR (m)							
Textra							
COLOR MUNSELL	Notación						
	Nombre						
ESTRUCTURA	Tipo						
	Clase						
	Grado						
CONSISTENCIA	Seco						
	Húmedo						
	Mojado						
POROSIDAD	Tamaño						
	Cantidad						
RAÍCES	Tamaño						
	Cantidad						
MANCHAS	Clase						
	Descripción						
ELEMENTOS GRUESOS	Clase						
	Descripción						
ESTADO DE OXIDACIÓN	Clase						
	Descripción						
ENCOSTRAMIENTO	Clase						
	Descripción						
GRIETAS	Clase						
	Descripción						
COMPACIAD	Clase						
	Descripción						
CEMENTACIÓN	Clase						
	Descripción						
REACCIONES	Naf						
	HCl						
	H ₂ O ₂						
LÍMITES	Nitidez						
	Topografía						
pH							
ACTIVIDAD DE MACROORGANISMOS							
FORMACIONES ESPECIALES							



ANEXO 2

PLANTILLA DE CAMPO PARA LA DESCRIPCIÓN DE LA CAPACIDAD DE USO DEL SUELO

[De conformidad con la "Metodología para la Determinación de la Capacidad de Uso de las Tierras Agroecológicas de Costa Rica", Decreto Ejecutivo N.º 41960-MAG-MINAE, La Gaceta N.º 215 del 12 de noviembre del 2019]

CÓDIGO: IN-PT-R01

VERSIÓN: 06 (30/1/2020)

PÁGINA: 1 DE 1

INFORMACIÓN POSESORIA _____ TITULACIÓN TIERRAS _____ INCENTIVO FISCAL _____

Nº DE PLANILLA		FECHA DE VISITA			
Nº REGISTRO DE CATASTRO		ALTITUD (M S.N.M.)			
USO ACTUAL	*NIVEL FREÁTICO	EVIDENTE (cm)			
		NO EVIDENTE (cm)			
		NO APLICA			
UBICACIÓN GPS		LATITUD	°	LONGITUD	
LIMITANTES		PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR CÓDIGO	
PENDIENTE		e₁	%		
EROSIÓN ACTIVA		e₂			
PROFUNDIDAD EFECTIVA		s₁	cm		
TEXTURA SUPERFICIAL		s₂			
TEXTURA DEL SUBSUELO		s₂			
PEDREGOSIDAD		s₃	%		
FERTILIDAD		s₄			
TOXICIDAD DE COBRE		s₅			
SALINIDAD		s₆			
DRENAJE		d₁			
RIESGO DE INUNDACIÓN		d₂			
ZONA DE VIDA		c₁			
PERÍODO SECO		c₂	MESES		
NEBLINA		c₃			
VIENTO		c₄			
UNIDAD E MANEJO					
OBSERVACIONES					

Marca superficial
0 a 30 cm

Marca subsuelo
31 a 60 cm

* Nivel freático: Evidente: Profundidad en centímetros al cual se encontró.
No Evidente: Más de 120 cm de profundidad y no se encontró. [Marcar con X]
No Aplica: No se utilizó la metodología. [Marcar con X]

PROFESIONAL RESPONSABLE: _____ FIRMA: _____

FUENTE: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) (2020).





GLOSARIO

agente quelatante. Sustancia que forma complejos con iones de metales pesados.

agricultura conservacionista. La utilización racional de las tierras para los fines de producción, buscando aumentar la productividad para satisfacer las necesidades de la población, evitando, reduciendo y controlando las prácticas y procesos mediante los cuales ellas se degradan, por medio del uso de tecnologías capaces de cumplir con estos objetivos y adaptadas a los sistemas de producción locales (FAO, 1996, PÁG. 5).

agroecología. Disciplina científica que enfoca el estudio de la agricultura desde la perspectiva ecológica.

anaerobio. Medio en el que hay ausencia de oxígeno.

andisol. Suelo de origen volcánico, con presencia de arcillas alófanas o no cristalinas.

angiospermas. Plantas con flores o semillas.

antagonismo. Relaciones negativas de una población basadas en la producción de sustancias tóxicas o en la creación de mecanismos de intolerancia para otras poblaciones.

arcillas 1:1. Minerales formados por capas tetraédricas y octaédricas de silicio y oxígeno, como la vermiculita y la montmorillonita.

arcillas 2:1. Minerales formados por capas tetraédricas cuya estructura laminar les permite expandirse y contraerse, como la caolinita o la halosita.

argiluvación. Procesos de migración de arcillas en el perfil del suelo.

biodisponible. Disponibilidad de nutrientes para la planta.

caldo bordelés. Solución acuosa de sulfato de cobre y cal hidratada, utilizada desde tiempos antiguos para combatir enfermedades de las plantas, debido a que cumple la función de fungicida y acaricida.

calicata. Hueco o corte trasversal del suelo para determinar la génesis del suelo o para conocer el perfil edáfico.

características ándicas. Las de suelos con presencia de arcillas amorfas.

cenocito. Célula multinucleada.

ciencia del suelo. Rama de las Ciencias que estudia el suelo en su composición y estructura como recurso natural en la superficie de la Tierra

coeficiente de extensibilidad. Es la relación de la diferencia entre la longitud en húmedo de un terrón con respecto a la longitud en seco (USDA SOIL SURVEY STAFF, 2014, P. 20).

comensalismo. Relación en la que una población se beneficia de otra, la cual no se ve afectada.

conductividad hidráulica. Propiedad que refleja el nivel de drenaje que tiene un suelo.

degradación del suelo. Cambio de una o más de sus propiedades a condiciones de menor utilidad, por medio de procesos físicos, químicos y biológicos.

disolución cárstica. Se origina por disolución indirecta del carbonato cálcico de las rocas calizas, debido a la acción de aguas ligeramente ácidas. La disolución del carbonato de calcio se representa por la siguiente ecuación: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$.

ecosistémico. Recursos o procesos de ecosistemas que, si se ve como un servicio, se entiende como el beneficio para los seres humanos respecto a su entorno.



edafogénesis. Proceso de formación y evolución del suelo a partir de una roca inicial no alterada.

eluvación. La remoción de materiales desde un horizonte en el cual se encuentran y su deposición en otro horizonte. Este proceso involucra movimiento y pérdida de material en el horizonte de donde parten las sustancias.

endopedones. Son los horizontes subsuperficiales o, en otras palabras, que se encuentran debajo de la superficie del suelo (PEÑA CORDERO, 2016).

entomopatógenos. Hongos que parasitan diferentes órdenes de insectos.

epipedones. Son los horizontes superficiales, conocidos como el manto superficial (PEÑA CORDERO, 2016).

epistemología. Rama de la filosofía que estudia los principios, los fundamentos, la extensión y los métodos del conocimiento humano.

erosión. Pérdida de suelo por acción de factores externos como agua o viento. (PEÑA CORDERO *et al.*, 2016, PÁG. 17).

etnoedafología. Disciplina científica que trata de cómo la gente entiende y maneja la tierra. Fue propuesto por B. Williams y C.A. Ortiz Solorio en 1981. (GARDI, *et al.*, 2014, P. 43).

eubacterias. Bacterias verdaderas, que tienen células procariotas.

facultativa. Atributo de bacterias que pueden desarrollarse tanto en presencia como en ausencia de oxígeno.

floculación. Proceso químico que aglomera sustancias coloidales mediante la adición de sustancias floculantes.

geomorfología. Es una rama de la geología que tiene como objeto el estudio de las formas de la superficie terrestre, enfocado a describir, entender su génesis y su actual comportamiento.

gleyaciación. Proceso en el que dominan las condiciones de reducción de los óxidos de hierro, los cuales llegan a alcanzar la forma ferrosa (Fe^{2+}). Este proceso sucede en condiciones

de anoxia, genera colores grises y/o moteados en el suelo y pone de manifiesto la presencia de mal drenaje

horizontes del suelo. Capas o estratos que se desarrollan en el suelo y presentan diferentes características químicas y físicas.

horizonte O. Horizonte orgánico que se desarrolla sobre el horizonte A.

humificación. Proceso de transformación de la materia orgánica del suelo en humus, sustancia de naturaleza coloidal producto de la degradación de materiales orgánicos.

iluvación. El descenso de materias del horizonte A al horizonte B. En otros casos, existe una migración ascendente, o bien, si se trata de pendientes, de una migración oblicua. La iluvación conlleva ganancia de material en los horizontes que reciben las sustancias.

inceptisol. Suelos poco desarrollados.

inmovilización de nitrógeno. Proceso en el que las relaciones C/N son altas (superiores a 30:1), porque los microorganismos del suelo consumen más amonio del que se produce en la descomposición, como resultado hay poco nitrógeno en el medio para las plantas.

intersticios. Cada uno de los espacios vacíos que quedan entre materiales (USDA SOIL SURVEY STAFF, 2014).

ligninas. Biopolímeros más abundantes en las plantas y junto con la celulosa y la hemicelulosa conforma la pared celular de las mismas en una disposición regulada a nivel nano-estructural, que dan como resultado redes de lignina-hidratos de carbono (CHÁVEZ Y DOMINE 2013).

litosfera. Capa externa y rígida de la Tierra, de profundidad variable entre los 10 y los 50 km.

manejo de suelos. Prácticas que se hacen para modificar, mantener o mejorar las características químicas, físicas y biológicas del suelo, con el fin de optimizar su productividad y función ambiental y evitar su degradación o contaminación en el tiempo.



melgas en contorno: Estructuras en el suelo para controlar la distribución y profundidad del agua dentro de un sistema de cultivo (NÚÑEZ SOLÍS, 2001, PÁG. 180).

meteorización. Conjunto de procesos externos que provocan la alteración y la disagregación de las rocas en contacto con la atmósfera.

meteorización física. Consiste en los procesos físicos que suceden en el material parental, se incluyen todos los que causan la desintegración de la roca, sin cambios químicos o mineralógicos.

mineral. Sustancia que aparece de forma natural. Es inorgánico, sólido y tiene una estructura interna ordenada.

mineralización. Concepto teórico que incluye la transformación completa de un compuesto orgánico en compuestos inorgánicos.

mutualismo. Relación obligatoria de dos poblaciones en las que ambas se benefician.

nivel freático. Aquel por debajo del cual el suelo y las rocas están permanentemente mojados (VALVERDE, 1999).

orientación de una mezcla. Consiste en la forma en la que están colocados sus tetraedros u octaedros.

origen fluvial. Material proveniente de ríos, arroyos, depósitos y relieves.

ósmosis. Proceso de transporte pasivo en el que dos líquidos o gases **se pueden mezclar gracias a una** membrana semipermeable, donde ambas sustancias tienden a llegar a un equilibrio, hasta igualar concentraciones

parasitismo. Relación en la que una especie es el hospedero de otra, la cual le causa enfermedad o muerte.

ped. Unidad fundamental del suelo, conocido como un agregado del suelo que se compone de arcilla, de limo o de arena, en conjunto con aire, poros, agua y materia orgánica.

pedón. Unidad tridimensional más pequeña del suelo, no debe tener un área

menor de 1 m² para adquirir el rango lateral de variabilidad.

perfil del suelo. Estructura vertical del suelo, conformada por los horizontes del suelo.

permafrost. Capa de suelo congelada (USDA SOIL SURVEY STAFF, 2014).

polipedón. Unidad geográfica característica más pequeña de suelo en un territorio y que se usa para clasificación, el cual es homogéneo (CASA-NOVA, VERA, LUZIO, & SALAZAR, 2017, P. 17).

polisacáridos. Polímeros compuestos por monosacáridos, unidos por enlaces glucosídicos.

porcentaje de pendiente. (Diferencia de altura/longitud) • 100

radio iónico. Distancia desde el centro del núcleo del átomo hasta su electrón estable más alejado. El concepto es similar al de radio atómico, pero cuando el átomo ha perdido o ganado electrones.

red trófica. Conjunto de cadenas alimentarias interconectadas que pueden establecerse en un ecosistema.

relaciones ecosistémicas. Procesos interrelacionados relativos a las comunidades bióticas y su interacción con la tierra, agua y aire. Un enfoque ecosistémicas es una estrategia para la ordenación integrada de la tierra, el agua y los recursos vivos que promueve la conservación y el uso sostenible de manera equitativa

saprofita. Organismo vivo que obtiene su energía de materia orgánica.

seguridad alimentaria. La disponibilidad y el acceso -físicos, sociales y económicos- de alimentos que las personas tienen.

simbiosis. Asociación entre organismos de diferentes especies, que buscan beneficiarse mutuamente durante su desarrollo.

sinergismo. Relación entre dos comunidades de organismos las cuales se benefician mutuamente.



sintrofía. Relación sinérgica que se basa en el suministro de energía y nutrientes.

suelos no disturbados. No intervenidos por el ser humano o en estado de conservación.

superficie específica de arcillas. Es la relación de área superficial (en m^2) que existe por unidad de masa (en g) de material arcilloso.

textura del suelo. Proporción, en porcentaje, de los componentes minerales con partículas de diámetro menor de 2 mm, los cuales se encuentran representados por arenas, limos y arcillas (humus).

ultisoles. Suelos viejos meteorizados.

vegetación clímax. Aquella comunidad que puede desarrollarse estable y sosteniblemente bajo las condiciones climáticas y edáficas.

vetiver. Planta utilizada para las prácticas de conservación de suelo en líneas de contorno. Su nombre científico es *Chrysopogon zizanioides*.

zeolita. Mineral micro poroso que es conocido en el campo agrícola como acondicionador de suelos por generar alta capacidad de intercambio catiónico.

zona de vida (SEGÚN LESLIE HOLDRIDGE). Sistema de clasificación de regiones que contempla regiones latitudinales, en cada una se establecen las zonas de vida las cuales incluyen asociaciones de áreas terrestres según su comportamiento global bioclimático. El sistema de clasificación fue desarrollado, publicado y actualizado por el científico Leslie Holdridge en 1947 y 1967, respectivamente.





El proyecto gráfico se apoyó en el trabajo de ilustración de Alejandra Céspedes Brenes y José Francisco (Franco) Céspedes Carvajal, salvo que se indique lo contrario, con excepción de las fotografías y aquellas imágenes que se reproducen con fines educativos

El trabajo de ilustración consistió en redibujar o remozar (en algunos casos) la mayoría de las imágenes en un proceso de adaptación a partir de referentes y según las intenciones y sugerencias de la autora. Se procuró, en la mayoría de lo posible, mantener la intención original de la propuesta, así como el respeto a la autoría, como sucede con las imágenes que se reproducen fielmente, a partir de una fuente confiable.

FIGURA 1. ILUSTRACIÓN DE LA TEORÍA DEL MÍNIMO. «Ley Mínima» según Justus von Liebig (1803-1873). Archivo: Minimum-Tonne.svg., ilustración: Doof (2009), imagen de dominio público. Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AMinimum-Tonne.svg>>.

FIGURA 2. CRONOLOGÍA DEL ORIGEN DE LA EDAFOLOGÍA COMO CIENCIA:

- Retrato de Hipócrates, archivo: Hippocrates pushkin02.jpg, fotografía: user:shakko (2008). Reproducida con fines educativos, bajo licencia de Creative Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hippocrates_pushkin02.jpg>.
- Portrait of Empedocles, archivo: Empedocles in Thomas Stanley History of Philosophy.jpg, fotografía: autor desconocido (1655), imagen de dominio público. Reproducida con fines educativos, bajo licencia de Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Empedocles_in_Thomas_Stanley_History_of_Philosophy.jpg>.
- Teofrasto. Ancient greek philosopher and botanist, archivo: Teofrasto Orto botánico detail.jpg, fotografía: tato grasso (2009). Reproducida con fines educativos, bajo licencia de Creative Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Teofrasto_Orto_botanico_detail.jpg>.
- Justus von Liebig, archivo: Justus von LiebigNIH.jpg, fotografía: autor desconocido ca. 1866, imagen de dominio público. Reproducida con fines educativos, bajo licencia de Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Justus_von_Liebig_NIH.jpg>.
- Vasili Dokucháyev, archivo: Dokuchaev 1888.jpg, fotografía: Constantin Shapiro (-1900), imagen de dominio público. Reproducida con fines educativos, bajo licencia de Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dokuchaev_1888.jpg>.
- Konstantin Glinka, archivo: Glinka2.jpg, fotografía: International Soil Sinece Congress, USA (1927), imagen de dominio público. Reproducida con fines educativos, bajo licencia de Wikimedia Commons: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Glinka2.jpg>>.
- Curtis Fletcher Marbut, archivo: Curtis F. Marbut Papers, fotografía: The State Historical Society of Missouri, Manuscript Collection-Columbia C3720; autor desconocido. Reproducida con fines educativos, cortesía de Historic Missourians: <<https://historicmissourians.shsmo.org/historicmissourians/name/m/marbut/>>.
- I Congreso internacional de Ciencias del Suelo, archivo: International Congress of Soil Science 1927.jpg, fotografía: International Soil Scienc Society (1927), imagen de dominio público. Reproducida con fines educativos, bajo licencia de Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:International_Congress_of_Soil_Science_1927.jpg>.

CRÉDITOS DE LAS ILUSTRACIONES UTILIZADAS EN ESTA OBRA

FIGURA 5. INTEGRACIÓN DE LOS SISTEMAS EN EL SUELO. Adaptación de la figura 1 del artículo «Dinámica del suelo», publicada en Revista Creces de Ravid Rimer (feb. 2004). Reproducida con fines educativos: <<http://www.creeses.cl/Contenido?art=1632>>.

FIGURA 6. FUNCIONES ECOSISTÉMICAS DEL SUELO. Adaptación de la infografía «Funciones del suelo», de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO (2015). Reproducida con fines educativos: <<http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/294325/>>.

FIGURA 10. EFECTO DEL TIEMPO EN LA FORMACIÓN DE LOS SUELOS. «Suelo». Archivo: Formación del suelo.png, ilustración: User:Sinnya (2009). Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Formación_del_suelo.png>.

FIGURA 11. METEORIZACIÓN FÍSICA: FRAGMENTACIÓN DE LA MATERIA PARENTAL. «Formación del suelo». Biología, Weebly.com. Figura 1. Reproducida con fines educativos: <<http://2biologia.weebly.com/formacionacuten-del-suelo.html>>.

FIGURA 12. PERFIL DE UN SUELO CON HORIZONTES O, A, B, C Y R. «Agricultura biointensiva». Archivo: Horizontes suelo.png, ilustración: Pastranec (2007). Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Horizontes_suelo.png>.

FIGURA 13. ESTRUCTURA DEL SILICATO. A) «La zeolita, una piedra que hierve». Bibliotecadigital. Reproducida con fines educativos. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/55/htm/sec_3.html>. B) «Silikaat». Archivo: Silicate-tetrahedron-2D.png, ilustración: Benjah-bmm27 (2007). Reproducida con fines educativos: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Silicate-tetrahedron-2D.png>>.

FIGURA 14. OLIVINO: UN ORTOSILICATO. «Los silicatos» (2015). Químicas. net. Reproducida con fines educativos: <<https://www.quimicas.net/2015/09/los-silicatos.html>>.

FIGURA 15. SOROSILICATO. «Los silicatos» (2015). Químicas. net. Reproducida con fines educativos: <<https://www.quimicas.net/2015/09/los-silicatos.html>>.

FIGURA 16. CICLOSILICATO. «Los silicatos» (2015). Químicas. net. Reproducida con fines educativos: <<https://www.quimicas.net/2015/09/los-silicatos.html>>.

FIGURA 17. INOSILICATOS SIMPLE Y DOBLE. «Los silicatos» (2015). Químicas. net. Reproducida con fines educativos: <<https://www.quimicas.net/2015/09/los-silicatos.html>>.

FIGURA 18. ESTRUCTURA INTERNA TRIDIMENSIONAL DE UN CUARZO. «Kuarts», archivo: Beta-quartz-CM-2D-balls.png, ilustración: Ben Mills (2008). Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons: <<https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Beta-quartz-CM-2D-balls.png>>.

FIGURA 19. FILOSILICATO. «Los silicatos» (2015). Químicas. net. Reproducida con fines educativos: <<https://www.quimicas.net/2015/09/los-silicatos.html>>.

FIGURA 20. ZONA INTERTROPICAL. «Trópico», archivo: World Map Torrid.svg. Derivado vía inkscape del archivo: CIA_World Factbook-Political_world.svg. Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World_map_torrid.svg>.

FIGURA 21. SUELOS DOMINANTES EN EL MUNDO. Global Soil Regions. Cortesía del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y del Servicio de Conservación de Recursos



Naturales (USDA/NRCS, por sus siglas en inglés) [Proyección de Robinson, escala 1:130 millones, noviembre 2005]. Reproducida con fines educativos: <https://www.nrcc.usda.gov/wps/portal/nrcc/detail/soils/use/?cid=nrcc142p2_054013>.

FIGURA 22. ECOSISTEMA NATURAL Y MATERIA ORGÁNICA. Basado en Modelos edafológicos de sistemas agroforestales, de H.W. Fassbender. Centro Agrónomico Tropical de Investigación (CATIE. 1993, p. 23). Reproducida con fines educativos: <<http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0813e/A0813e.pdf>>.

FIGURA 23. MODELOS SISTEMÁTICOS PARA MUESTREO DE SUELOS. «Análisis de suelos: Guía Práctica de muestreo», I&D (Investigación y Desarrollo) 12 (5), de Juan M. Aloé y Mirta Toribio (2007). Profertil. Reproducida con fines educativos: <<https://www.profertilnutrientes.com.ar/archivos/instructivo-analisis-suelo>>.

FIGURA 25. ESQUEMA DE MUESTREO DE SUELOS. «Determinaciones en suelos: Instrucciones para tomar una muestra de suelo», de Olivero Duggan (2009). Laboratorio SUELOFERTIL. Reproducida con fines educativos: <<http://www.suelo-fertil.com.ar/quienesomos.htm>>.

FIGURA 27. MÉTODO DE TOMA DE MUESTRA DE SUELO CON PALIN. «Análisis de suelos: Guía Práctica de muestreo», I&D (Investigación y Desarrollo) 12 (5), de Juan M. Aloé y Mirta Toribio (2007). Profertil. Reproducida con fines educativos: <<https://www.profertilnutrientes.com.ar/archivos/instructivo-analisis-suelo>>.

FIGURA 28. CUARTEO DE LA MUESTRA. «Muestreo de suelos», artículo de divulgación, de María Eugenia de Bustos (2013). INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Reproducida con fines educativos: <<https://inta.gob.ar/documentos/muestreo-de-suelos-0>>.

FIGURA 29. DIMENSIONES DE LA CALICATA. Simple Methods for Aquaculture – Version Roma, Italia: FAO- CD-ROM. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2006).. Reproducida con fines educativos: <<http://www.fao.org/3/a-a0840t.pdf>>.

FIGURA 30. PARTICULAS MINERALES DEL SUELO. «Estructura del suelo», FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2006). Reproducida con fines educativos: <http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s07.htm>.

FIGURA 32. TRIÁNGULO DE CLASIFICACIÓN TEXTURAL SEGÚN EL DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE LOS ESTADOS UNIDOS. «Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo», de Donald Gabriels y Deyanira Lobo L. Revista Venesuelos, (2011, 14, 43). Reproducida con fines educativos: <http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/982/911>.

FIGURA 33. ESTADO DE LOS COLOIDES DEL SUELO. «Estructura del suelo». FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2006). Reproducida con fines educativos: <http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s07.htm>.

FIGURA 34. DIAGRAMA DE UNA BUENA ESTRUCTURA DEL SUELO. «Estructura del suelo». FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2006). Reproducida con fines educativos: <http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s07.htm>.

FIGURA 35. TIPOS DE ESTRUCTURAS DEL SUELO. adaptada de Field Book for describing and sampling soils. Vers. 3.0, de National Soil Survey Center. Natural Resources Conservation Services. U.S. Department of Agriculture. (2012). Reproducida con fines educativos. <[https://www.google.com/search?client=safari&rls=en&q=adaptada+de+Field+Book+for+describing+and+sampling+soils.+Vers.+3.0.+de+National+Soil+Survey+Center.+Natural+Resources+Conservation+Services.+U.S.+Department+of+Agriculture.++\(2012\).&ie=UTF-8&oe=UTF-8](https://www.google.com/search?client=safari&rls=en&q=adaptada+de+Field+Book+for+describing+and+sampling+soils.+Vers.+3.0.+de+National+Soil+Survey+Center.+Natural+Resources+Conservation+Services.+U.S.+Department+of+Agriculture.++(2012).&ie=UTF-8&oe=UTF-8)>.

FIGURA 37. POROSIDAD EN SUELOS ARENOSOS Y ARCILLOSOS. «Interpretación de resultados de textura y humedad del suelo». Fertilidad de suelos (Fertilab). Adaptación con fines educativos: <<https://www.fertilab.com.mx/Sitio/Vista/Interpretacion-De-Resultados-De-Textura-Y-Humedad-Del-Suelo.php>>.

FIGURA 38. POROSIDAD EN LOS HORIZONTES A Y B DE ULTISOLES CON DIFERENTE MATERIAL PARENTAL (TALAMANCA, COSTA RICA). «Caracterización de la densidad de algunos suelos ultisoles en la zona de los Santos, Talamanca, Costa Rica», de Miguel Chinchilla, Rafael Mata y Alfredo Alvarado (2011, p. 71). Reproducida con fines educativos: <https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242011000100004>.

FIGURA 39. PUENTES DE HIDRÓGENO ENTRE MOLÉCULAS DE AGUA. Modelo de enlaces de hidrógeno en agua. Archivo: 3D model hydrogen bonds in water.svg, ilustración de Magasjukur2. Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3D_model_hydrogen_bonds_in_water.svg>.

FIGURA 40. CONDICIONES DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO. «Dinámica del agua en el suelo.» Archivo: Humedad en el suelo.jpg, ilustración de Diego Márquez (2010). Reproducida con fines educativos bajo licencia Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Humedad_en_el_suelo.jpg>.

FIGURA 41. FORMA DEL BULBO HÚMEDO EN EL SUELO, SEGÚN LA CLASE DE TEXTURA. «El riego por goteo a nivel familiar», de Héctor Amilcar Rodas Ruiz y Patricia I. Cisneros de Ramírez (2000). MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). Reproducida con fines educativos: <<https://m.exam-10.com/biolog/33305/index.html>>.

FIGURA 42. ESCALA DE pH. «pH». Archivo: EscalabH, ilustración de PatriciaR (2007). Reproducida con fines educativos, bajo licencia Wikimedia Commons: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EscalabH.png>>.

FIGURA 43. TIPOS DE ACIDEZ EN LA SOLUCIÓN DEL SUELO. «Acidez del suelo y uso de enmiendas», de Eloy Molina (2014). Reproducida con fines educativos: <<https://es.slideshare.net/EloyMolinaRojas/acidez-de-suelos-y-uso-de-enmiendas-2014-ely-molina>>.

FIGURA 44. DISPONIBILIDAD DE NUTRIMENTOS DEL SUELO SEGÚN VALORES DE pH. «Fertilizing woody ornamentals». University Park, PA: Pennsylvania State University, College of Agriculture, from Kuhns, L.J. (1985). Reproducida con fines educativos: <https://www.researchgate.net/figure/The-relative-availability-the-wider-the-band-the-more-available-the-nutrient-of-the_fig1_272819184>.

FIGURA 45. INTERCAMBIO CATIÓNICO DEL SUELO. «Introducción a la Edafología», Lección 5. Propiedades fisicoquímicas, de Carlos Dorronsoro. Edafología.net (2016). Reproducida con ligeras modificaciones para fines educativos: <<http://www.edafologia.net/introeda/tema00/progr.htm>>.

FIGURA 48. CICLO DEL NITRÓGENO. Diagrama con el ciclo del Nitrógeno. Archivo: Ciclo del nitrógeno. svg, ilustración: Johann Dréo (2015). Reproducida con fines educativos, bajo licencia de Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ciclo_del_nitrógeno.svg>.

- FIGURA 50. MICROORGANISMOS DEL SUELO.
- A) Archivo: Streptomyces_sp_01.png, fotografía: David Beard (1972), Imagen de dominio público. Reproducida con fines, bajo licencia de Wikimedia Commons: <https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Streptomyces_sp_01.png>.
 - B) Archivo: Root Nodules with leghaemoglobin 'pink' visible. JPG, fotografía de Rosser1954 (2014). Imagen de dominio público. Reproducida con fines, bajo licencia de Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Root_Nodules_with_leghaemoglobin_%27pink%27_visible.JPG>.



FIGURA 51. FASES DEL COMPOSTAJE. Manual del compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina, de Pilar Román, María M. Martínez y Alberto Pantoja [Con el respaldo de la FAO, Chile]. (2013, p. 25). Reproducida con fines educativos: <<http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>>.

FIGURA 52. HONGOS ANTAGONISTAS. «Parasitism of Rhizoctonia solani by strains of Trichoderma harzianum», de Itamar Soares de Melo y Jane L. Faull (2000). Figura 3. Sem micrographs colling of Trichoderm harzianum (Th-9) Over R. solani. Reproducida con fines educativos: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-9016200000100010&script=sci_arttext&tlang=en>.

FIGURA 53. MICORRIZAS EN LAS RAÍCES DE LA PLANTA.

«Mycotrophy in Gilliesieae, a threatened and poorly known tribe of Alliaceae from central Chile», de Gustavo A. Torres-Mellado, Inelia Escobar, Götz Pálfer y M. Angélica Casanova-Katny (2012 p. 183). Figura 2. Diagnostic arbuscular mycorrhizal structures in fine roots of Gilliesieae from Chile; (A) appressorium and entry point (arrowhead) on root surface of Gilliesia graminea. Reproducida con fines educativos: <<https://scielo.conicyt.cl/pdf/rchnat/v85n2/art04.pdf>>.

FIGURA 55. MAPA DE SUELOS DOMINANTES DE FAO/UNESCO.

Opening Soil Data through Semantics an Linked data Vocabularies, de Giovanni L'Abate, Caterina Caracciolo, Ferdinando Villa, Edoardo A.C. Constantini, en GARR2016, Florencia, Italia. Reproducido con fines educativos, cortesía de FAO/EC/ISRIC. Reproducido con fines educativos, cortesía de FAO/EC/ISRIC: <<https://eventi.garr.it/it/conf16/home/materiali-conferenza-2016/presentazioni/75-presentazione-g-l-abate/file>>.

FIGURA 57. EPIPEDÓNES SEGÚN LA TAXONOMÍA DE SUELOS

DE LA USDA EN COSTA RICA. Morfología: Conceptos de Taxonomía, de UCA-Agrarias (2015), Soil taxonomy: A basic system of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys, de USDA-NRCS (1999, pp. 53-74) y Soil Survey Staff. Illustrated guide to soil taxonomy, de USDA-NRCS (Versión 2.0, Septiembre 2015, pp. 3-15 y 3-17). Fotografías reproducidas con fines educativos, por cortesía de USDA-NRCS (1999):

- <https://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i15496_001.pdf>.
- <<https://www.secs.com.es/wp-content/uploads/2014/09/Illustrated-Guide-to-Soil-Taxonomy1.pdf>>.

FIGURA 58. ENDOPEDONES SEGÚN LA TAXONOMÍA DE SUELOS

DE LA USDA EN COSTA RICA. Morfología: Conceptos de Taxonomía, de UCA-Agrarias (2015), Soil taxonomy: A basic system of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys, de USDA-NRCS (1999, pp. 53-74) y Soil Survey Staff. Illustrated guide to soil taxonomy, de USDA-NRCS (Versión 2.0,

Septiembre 2015, p. 3-71). Fotografías reproducidas con fines educativos, por cortesía de USDA-NRCS (1999).

FIGURA 59. PRINCIPALES GRUPOS DE SUELO DE REFERENCIA (GSR) EN LATINOAMÉRICA SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE LA WRB. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, de los editores: Ciro Gardi, Marcos Angelini, Sara Barceló, Juan Comerma, Carlos Cruz Gaistardo, Arnulfo Encina Rojas, Arwyn Jones, Pavel Krasilnikov, María de Lourdes Mendoza Santos Brefin, Luca Montanarella, Olegario Muñiz Ugarte, Peter Schad, María Isabel Vara Rodríguez y Ronald Vargas (2014, p. 44). Reproducido con fines educativos: <<https://www.google.com/search?client=safari&rls=en&q=ATLASLAC.pdf&ie=UTF-8&oe=UTF-8>>.

FIGURA 60. ÓRDENES DE SUELOS PARA COSTA RICA. Mapa de órdenes de suelo de Costa Rica según USDA, de Rafael Mata Chinchilla, Albán Rosales Ibarra, D'Angelo Sandoval Chacón (2016). Reproducido con fines educativos, por cortesía de UCR, CIA, INTA e IICA: <<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/av-1630.pdf>>.

FIGURA 61. SUBÓRDENES DE SUELOS PARA COSTA RICA. Mapa de subórdenes de suelo de Costa Rica según USDA, de Rafael Mata Chinchilla, Albán Rosales Ibarra, D'Angelo Sandoval Chacón (2016). Reproducido con fines educativos, por cortesía de UCR, CIA, INTA e IICA: <<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/av-1630.pdf>>.

FIGURA 62. DISTINTOS PERFILES DE SUELOS CLASIFICADOS SEGÚN LA TAXONOMÍA DE SUELOS DE LA USDA EN COSTA RICA. Fotografías reproducidas con fines educativos, cortesía de Carlomagno Salazar Calvo.

FIGURA 64. DEGRADACIÓN DE SUELOS EN MESOAMÉRICA Y AMÉRICA DEL SUR. Degradación de tierras manejo sostenible del suelo. Seguridad alimentaria. Una visión desde América Latina, de Benjamin Kiersch (2015, p. 23). Reproducida con fines educativos: <<https://www.slideshare.net/FAOoftheUN/degradacion-de-tierras-manejo-sostenible-del-suelo-seguridad-alimentaria-una-visin-desde-amrica-latina>>.

FIGURA 68. CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE EROSIÓN. Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la Región de Coquimbo, Chile, de Roberto Pizarro, Carolina Morales, Leonardo Vega, Claudio Olivares, Rodrigo Valdés y Francisco Balocchí (2009, p. 17). Reproducida con fines didácticos: <https://www.researchgate.net/publication/269710187_Propuesta_de_un_modelo_de_estimacion_de_erosion_hidrica_para_la_region_de_Coquimbo_Chile_Documento_Tecnico_del_PHILAC_N_18>.





ACERCA DE LA AUTORA

PAOLA BRENES ROJAS

Ingeniera agrónoma graduada por la Universidad EARTH, Costa Rica en el año 2006 y posee, a su vez, una maestría académica en Manejo de Recursos Naturales con énfasis en biodiversidad por la Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.

Actualmente se desempeña como profesional en ordenamiento territorial del Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU) y además es profesora universitaria e investigadora en la Universidad Estatal a Distancia (UNED) desde el año 2011. En ambas instituciones indaga en temas referentes a los ámbitos de la conservación del recurso suelo, la planificación de las tierras de uso agropecuario, así como sobre las estrategias de manejo en los sistemas agrícolas basados en la adaptación y mitigación del cambio climático.

Es miembro activa de la Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS) donde, recientemente, forma parte de su Junta Directiva y, desde su posición, busca dar a conocer la necesidad fundamental de la protección del recurso suelo.



