

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE PREPARATORIA AGRÍCOLA
ÁREA DE AGRONOMÍA
ACADEMIA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**



EL SUELO. FORMACIÓN, PROPIEDADES Y MANEJO

Origen y formación de los suelos

Propiedades físicas del suelo

Propiedades fisicoquímicas y químicas del suelo

La materia orgánica del suelo

Los organismos del suelo

Labranza del suelo

ROGELIO ÁLVAREZ HERNÁNDEZ

Chapingo, México, 1 de mayo de 2023

EL SUELO. FORMACIÓN, PROPIEDADES Y MANEJO

ORIGEN Y FORMACIÓN DE LOS SUELOS

INTRODUCCIÓN

El suelo es la capa de material fértil que cubre la superficie de la Tierra. El suelo es el objeto de estudio de la Edafología, la cual lo define **COMO** "ENTE NATURAL ORGANIZADO E INDEPENDIENTE, CON UNOS CONSTITUYENTES, PROPIEDADES Y GÉNESIS QUE SON EL RESULTADO DE LA ACTUACIÓN DE UNA SERIE DE FACTORES ACTIVOS (CLIMA, ORGANISMOS, RELIEVE Y TIEMPO) SOBRE UN MATERIAL PASIVO (LA ROCA MADRE)". Se define también como cuerpo natural compuesto de materiales minerales y orgánicos, líquidos y gases, cubre gran parte de la superficie de la tierra, y se organiza en horizontes diferenciables de la superficie y del material original.

El suelo agrícola es la capa superficial de la corteza terrestre, cuyo origen son las rocas que han sufrido transformaciones físicas, químicas y bioquímicas a lo largo del tiempo por la acción de los elementos físicos del ambiente y por los organismos vivos; y se ha estructurado en una compleja matriz sólida porosa que contiene agua y gases en forma balanceada y es capaz de albergar la vida y ser el sustrato donde se desarrollan las raíces de las plantas y el reactor biológico dentro del cual se recicla la materia y fluye la energía de manera natural por la acción de los organismos desintegradores.

El suelo es el sustrato natural que soporta la producción agrícola, es un cuerpo natural que alberga a organismos que tienen la función del reciclamiento de la materia orgánica e inorgánica y sirve como filtro para el agua subterránea. Cumple con funciones ecológicas muy importantes como la captura de CO₂ y es el depósito de importantes ciclos biogeoquímicos. El suelo puede tener muchas utilidades y puede definirse de acuerdo con ellas. Así, para el ingeniero civil, un suelo apropiado para la edificación sería uno firme, con materiales rocosos en la superficie y con gran capacidad para soportar el peso de las construcciones. El suelo agrícola, en contraparte, debe de tener propiedades capaces de proporcionar un medio adecuado para el crecimiento y desarrollo de las raíces de las plantas, incluyendo su capacidad para retener humedad y drenar excesos de agua (buen drenaje); alta y permanente generación de nutrientes y capaz de mantener una alta actividad biológica.

FORMACIÓN DEL SUELO.

Los suelos se originan de las rocas que sufren cambios muy importantes para finalmente dar lugar a una matriz sólida porosa donde existen las fases gaseosa y líquida de la materia. Es un cuerpo tridimensional, dinámico y vivo. Se puede considerar como un complejo reactor biológico que posee una maquinaria compuesta de poblaciones y comunidades de animales y microorganismos.

Factores de formación. El suelo procede de la roca madre, la cual se altera por la acción del clima y otros factores, y en su formación se desarrollan una serie de procesos que transforman el material original hasta darle una morfología y propiedades propias. Cada suelo tiene características muy particulares resultantes de la influencia de sus factores formadores: (1) MATERIAL ROCOSO PARENTAL, (2) CLIMA [MEDIO AMBIENTE FÍSICO], (3) ORGANISMOS [ANIMALES, PLANTAS Y MICROORGANISMOS], (4) RELIEVE Y (5) TIEMPO; “las propiedades de los diferentes suelos están dados por la interacción de los factores de formación y de la combinación de interrelaciones” (Hernández, *et al.*, 2006).

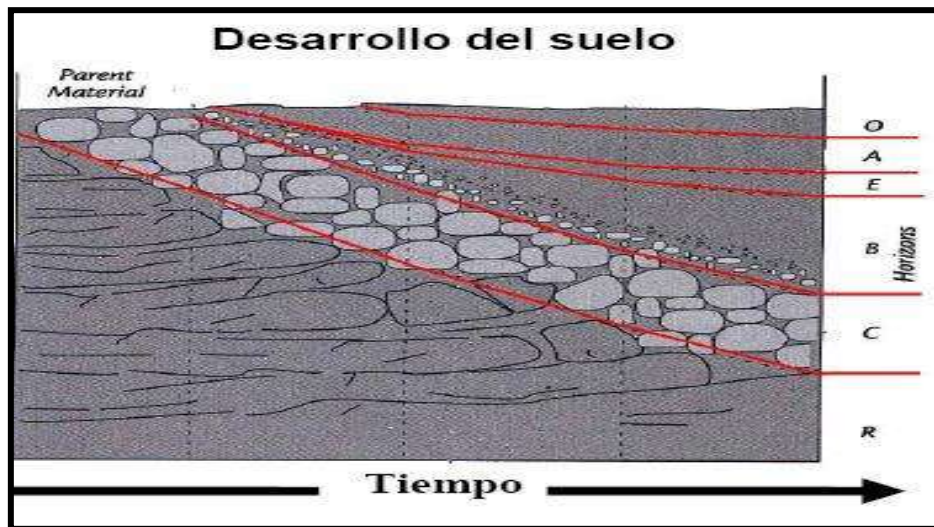
El suelo puede ser considerado como una determinada combinación de sus factores formadores. Esta concepción de él, fue expresada por primera vez por Jenny en 1940 según la siguiente ecuación:

$$f(\text{suelo}) = \{\text{Material madre, Clima, Organismos, Relieve, Tiempo}\}$$

Para evaluar la influencia de cada factor formador en las propiedades del suelo, basta en teoría con mantener constantes todos los demás. Así para ver la importancia del tiempo, la ecuación fundamental quedaría así:

Figura 1.

Desarrollo del suelo en función del tiempo.



En un territorio relativamente grande, los suelos pueden variar de acuerdo con el predominio de sus factores formadores. De un lugar a otro, con seguridad, los suelos van a variar y, por lo tanto, su manejo tiene que ser diferente. El éxito de cualquier sistema de producción agrícola se basa en proporcionarle un manejo óptimo al suelo, de acuerdo con sus particularidades.

El manejo del suelo no solo tiene un enfoque productivista, sino que también se debe considerar que este puede sufrir degradación; entonces, es necesario contemplar sus características, pues tal como menciona (Hernández, *et al.*, 2006):

Solamente por el estudio constante del medio natural, las condiciones del clima y relieve, el carácter de las rocas madre y la vegetación en relación con las propiedades de los suelos, obtendremos información necesaria para pronosticar los cambios que pueden ocurrir por influencia del hombre.

Es así como esto es fundamental para también conservarlo y que mantenga su potencial productivo con el paso del tiempo.

Figura 2.

Importancia de la vegetación del suelo.



Fuente: AGRONLINE, 2020.

Nota: La vegetación del suelo es un aspecto fundamental para su bienestar, pues actúa como barrera de protección ante la erosión; esta capacidad se aprovecha en prácticas de agricultura sostenible como la labranza cero.

“Para lograr una agricultura sostenible es necesario ante todo encaminar el estudio genético del suelo, determinar sus propiedades, incluyendo la fertilidad natural y sus cambios por el hombre, las causas de la distribución de los suelos, su regionalización geográfica y mejorativa; y sus características agroproductivas. (Hernández, *et al.*, 2006).

LA ROCA O MATERIAL PARENTAL COMO FACTOR FORMADOR. El material parental o material madre puede ser de muy diversa naturaleza. Las rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas le confieren al suelo un sello de origen. Por ejemplo, suelos derivados de rocas sedimentarias calizas tendrán características físicas, químicas, biológicas e hidrodinámicas muy diferentes a los suelos originados de las rocas ígneas. Lo anterior tiene que ver con el tipo de minerales primarios de las rocas y de los procesos de intemperismo. La roca representa la fuente de minerales. El influjo de las rocas en los constituyentes y propiedades de los suelos es marcado en suelos más jóvenes y menos patente conforme transcurre el tiempo. Los factores de la roca que influyen en la formación de suelos son: **1.COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.** Las rocas que contengan

abundantes minerales inestables evolucionarán fácilmente para formar suelos. 2. **PERMEABILIDAD.** Regula la penetración y circulación del aire y del agua, lo que condiciona de la fragmentación, alteración y translocación de los materiales. 3. **GRANULOMETRÍA.** Las arenas presentan una gran estabilidad frente a la alteración. Cuanto mayor es el tamaño del grano menos superficie de ataque presenta a la agresión del medio. La granulometría gruesa da lugar a materiales muy porosos para la rápida circulación del agua. Las arcillas ofrecen unos comportamientos opuestos.

Figura 3.

Granulometría en suelos arcillosos y arenosos.



Fuente: Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura, 2016.

EL CLIMA COMO FACTOR FORMADOR. Los elementos del tiempo y del clima son los responsables del grado y velocidad de la formación del suelo; (De las Salas, 1987) menciona que:

Uno de los factores que más influye en el desarrollo del suelo es la temperatura. Dentro de cierto ámbito y naturalmente en presencia de agua, los aumentos en

la temperatura causan también un incremento en la velocidad de reacción, es decir, en los procesos de meteorización química del suelo.

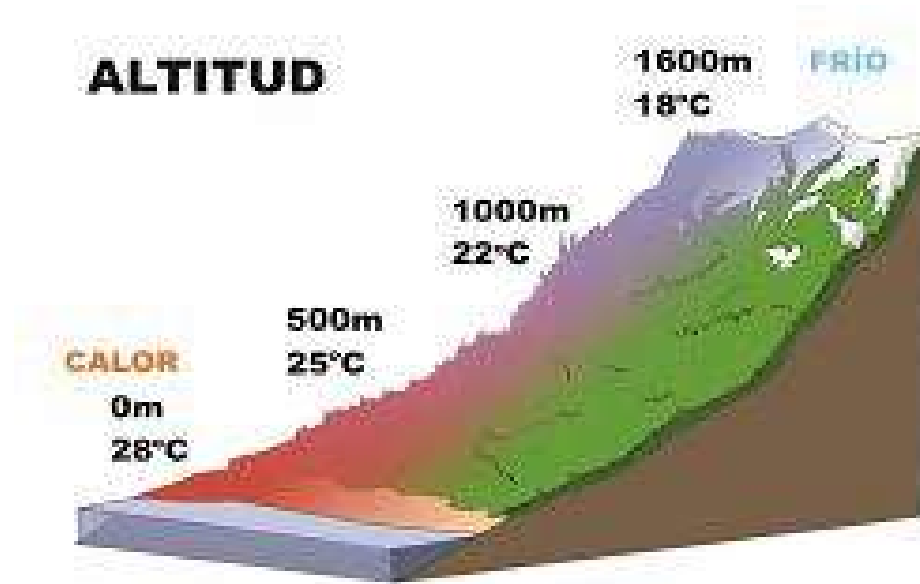
La meteorización del suelo hace referencia al lavado de bases y por lo tanto al desgaste de las rocas.

Podrías decir que el clima es un agente activo que actúa sobre un agente pasivo que son los minerales de las rocas. Existen tres tipos de intemperización de las rocas: intemperismo físico, intemperismo químico e intemperismo bioquímico. El clima va a regular el aporte de agua al suelo, así como su temperatura. Por otra parte, el clima también influye directamente en otros factores formadores, como es el factor biótico y el relieve. (1) ACCIÓN DEL CLIMA SOBRE LOS CONSTITUYENTES. La cantidad de arcilla en un suelo aumenta con la lluvia y con la temperatura (favorecen la alteración). También hay una marcada relación entre el clima con el contenido de materia orgánica y su evolución. Al aumentar la lluvia aumentan los porcentajes de materia orgánica (más cobertura vegetal y más aporte), mientras que al aumentar la temperatura disminuye el contenido de materia orgánica (prevalece la destrucción frente al aporte).

La temperatura es un aspecto sustancial que determina la cantidad de materia orgánica presente en el suelo; autores como (De las Salas, 1987) mencionan que los suelos con mayor altitud presentan una tasa de descomposición baja; Mientras que los de la región tropical poseen una mejor, debido a las altas temperaturas en comparación con las otras.

Figura 4.

Relación Altitud-temperatura.



Fuente: Atlas geomundo, 2017.

Nota: la relación altitud-temperatura hace referencia el vínculo entre la altitud y la presión atmosférica, a medida que incrementa la altitud la temperatura atmosférica disminuye y con ello la temperatura. un ejemplo de este fenómeno se presenta en las zonas montañosas.

(2) INFLUENCIA DEL CLIMA EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) aumenta con la lluvia, los iones fijados en las posiciones de cambio también muestran una dependencia. Al aumentar la lluvia se produce más acidificación pues los H^+ sustituyen al Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ .

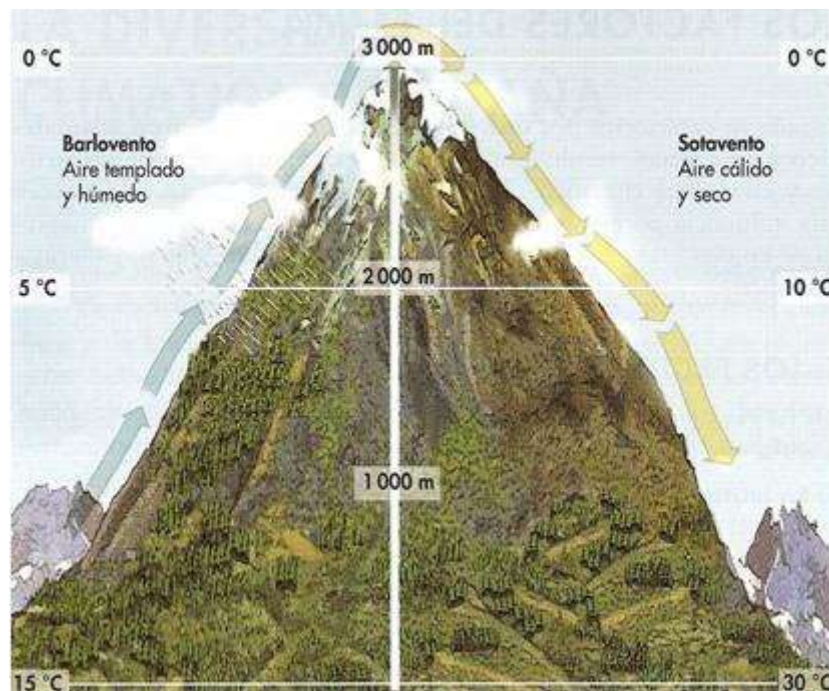
EL RELIEVE COMO FACTOR FORMADOR. El relieve o topografía es la configuración física de la superficie de la corteza terrestre. Los suelos formados en lugares altos tardan mucho tiempo en desarrollarse y permanecen inmaduros ya que a medida que se va formando material edáfico, también éste puede ser revido por el agua de lluvia o por el viento y acarreado a las partes bajas donde se acumula y forma parte de suelos profundos bien desarrollados. A los primeros se les llama suelos residuales y a los de

las partes bajas se les denomina, suelos aluviales. Desde el punto de vista edáfico los elementos del relieve más importantes son la inclinación y longitud de las laderas, la posición fisiográfica y la orientación.

En una montaña se presentan 2 tipos de laderas: la de barlovento, que es la favorecida por el aire templado y húmedo (esto da pie a la abundancia de vegetación); y la de sotavento, que se caracteriza por la presencia de aire cálido y seco; así también de vegetación (xerofítica) en menor medida en comparación con la ladera de barlovento

Figura 5.

Aspectos relevantes de las laderas.



Fuente: Zamora, 2018.

Las principales acciones del relieve son: 1. TRANSPORTE. Por gravedad produce transporte de materiales pendiente abajo y el suelo se ve sometido a erosión o acumulación. En las zonas altas el suelo se erosiona y formará terrenos esqueléticos. A media ladera los suelos están sometidos a un continuo transporte de materiales sólidos y soluciones, por lo que tendrán pequeños o moderados espesores con abundantes rocas angulosas. Al final de la pendiente se produce la deposición de los materiales arrastrados y se forman suelos acumulativos que contienen:

“No solo cloruros, sulfatos y carbonatos, sino también de iones de manganeso, hierro, sílice o aluminio; pueden crearse procesos complejos para la formación de minerales secundarios arcillosos del tipo illita, montmorillonita, beidellita y otros” (Hernández, y otros, 2006).

Figura 6.

Tipos de arcilla.



Fuente: Carranza, 2010.

Figura 7.

Erosión y acumulación del material del suelo.

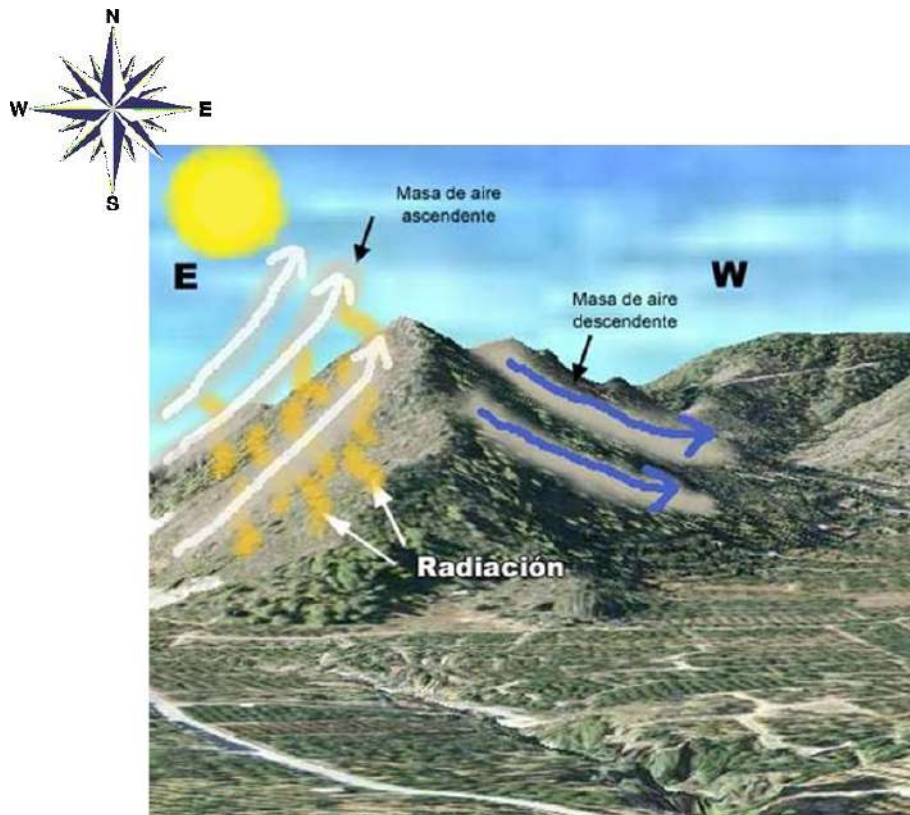


Fuente: Cerdá, 2002.

2. CARACTERÍSTICAS HÍDRICAS. El relieve también influye en la cantidad de agua que llega y pasa a través del suelo. En relieves convexos el agua de lluvia circula por la superficie hacia abajo y se crea un área de aridez local; lo contrario ocurre para las formas con relieve cóncavo. En las áreas altas tendremos un drenaje vertical rápido, que pasará a oblicuo en las laderas y quedará muy impedido en las depresiones. Por otra parte, la posibilidad de aporte de agua a través de niveles freáticos también depende de la posición del suelo en el relieve. 3. MICROCLIMA. El relieve también modifica las características del clima edáfico, al influir en la temperatura y en la humedad en función de la inclinación (influye en la intensidad calorífica de la radiación recibida), orientación (que regula el tiempo de incidencia de la radiación solar) y altitud (influye en los elementos climáticos). Como consecuencia también afectará al desarrollo de la vegetación y de la actividad microbiana.

Figura 8.

Microclima.



Fuente: Asociación pasión por volar, 2013.

Nota: La inclinación de la ladera de la montaña tomando en cuenta la ubicación geográfica es un factor determinante en la intensidad de la radiación solar recibida; Asimismo, su orientación respecto a la rosa de los vientos influye en el tiempo de exposición a dicha radiación. Estos aspectos influyen en la formación del suelo al interferir con factores como la temperatura, el clima y la materia orgánica.

LOS ORGANISMOS COMO FACTOR FORMADOR.

El intemperismo bioquímico es la última etapa de formación del suelo; Este es considerado como un factor de formación debido a que es un proceso natural “que lleva al desarrollo de los suelos con contenidos variables de M.O.; [cualquier proceso que involucre esto], está relacionado a los llamados factores de formación del suelo” (Silva, 1998).

Este proceso “se produce de forma constante e interrumpidamente por medio de las plantas y los microorganismos” (Hernández, *et al.*, 2006). Los organismos del suelo (plantas y microorganismos) suelen tener una influencia en la generación de material edáfico ya que ponen en acción un complejo arsenal de enzimas que catalizan reacciones que sin su participación tardarían millones de años en llevarse a cabo.

Autores como (Hernández, y otros, 2006) mencionan que cada organismo del suelo desempeña funciones específicas; en primer lugar, las plantas utilizan los minerales del suelo, el CO² de la atmósfera, el agua y la energía solar para crear parte de la materia orgánica, cuyo contenido se basa en proteínas, carbohidratos, grasas, vitaminas y otros; mientras que los microorganismos son los encargados de descomponer esta materia de los residuos animales y vegetales, para regresar al suelo los elementos minerales contenidos en dichos compuestos. La inalteración de este ciclo biológico permite a la naturaleza mantener un equilibrio.

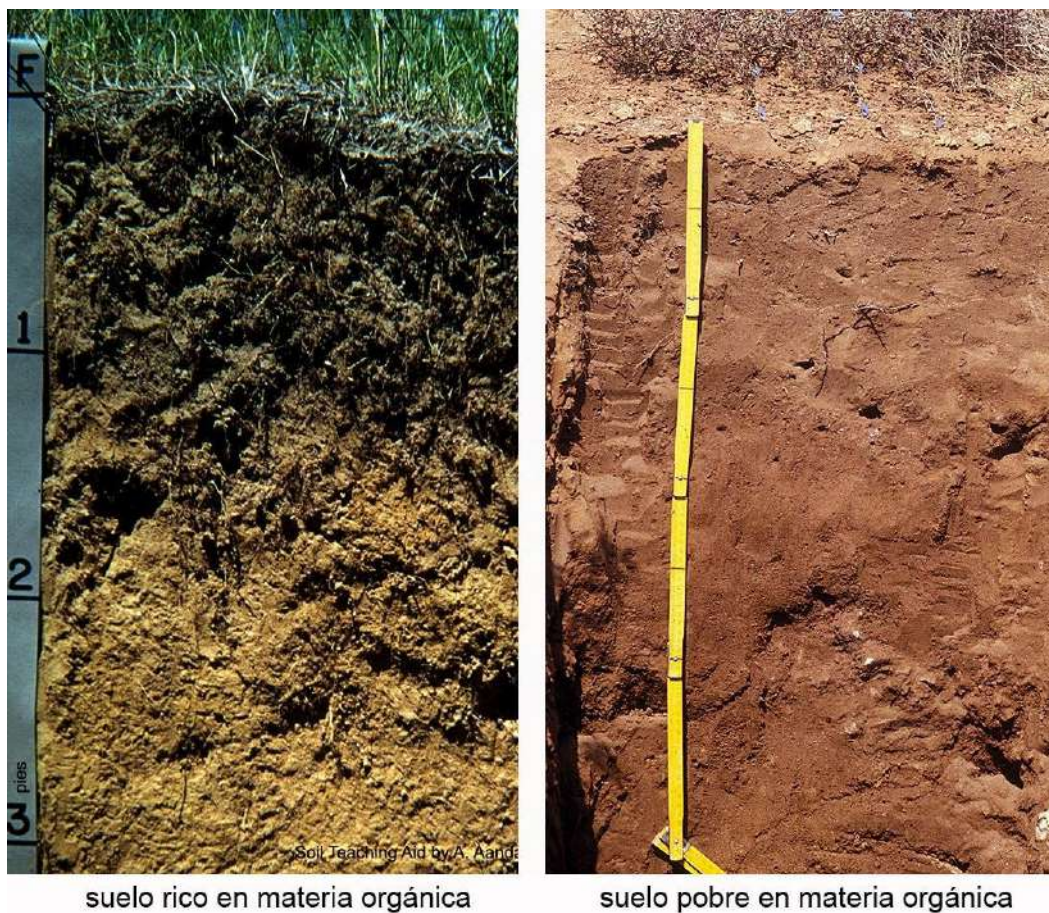
En resumen, entre los aspectos más relevantes de los organismos se encuentra que:

- Constituyen la fuente de MO (materia orgánica) del suelo.
- Ejercen importantes acciones de alteración de los materiales edáficos.
- Transforman los constituyentes del suelo al extraer nutrientes para su ciclo vital.
- Su papel en la transformación de la materia orgánica es muy importante.
- Producen una intensa mezcla de los materiales del suelo como resultado de su actividad biológica.
- Determina el tipo y abundancia de la materia orgánica del suelo.
- Favorecen el desarrollo y estabilidad de la estructura (al excretar residuos de intenso poder agregante).
- Aumentan la porosidad del suelo.
- Favorecen el drenaje.

- Influyen en el microclima (la vegetación produce sombra y baja la evaporación).
- Protegen al suelo de la erosión (la cobertura vegetal y los restos acumulados en la superficie, protege del impacto de las gotas de lluvia y el poder de agregación que unen a las partículas del suelo y así quedan fuertemente retenidas).

Figura 9.

Materia Orgánica y porosidad del suelo.



Fuente: Dorronsoro, s.f.

Nota: un suelo con presencia de materia orgánica presenta mejor porosidad que un suelo con ausencia.

Figura 10.

Relación materia Orgánica-porosidad del suelo-drenaje de agua.



Fuente: Dorronsoro, s.f.

Nota: el incremento de vegetación aumenta la porosidad del suelo, debido a que sus raíces rompen con la compactación del suelo, lo cual favorece el drenaje o filtración del agua.

EL TIEMPO COMO FACTOR FORMADOR. El suelo se origina por una serie de procesos y cada uno de ellos se desarrolla a diferente velocidad. Como consecuencia las propiedades del suelo, que son el resultado de la actuación de los procesos, se manifiestan de un modo desigual. La formación de un suelo es muy lenta y depende del tipo de factores formadores. Así, se desarrollarán más fácilmente sobre materiales sueltos e inestables que a partir de rocas duras y constituidas por minerales estables.

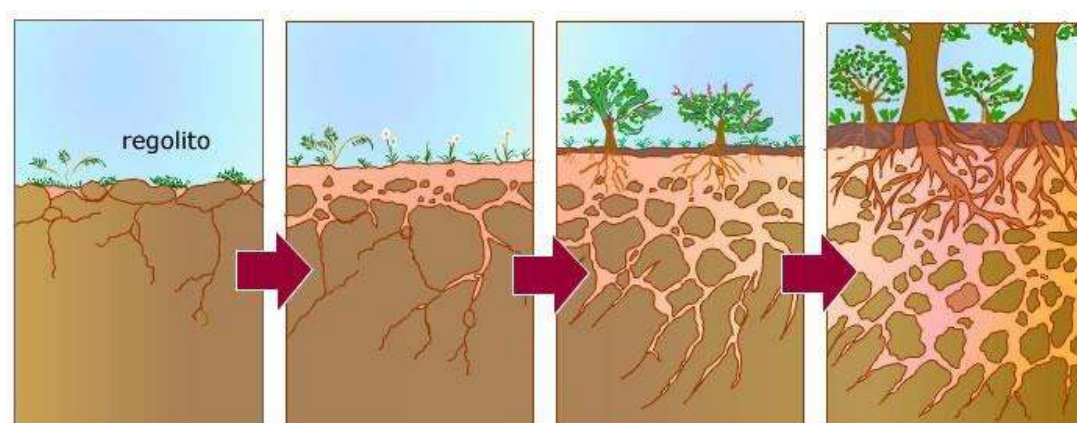
Es lógico esperar una más rápida formación en climas húmedos y cálidos que secos y fríos. Como producto del tiempo, también puede haber suelos jóvenes con muy poca diferenciación de horizontes y texturas gruesas; suelos maduros y desarrollados, que son suelos muy productivos y bien diferenciados y suelos seniles o viejos, cuya productividad es baja y sus propiedades ya agotadas. Las etapas de la formación del suelo se pueden resumir como sigue: (1) PRIMERA ETAPA. En principio, las rocas se desintegran en fracciones cada vez más pequeñas, es decir, sufren el intemperismo físico. (2) SEGUNDA ETAPA. Cuando el tamaño de las partículas de roca permite una mayor velocidad de las reacciones del intemperismo químico; los minerales primarios se

descomponen dando lugar a minerales secundarios. (3) TERCERA ETAPA. La intervención de las raíces de las plantas y los organismos provocan una serie de reacciones bioquímicas en los minerales primarios y secundarios existentes, acelerando la formación de material edáfico con capacidad de generación de compuestos orgánicos y nutrientes a partir del reciclamiento de la materia y un flujo dinámico de la energía.

Estas reacciones están mediadas por compuestos enzimáticos que solo pueden producir los organismos vivos. El material edáfico, al final de la tercera etapa, es muy diferente al material original consolidado de las rocas que le dieron origen. Esencialmente el suelo es una matriz sólida porosa, en la que la fase sólida proviene en su mayoría de los materiales minerales (45%) y otra fracción está compuesta de materiales orgánicos (0–5%). Los materiales inorgánicos provenientes de las rocas tienen tamaños diferentes, producto de su resistencia a la desintegración y descomposición y a la intensidad de los procesos de intemperización.

Figura 11.

Etapas de la formación del suelo en el tiempo.



Fuente: Educación permanente, s.f.

Junto a los materiales orgánicos, las partículas minerales se agrupan formando agregados o pedrs, que son milimétricos flóculos que en su conjunto le proporciona una distribución más o menos uniforme de poros al suelo donde se presenta un balance entre la fase líquida y la fase gaseosa del suelo.

En general, “las diferencias de estabilidad de los minerales serán un importante factor que determine el cambio en composición mineralógica con el tamaño de partícula. Estos cambios son particularmente marcados a medida que nos aproximamos al tamaño de la fracción arcilla” (Rucks, García, Kaplán, Ponce de León, & Hill, 2004).

Cada fracción del suelo presenta un determinado tamaño de partículas asociado a la cantidad de minerales que lo constituyen. Abarcaremos este tema más adelante.

Cuadro 1.

Clasificación de las partículas del suelo.

Sistema del Departamento de Agricultura de EE. UU.

<i>Fracción del suelo.</i>	<i>Diámetros límites en milímetros.</i>
<i>Arena muy gruesa.</i>	2.00-1.00
<i>Arena gruesa.</i>	1.00-0.50
<i>Arena media.</i>	0.50-0.25
<i>Arena fina.</i>	0.25-0.10
<i>Arena muy fina.</i>	0.10-0.05
<i>Limos.</i>	0.05-0.002
<i>Arcilla.</i>	< 0.002

Fuente: Rucks, *et al.*, 2004.

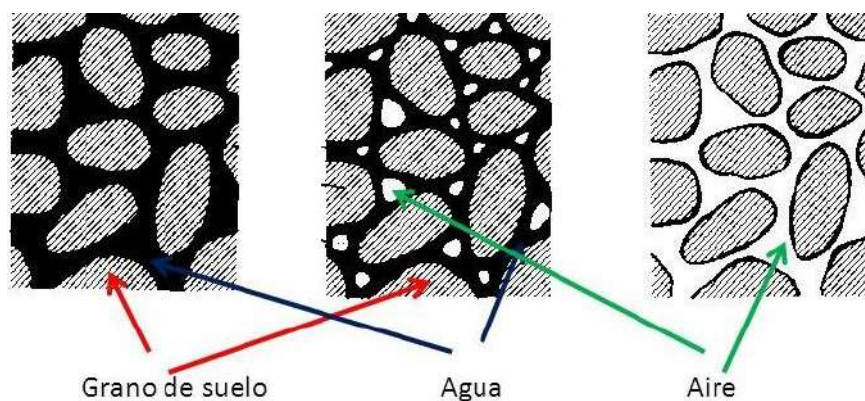
Las raíces de las plantas, los animales y microorganismos necesitan de oxígeno y también de agua, de tal manera que estos dos compuestos deben de estar presentes en el suelo de manera balanceada compartiendo el espacio poroso. En momentos puede haber más agua que gases en el suelo, y lo contrario también pasa, que exista en suelo seco y el espacio poros solo contenga los gases en su atmósfera. Si un suelo

retiene mucha agua y sus micro y macroporos están saturados, faltará oxígeno, y las plantas sufrirán las consecuencias. En el caso opuesto, puede haber suelos de textura muy arenosa que no retienen agua y las plantas también sufren un estrés hídrico.

Un suelo idóneo para el cultivo es aquel que en su composición de espacio poroso presenta agua y aire.

Figura 12.

Agua en el suelo.



Fuente: Juárez, 2018.

El suelo agrícola tiene longitud, anchura y profundidad. Es un cuerpo tridimensional y no solo es la superficie del terreno. La diferencia entre los términos, terreno y suelo es que el terreno o tierra es la palabra utilizada para referirnos solo a la superficie visible del suelo (dos dimensiones), y cuando nos referimos al suelo, estamos considerando también su profundidad. La mayoría de los productores solo ponen atención a la superficie del suelo, pero a los agrónomos nos debe interesar todo el suelo y la parte que no ves a simple vista es la más importante. Si haces un corte del suelo (perfil), observarás que está compuesto de varias capas, a las que llamas horizontes. A cada horizonte le asignas una literal, y tiene un significado.

Es posible que no todos los perfiles de suelo presenten estos horizontes, la aparición de estos depende del intemperismo ocurrido al paso del tiempo.

Cuadro 2.

Tiempo de formación de horizontes de un perfil de suelo.

Horizonte del suelo.	Edad de su completa formación (años).	Profundidad del suelo (centímetros).	Literatura citada.
Entisol (proviene de la roca regolita) sobre ceniza volcánica.	45.	35.	Mohr y Van Baren, 1954.
Horizonte A.	133.	15.	Forcella, 1978.
Suelo orgánico de 2 m de espesor.	3000.	200.	Tamm y Oslund, 1969.
Roca madre de un suelo arcilloso en Australia.	29,000.	300.	Butler, 1958.
1 m de espesor de roca madre en un suelo tropical.	75,000.	100.	Auberto, 1960.

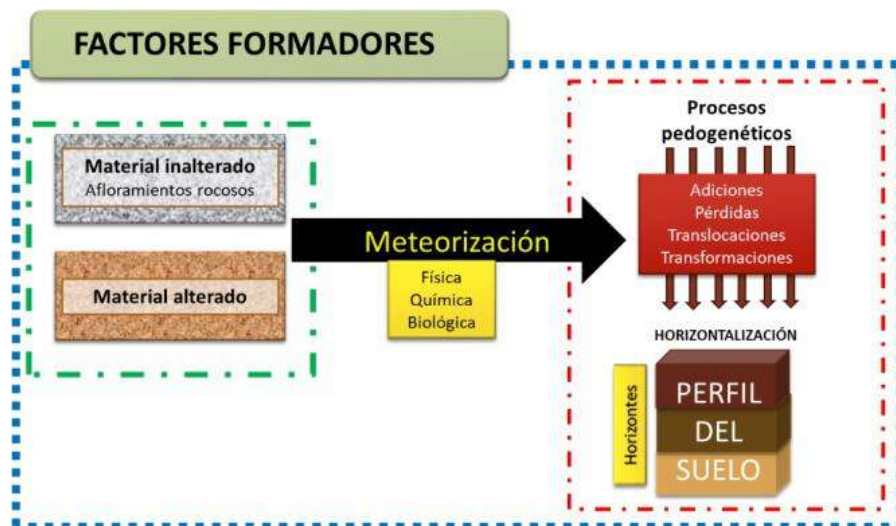
Fuente: De las Salas, 1987.

EL PERFIL DEL SUELO Y SUS HORIZONTES

El perfil del suelo es una sección vertical bidimensional de un suelo, ejemplo: un corte o terraplén a la orilla de una carretera o de un camino. A estas capas se les denomina horizontes. La edafización actúa desde la superficie y pierde intensidad al profundizar en el perfil, el material se altera de un modo diferencial y como resultado de la actuación de estos procesos de meteorización y translocación se pasa de un material homogéneo o uniforme, que es la roca, a un material heterogéneo, estratificado en capas con diferentes propiedades como es el suelo; es decir, se produce la horizontalización del material. Los horizontes edáficos son capas aproximadamente paralelas a la superficie del terreno.

Figura 13.

Horizontalización del material del material edáfico.



Fuente: Moreno & Ibáñez, 2020.

Se establecen en función de cambios de las propiedades y constituyentes (resultado de los procesos de formación del suelo) con respecto a las capas inmediatas. Bastan solo tres propiedades para establecer la horizonación de un suelo: color, textura y estructura, aunque otras propiedades, como la consistencia, son a veces de gran ayuda. El más mínimo cambio detectado (en una o en varias propiedades) es suficiente para diferenciar un nuevo horizonte.

Descripción de horizontes. Los datos se refieren al medio en el que se halla el suelo (localización geográfica, roca, relieve, vegetación y uso, clima, drenaje, etc.) y a los horizontes en sí mismos. Se complementan con datos de campo (espesores, textura, estructura, color, consistencia y límite) y del análisis físico del suelo en el laboratorio: (granulometría, retención de agua, densidades, etc.), químicos (MO, N, CaCO_3 , etc.), fisicoquímicos (pH, capacidad de cambio iónico, Eh, conductividad, etc.) y microrfológicos. Con todos estos datos podrán formarse interesantes conclusiones acerca de la clase de suelo, propiedades, formación, fertilidad y uso más racional.

Horizontes del suelo. Un horizonte es una capa de suelo, aproximadamente paralela a la superficie de la tierra, que tiene distintas características producidas por procesos

formadores del suelo. Difiere de la capa superior e inferior. Los horizontes constituyen las unidades para el estudio y para la clasificación de los suelos.

Figura 14.

Horizontes de un perfil de suelo.



Fuente: Sociedad Pública Ihobe, 2015.

Principales horizontes de suelo. NOMENCLATURA "A B C" PARA LOS HORIZONTES DEL SUELO.

Para designar a los horizontes del suelo se usan un conjunto de letras y de números:

La FAO establece 10 horizontes: H, O, A, E, B, C, R, I, L y W; En general, estos se presentan en el orden anteriormente expuesto, pero pueden verse modificados debido a la intervención humana posterior.

1. Horizonte H. Acumulaciones de MO sin descomponer (> 20-30%), saturados en agua por largos períodos. Es el horizonte de zonas de turberas y pantanos.

2. Horizonte O. Capa de hojarasca sobre la superficie del suelo, frecuente en los bosques, con más de 17% de MO, encontrado en suelos orgánicos o comunes suelos minerales muy húmedos. Con frecuencia ausente. Horizontes compuestos de materia orgánica en evolución.

- LA CAPA LITTER (A_{00}) representa un horizonte exclusivamente de materia orgánica y en el que podemos reconocer el origen de esos materiales, es decir, se trataría

de hojarasca, ramas y troncos de árboles muertos y cadáveres de animales. La fracción residual de la materia orgánica que ha sido desintegrada en el ecosistema del suelo recibe el nombre de humus y es un material con una alta reactividad química.

- **EL HUMUS CRUDO (A_0)** representa un horizonte constituido de materia orgánica en su última etapa de evolución. Los suelos agrícolas o suelos minerales de permanente aprovechamiento no cuentan con horizontes orgánicos ya que no hay lugar para la acumulación superficial de materia orgánica, por lo que comenzares a designar el primer horizonte como horizonte A. En el caso que nos ocupa, este horizonte está bien desarrollado y diferenciado y presenta tres horizontes A.

3. Horizonte A. Horizonte mineral en o cerca de la superficie en la cual está mezclada una acumulación de materiales orgánicos humificados con el material mineral, zona de remoción de materiales en suspensión y de materiales en solución, zona de máxima acumulación de carbono orgánico. Con mayor porcentaje de M.O. transformada que los horizontes situados debajo. Color gris oscuro o negro, pero cuando contiene poca M.O. (suelos cultivados) puede ser claro. Estructura migajosa y granular de mayor a menor grado de desarrollo. Lavado de K^+ , Mg^{2+} , Na^+ y arcilla removida. Capa arable.

- **EL HORIZONTE A_1** es una capa con material mineral, pero con el humus incorporado que aporta un medio fértil para el crecimiento de raíces de plantas y microorganismos.
- **EL HORIZONTE A_2** es un horizonte donde ocurre un fenómeno de lavado o eluviación de partículas sólidas minerales de pequeño tamaño (arcillas). Cuando tenemos suelos con un solo horizonte A, en general este lavado se presenta en todo el horizonte, pero es en su parte media donde este proceso se intensifica.
- **EL HORIZONTE A_3** tiene características generales del horizonte A, pero también del horizonte B, por lo que se denomina **HORIZONTE DE TRANSICIÓN (AB)**. Para el perfil que estas analizando, los **HORIZONTES A_3 Y B_1** los denominas horizontes de transición.

4. Horizonte E. HORIZONTE ELUVIAL BLANQUECINO (fuerte lavado) con pérdida de arcillas silíceas, Fe y Al. Puede subyacer bajo un horizonte B (iluvial). Típicamente situado entre un A y un B. Con menos arcilla, M.O. y óxidos de Fe y Al que HA y HB. Muy arenosos y claros (altos valores). Estructura laminar.

5. Horizonte B. Horizonte mineral con evidencia de pedogénesis o iluviación (movimiento dentro del horizonte). Enriquecimiento de arcillas silíceas, Fe, Al o humus. Alterado por hidrólisis, reducción u oxidación con cambio de estructura o color. Pardos y rojos, de cromas más intensos o hue más rojo que el material original. Con desarrollo de estructura edáfica en bloques angulares, subangulares, prismática o columnar (suelos salinos). Ausente en suelos jóvenes. Material edáfico con propiedades para el desarrollo de raíces.

- En suelos con un solo HORIZONTE B, se dice que es un horizonte de iluviación o de acumulación de partículas sólidas de pequeño tamaño (arcillas). No obstante, este fenómeno de acumulación se intensifica en la parte media de este horizonte. En el perfil que nos ocupa, el HORIZONTE B2 representa el horizonte de mayor iluviación o acumulación, por lo que le llamas HORIZONTE ILUVIAL. EL HORIZONTE B3 es un HORIZONTE DE TRANSICIÓN con el HORIZONTE C. Este horizonte tendrá características del HORIZONTE B, pero compartirá materiales gruesos de la regolita.

6. Horizonte C. Horizontes o capas, excluyendo la roca, que son poco afectadas por los procesos pedogénicos y carecen de propiedades de los horizontes O, A, E, o B. El material de las capas C puede o no ser parecido al suelo que presumiblemente ha formado. Puede haber sido modificado incluso si no hay evidencia de pedogénesis. Sin desarrollo de estructura edáfica, ni rasgos edáficos. Blando, suelto, se puede cavar con un azadón. Puede estar meteorizado, pero nunca edafizado. Material rocoso parcialmente desintegrado (regolita).

- EL HORIZONTE C se caracteriza por contener arenas gruesas, grava o rocas de pequeño tamaño que han sufrido un proceso parcial de intemperización física. Es posible que raíces de árboles lleguen a explorar la parte superficial de este horizonte, PERO, EN GENERAL, LA VIDA ES LIMITADA.

7. Saprolito/roca intemperizada. Material residual no consolidado que subyace en el suelo y que delimita el espacio donde se inicia la capa rocosa.

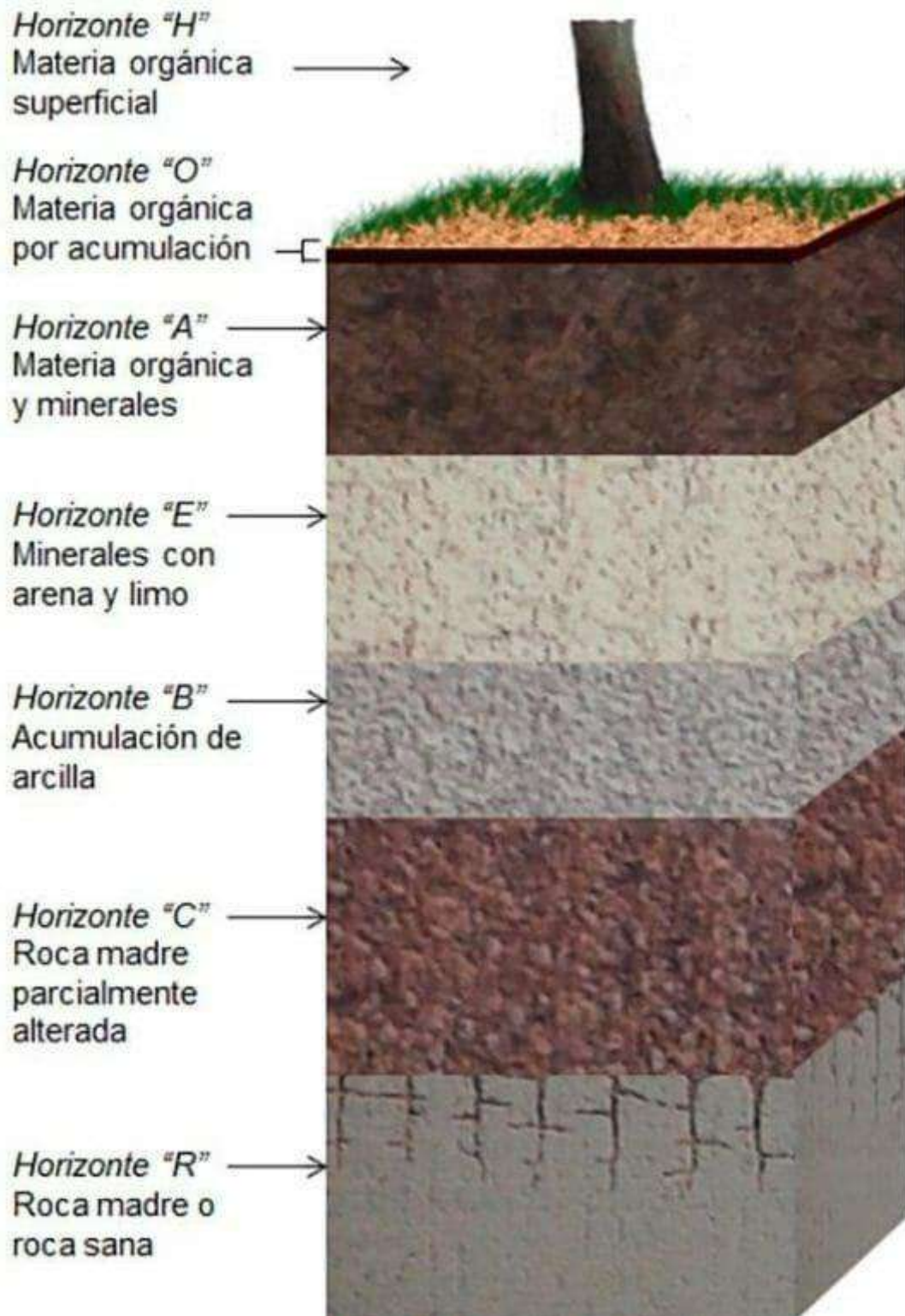
8. Capa R. Material original. Generalmente no es considerado un horizonte debido a que es la roca dura (roca madre o material rocoso consolidado) que no se puede cavar. LA CAPA R es también llamado lecho rocoso y está constituido por rocas brutas de gran tamaño sin intemperizar.

9. Horizontes líticos R. Granito, basalto, cuarcita, caliza endurecida o piedra caliza son ejemplos de capas rocosas y designadas como R. Dichas capas son cementadas y pueden dificultar las excavaciones. La capa rocosa puede contener rupturas que generalmente permiten la penetración de las raíces. Esas fracturas pueden ser cubiertas o llenadas por arcilla o por otro tipo de material.

Es necesario mencionar que es posible utilizar otras literales para caracterizar el perfil del suelo en estudios especializados. es posible decir que un perfil de suelo presentará horizontes orgánicos si éste se encuentra en una región con temperatura y humedad adecuada.

Figura 15.

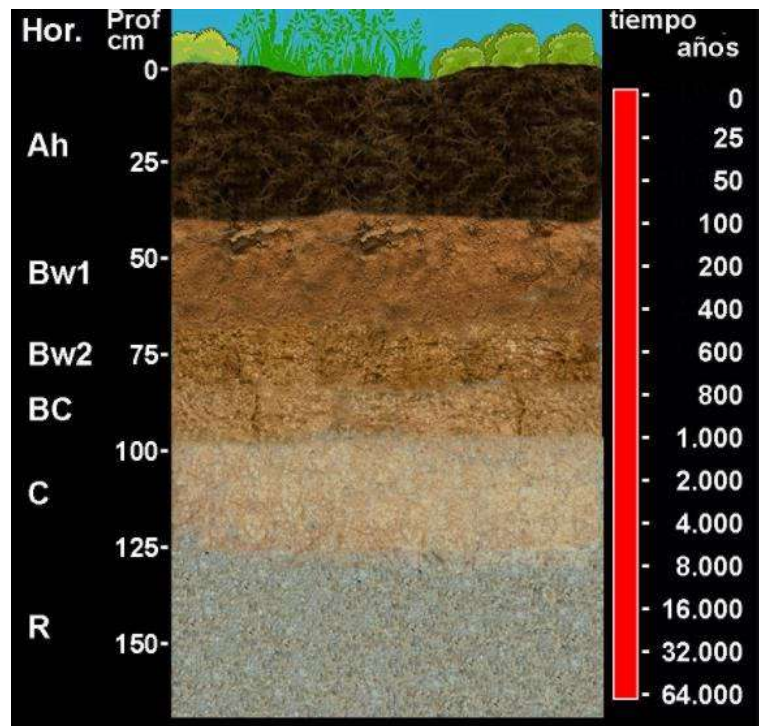
Horizontes del suelo.



Fuente: Cárdenas, 2019.

Figura 16.

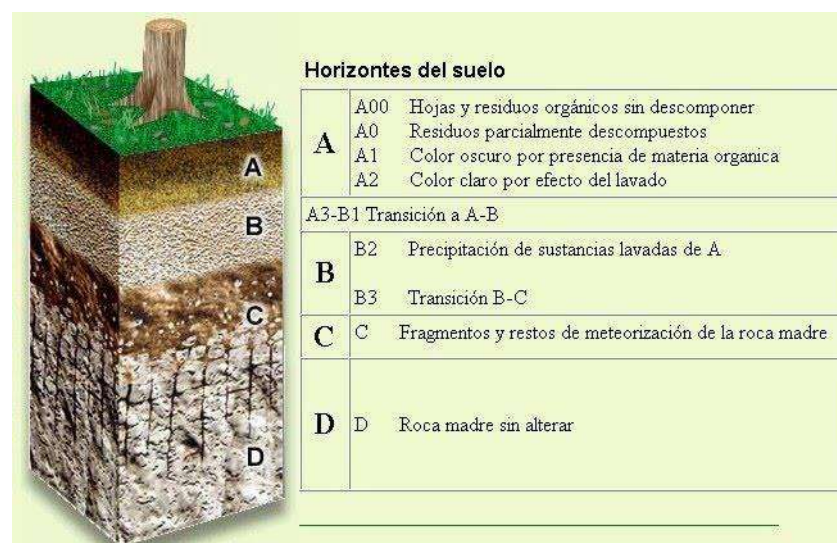
El tiempo de la formación de horizontes del suelo.



Fuente: Dorronsoro, s.f.

Figura 17.

Subclasificación de los horizontes de un perfil de suelo.



Fuente: Blanco & Garro, 2008.

EL SUELO COMO CUERPO NATURAL

El suelo sostiene la vida de micro y macroorganismos al:

- Funcionar como reserva de nutrientes y agua.
- Ofrecer protección contra la temperatura extrema.
- Participar en el intercambio de gases.

El suelo varía de modo relativamente continuo en el espacio y en el tiempo. Esta variabilidad está condicionada por la de otros recursos naturales (p. ej. clima, organismos, relieve, litología, etc.). Sin embargo, para el estudio de los suelos, el continuo edáfico se ha venido dividiendo más o menos “ARBITRARIAMENTE” en individuos-suelo de acuerdo con el juicio experto de los especialistas.

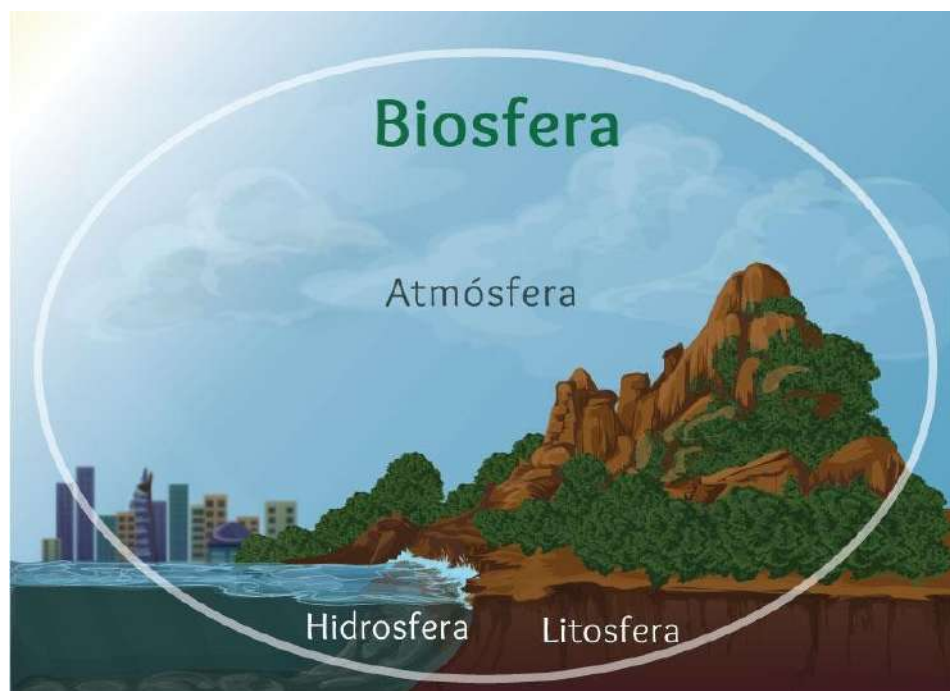
La Edafología (del griego edafos, suelo, y logia, ciencia), tiene como objeto el estudio del suelo y utiliza las leyes del conocimiento científico para su análisis. El suelo, la capa más superficial de la corteza terrestre, constituye uno de los recursos naturales más importantes con que contamos al ser el substrato que sustenta la vida en el planeta. Desde el punto de vista científico, un suelo es un cuerpo natural tridimensional formado por la progresiva alteración física y química de un material original o roca madre a lo largo del tiempo, bajo unas condiciones climáticas y topográficas determinadas y sometido a la actividad de organismos vivos.

A lo largo de su evolución o edafogénesis, en el suelo se van diferenciando capas verticales de material generalmente no consolidado llamados horizontes, formados por constituyentes minerales y orgánicos, agua y gases, y caracterizados por PROPIEDADES FÍSICAS (estructura, textura, porosidad, capacidad de retención de agua, etc.), QUÍMICAS Y FISICOQUÍMICAS (pH, potencial redox, capacidad de intercambio catiónico, salinidad, etc.) que los diferencian entre sí y del material original. El conjunto de horizontes constituye el perfil del suelo y su estudio permite dilucidar los procesos de formación sufridos durante su evolución y llevar a cabo su clasificación dentro de las distintas unidades de suelos. La importancia del suelo radica en que es un elemento natural dinámico y vivo que constituye la interfaz entre la atmósfera, la litosfera, la biosfera y la hidrosfera, sistemas con los que mantiene un continuo intercambio de

materia y energía. Esto lo convierte en una pieza clave del desarrollo de los ciclos biogeoquímicos superficiales y le confiere la capacidad para desarrollar una serie de funciones esenciales en la naturaleza de carácter medioambiental, ecológico, económico, social y cultural.

Figura 18.

Interacciones del suelo.



Fuente: Hernández, *et al.*, 2014.

El suelo es un elemento frágil del medio ambiente, un recurso natural no renovable puesto que su velocidad de formación y regeneración es muy lenta mientras que los procesos que contribuyen a su degradación, deterioro y destrucción son mucho más rápidos. Por ello es de suma importancia establecer medidas ambientales y políticas de actuación que garanticen la protección y conservación de los suelos.

ROLES ECOLÓGICOS DEL SUELO

Gracias a sus componentes de materia orgánica, agua, minerales y gases, es capaz de participar como factor fundamental en la vida al servir como:

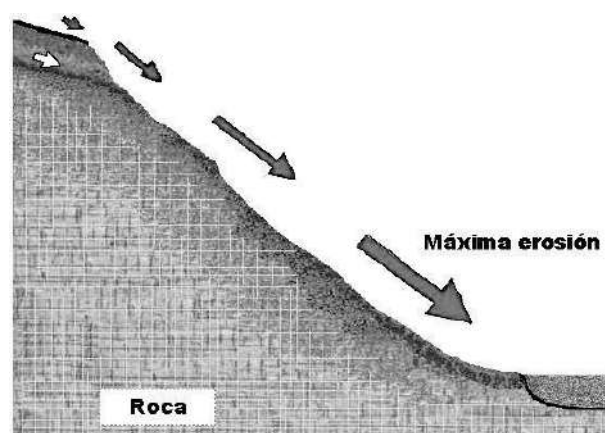
1. MEDIO PARA EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS. Funciona como soporte físico para estos organismos, pues entre su espacio poroso contiene agua y oxígeno (O_2), además de minerales necesarios para el crecimiento vegetal; aunado a esto, es importante mencionar que el suelo se encuentra directamente relacionado con la producción de fitotoxinas, debido a factores como el pH, capacidad de retención de agua y temperatura.

Autores como (Gallardo, *et al.*, 2006) mencionan que “la mayor producción de fitotoxinas y actividad fitotóxica se producen cuando se ajusta el pH a 7 al inicio del cultivo y la temperatura se mantiene a $30^{\circ} C$ ”.

2. REGULADOR CLIMÁTICO. De toda el agua pasa a través del suelo, parte de ella es almacenada por las plantas para su uso (algunas la limpian y purifican); la presencia de vegetación reduce los escurrimientos y la erosión litosférica.

Figura 18.

Erosión del suelo por escurrimiento superficial.



Fuente: Ríos & Goytia, 2009.

Al actuar como transporte hídrico favorece el balance de agua; un equilibrio hídrico influye en el clima local y global al regular la temperatura de la Tierra.

3. RECICLADO DE MATERIALES ORGÁNICOS. Responsable de la mayor parte de la descomposición de residuos orgánicos por procesos microbianos, mineralización (orgánica a inorgánica), inmovilización (inorgánica a orgánica), secuestro de carbono y fotodescomposición (radiación UV).

4. HÁBITAT DE LOS ORGANISMOS DEL SUELO. El suelo es el medio natural en el que habitan macroorganismos, mesorganismos y microorganismo que son fundamentales para mantener un equilibrio en todos los aspectos, pues la interacción entre estos seres vivos contribuye a la diversidad genética, la descomposición y a mantener un balance en el ciclo de nutrientes.

Un aspecto relevante a mencionar por (Soria, 2016) es que en la actualidad se ha incrementado el interés por encontrar nuevos fármacos para el tratamiento de enfermedades que han desarrollado resistencia a antibióticos; una de las alternativas más novedosas y prometedoras son los microorganismos del suelo que poseen sustancias con actividad antimicrobiana.

5. MEDIO PARA LA INGENIERÍA. el suelo es la base sobre la que muchos seres vivos se establecen, en especial el hombre, quien ha sobreexplotado esta capacidad (entre muchas otras).

el suelo ha sido aprovechado debido a que contiene materiales de interés en la construcción, además de ser el medio de emplazamiento de la mayor parte de estructuras y construcciones, asimismo se han utilizado las propiedades térmicas del suelo; tal es el caso de la geotermia, cuya tecnología saca provecho al calor del subsuelo en la calefacción de obras arquitectónicas.

Figura 19.

Implementación de la energía geotérmica en la construcción.



Fuente: Fernández, 2015.

CONSTITUCIÓN MINERAL DE LOS SUELOS

Los minerales constituyen la base sólida del suelo. La fracción mineral representa de un 45-49% del volumen del suelo. En la fase sólida constituyen, para un suelo del 90-99% (el resto es MO). La fase sólida representa la fase más estable y representativa del suelo. Es una fase muy heterogénea, formada por constituyentes de tipo inorgánico y orgánico.

MATERIAL PARENTAL. Material mineral no consolidado e intemperizado a partir del cual se forma el suelo. Es intemperizado química y físicamente para formar suelos.

1. **ROCAS ÍGNEAS.** Se forman por solidificación de magma; su clasificación se da en torno a aspectos como: La textura (tamaño de cristales de minerales) y la presencia de minerales (composición). Ejemplos: BASALTO, GRANITO, RIOLITA, ANDESITA, TEZONTLE, OBSIDIANA.

Figura 20.

Rocas ígneas.



2. **ROCAS METAMÓRFICAS.** El calor y presión intervienen en la transformación de las rocas: PIZARRAS y ESQUISTO (a partir de la lutitas); GNEISS O ROCA BANDEADA (de feldespatos); ESQUISTO (de moscovita); CUARCITA (de arenisca); MÁRMOL (de calizas).

Figura 21.

Rocas metamórficas.



3. ROCAS SEDIMENTARIAS. Se forman por depósito y litificación de sedimentos. Entre estas se contemplan a las ARCILLAS LITIFICADAS como las: LUTITAS (partículas de arcilla). ARENISCAS (78% de cuarzo y arena). CALIZAS (precipitados químicos: CaMgCO_3 [dolomita] y CaCO_3 [caliza]). CONGLOMERADOS MATERIALES, etc.

Figura 22.

Rocas sedimentarias.

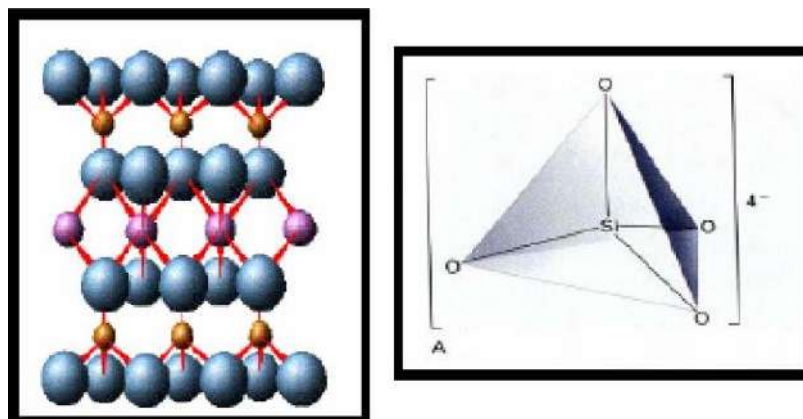


El grupo más común de minerales del suelo es el de los silicatos. Todos los ellos están constituidos por una unidad estructural común, un tetraedro de coordinación Si-O. El silicio situado en el centro del tetraedro de coordinación y rodeado de 4 oxígenos situados en los vértices. Este grupo tetraédrico se halla descompensado eléctricamente $(\text{SiO}_4)^{4-}$, por lo que los oxígenos se coordinan a otros cationes para compensar sus cargas. Dependiendo del número de oxígenos que se coordinen a

otros silicios se originan los grandes grupos de silicatos (es decir, según el número de vértices compartidos por tetraedros, que pueden ser 0, 1, 2, 3, y 4). Según sea la coordinación de los otros oxígenos que se unen a otros cationes distintos del silicio se forman los diferentes minerales dentro de cada gran grupo de silicatos.

Figura 23.

Estructura de un tetraedro (SiO_4)⁴⁻ y un látice cristalino.



Cuadro 3.

Principales minerales formadores de suelos.

Minerales formadores de suelo		
Grupo	Subgrupo	Ejemplos
Silicatos	Nesosilicatos	Mg_2SiO_4 , Forsterita y Fe_2SiO_4 , Fatalita
	Sorosilicatos	Poco importantes como formadores de suelos
	Ciclosilicatos	Poco importantes como formadores de suelos
	Inosilicatos	Augita, $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_2(\text{SiAl})_2\text{O}_6$ y Hornblenda $(\text{NaCa})_2(\text{Fe}, \text{Mg})_6\text{O}_{20}(\text{OH})_4$
	Filosilicatos	Moscovita $2\text{Al}_2\text{Si}_6(\text{Fe}, \text{Mg})_6\text{O}_{20}(\text{OH})_4$
	Tectosilicatos	Cuarzo, SiO_2 .
Feldespatos	Ortoclase KAlSi_3O_8 y Plagioclase: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ -- $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	
Óxidos e hidróxidos	Cuarzo, SiO_2 , Limonita – $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; Hematina, Fe_2O_3 ; Magnetita, Fe_3O_4	
Fosfatos	Apatita, $\text{Ca}_{10}(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})_2(\text{PO}_4)_6$	
Carbonatos	Dolomita, $\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$; Calcita, CaCO_3	
Sulfatos	Yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Anhidrita, CaSO_4	
Sulfuros	Pirita, FeS_2	

ESTABILIDAD DE LOS MINERALES DEL SUELO. Es la resistencia que opone el mineral a toda modificación en su composición química o en su estructura cristalina (a mayor estabilidad es menos susceptible a la alteración).

A) **FACTORES DEL MINERAL.** 1. **COMPOSICIÓN.** Modificará la estabilidad en función de que el mineral contenga iones más o menos solubles y según se comporten frente a la oxidación y la hidrólisis. 2. **ESTRUCTURA.** La estabilidad disminuirá cuanto más abierta sea la estructura y aumentará para los empaquetamientos densos y compactos. La fuerza del enlace entre las partículas del mineral también va a ser un factor importante. 3. **TAMAÑO.** Cuanto menor tamaño más superficie presentará el grano (la relación superficie/volumen crece) y más inestable se tornará el mineral. 4. **EXFOLIACIÓN.** La exfoliación expresa la facilidad de fracturarse un mineral de un modo regular (disminuye la estabilidad). 5. **FRAGILIDAD.** Se refiere a la facilidad de fracturación de una manera desordenada. 6. **INCLUSIONES MINERALES.** Aumentan la inestabilidad al presentar superficies de contacto íntimo de dos materiales con diferente composición.

B) **FACTORES DEL SUELO.** 1. **TEMPERATURA DEL SUELO.** Favorece la velocidad de alteración (es un catalizador). 2. **AGUA.** Es el agente de alteración por excelencia en la naturaleza. 3. **DRENAJE.** Regula el tiempo de contacto del agua con partículas del suelo. Controla la concentración de sales de la solución del suelo y modifica su poder hidrolítico; En medios impermeables el agua se satura de iones y deja de atacar a los minerales, si el medio es permeable el agua de lluvia atravesará el suelo y una vez cargada de bases se eliminará al subsuelo. 4. **ACIDEZ/ALCALINIDAD.** Los valores extremos de la escala del pH potencian la alteración. 5. **POTENCIAL REDOX.** Dependiendo del ambiente oxidante o reductor, los minerales que contengan formas reducidas u oxidantes podrán o no alterarse. 6. **FACTOR BIÓTICO.** Los microorganismos y raíces de las plantas atacan a los minerales para extraer nutrientes.

C) **MECANISMOS DE PROCEDENCIA.** Los minerales del suelo proceden directa o indirectamente de la roca madre. En función de su estabilidad los minerales pueden proceder de tres orígenes. (1) **HERENCIA O MINERALES PRIMARIOS.** Minerales muy estables que pasan de la roca al suelo sin transformarse (el cuarzo). (2) **ALTERACIÓN O MINERALES SECUNDARIOS.** Minerales que se transforman durante la edafización; el mineral primitivo pasa a otro secundario gradual y progresivamente. (3) **NEOFORMACIÓN O MINERALES EDÁFICOS.** Cuando no exista relación genética entre un mineral edáfico y los minerales que existían en la roca.

Figura 24.

Malaquita.



Fuente: Nicols, 2018.

Nota: la formación de este mineral se da por la oxidación de minerales primarios de cobre.

ETAPAS DE FORMACIÓN DEL SUELO

La formación del suelo tiene lugar como consecuencia de la actuación de los cinco factores formadores, y en ella se pueden distinguir dos etapas:

1. **ETAPA INICIAL.** Inicia con la fragmentación de rocas originales y de los restos orgánicos. La desagregación del material facilita la circulación de aire y agua, y favorece la actividad biótica, lo que conduce la alteración química del material.

Los minerales de las rocas originales (según su estabilidad), se alteran en mayor o menor medida, apareciendo en el suelo más o menos transformados. Los iones liberados en la alteración mineral pasan a la solución del suelo como gel o se recombinan para formar nuevos minerales. Los vegetales y animales al morir son transformados en humus y compuestos de desintegración simple por organismos saprofitos.

(Ríos Y. , 2005) menciona que organismos saprofitos como las lombrices rojas californianas presentan una buena solución ante problemas de contaminación del suelo, al transformar la materia orgánica en descomposición en humus aprovechable en la mejora de los suelos y como fuente de nutrición para las plantas.

2. ETAPA FINAL. Todos los constituyentes formados o liberados en la etapa inicial (minerales, humus, gel, gases, agua y soluciones) se mezclan y diferencian y, si evolucionan in situ, conducen a la formación del suelo, mientras que, si son arrastrados a otros lugares, dan lugar a los sedimentos (los cuales pueden edafizarse posteriormente para dar suelos).

Figura 25.

Sedimentación de rocas



Fuente: Palazzolo, 2020.

INTEMPERISMO DE LAS ROCAS

La ruptura de las rocas y minerales por procesos químicos y físicos. Los minerales forman rocas y estas liberan minerales de los cuales ellas están formadas. La tasa de intemperismo depende de: el tamaño y la composición de los minerales, el pH del suelo, temperatura, actividad biótica y contenido de aire y agua

INTEMPERISMO FÍSICO O FRAGMENTACIÓN. Es aquel en el que ocurre “un rotura mecánica o desintegración” (Herrera, 2009) física del material original. Esta fragmentación se origina por numerosas causas:

- (1) **DESINTEGRACIÓN.** Alteración de las rocas por procesos físicos.
- (2) **TEMPERATURA.** Cambios de temperatura diarios o estacionales (calor-frío).
- (3) **EROSIÓN Y DEPOSITACIÓN.** Ocurre por agente como el agua y el viento.
- (4) **INSOLACIÓN.** La radiación solar calienta en forma desigual a las rocas, y el material soporta intensas presiones debidas a la dilatación diferencial. Cada capa soporta una temperatura diferente y cada mineral se calienta y se dilata de manera diferente. Todo ello crea fuertes presiones diferenciales.

Figura 26.

Meteorización por insolación.



Fuente: Geoaprendo, 2014.

- (5) **CONGELACIÓN.** El agua penetra en los poros y al congelarse aumenta de volumen y fragmenta a las rocas.

(6) EFECTO DE DESCARGA. Las rocas se han formado normalmente bajo intensa presión, el material se encuentra comprimido y cuando afloran a la superficie, al perderse la presión, el material expande y se fractura.

(7) DILATACIÓN/CONTRACCIÓN. Los cambios de humedad producen cambios de volumen que fracturan las rocas.

(8) CRISTALIZACIÓN. A partir de la solución salina del suelo se forman cristales en los poros de las rocas y al aumentar de volumen presionan las paredes de estas hasta desintegrarla.

Figura 27.

Intemperismo por cristalización.



Fuente: Briceño, 2018.

(9) ACCIÓN BIÓTICA. Las raíces de las plantas invaden las grietas de las rocas y al crecer llegan a fracturar el material; existe además el pisoteo de animales.

INTEMPERISMO QUÍMICO, ALTERACIÓN QUÍMICA O DESCOMPOSICIÓN. Este proceso hace referencia a la alteración de las rocas por procesos químicos (se puede poner de manifiesto comparando la mineralogía inicial de la roca frente a la del suelo que se forma a partir de ella). Los principales procesos de alteración química son:

Cuadro 4.

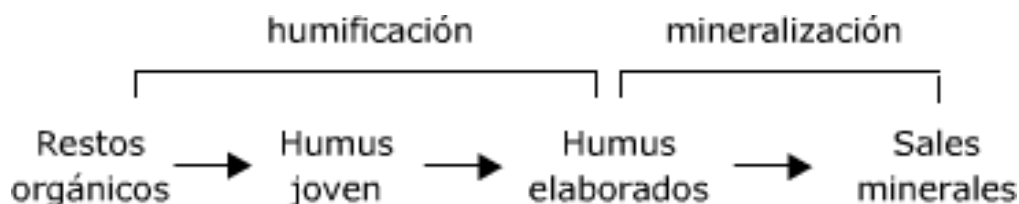
Principales tipos de intemperismo químico de las rocas.

Principales tipos de intemperismo químico		
Concepto	Definición	Ejemplo
Solución	Afecta sólo a compuestos directamente solubles en agua	$\text{NaCl (halita)} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Cl}^- + \text{Na}^+ + \text{H}_2\text{O}$
Hidratación	Las moléculas de agua son atraídas por los desequilibrios eléctricos quedando fijadas en los constituyentes edáficos. Asociación de moléculas de agua o grupos OH^- con minerales.	$\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaSO}_4 \text{ (anhidrita)} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ (yeso)}$
Hidrólisis	Reacción química de los H^+ y OH^- del agua que se intercambian con los cationes y aniones de los minerales llegando en los casos extremos a destruir por completo a los minerales. El ataque del ion hidrógeno sobre la estructura cristalina	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{K}^+$ $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \text{ [feldespato (anortita)]} + 8\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{++} + 2\text{Al}^{3+} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 \text{ (ácido metasilíco)}$
Oxidación - reducción	Pérdida o ganancia de electrones de sus iones constituyentes. Los minerales se han formado en un medio pobre de O_2 por lo que presentan sus iones en forma reducida y al contacto con el O_2 del aire del suelo se oxidan. En suelos siempre saturados en agua la tendencia es de reducción.	$\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H} + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Fe}^{++} + 3\text{H}_2\text{O}$ $\text{Fe}^{++} = \text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \text{ (pérdida de electrones)}$ $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ $4\text{FeO} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3$
Carbonatación	Es la reacción de un compuesto con el H_2CO_3 , que disuelve los minerales y forma bicarbonatos más solubles.	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow (\text{H}^+ + \text{HCO}_3^-)$ $\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$

Humificación y mineralización. Ambos procesos inicialmente tienen una misma vía de actuación, la transformación de los restos orgánicos. La humificación consta de una serie de alteraciones entre productos orgánicos, es decir que siempre se conserva la estructura orgánica (humus). La mineralización conduce a la destrucción total de los restos orgánicos descomponiéndolos en productos inorgánicos simples (H_2O , CO_2 , NH_3) eliminándose gran parte del componente orgánico del suelo.

Figura 28.

Mineralización y humificación.



Fuente: Educación permanente, s.f.

Translocación de sustancias. Estas acciones se realizan por los organismos del suelo (lombrices y las hormigas) o por simple efecto mecánico (acción del agua) que transporta los materiales, a veces en suspensión a veces en disolución. Este arrastre por el agua ejerce efectos muy importantes en el suelo y puede eliminar sustancias transportadas fuera del perfil o acumularlas a una cierta profundidad.

Figura 29.

Traslocación de carbonatos en el suelo.



Las bandas blancas están rellenas de carbonatos.
Para que los carbonatos se sitúen ocupando las bandas, previamente el material se ha tenido que agrietar, luego habrán venido las soluciones bicarbonatas y al desecarse habrán precipitado los carbonatos.
Esta ubicación del material blanco sólo puede explicarse por translocaciones.

Fuente: Dorronsoro, s.f.

DEPOSITACIÓN DEL MATERIAL PARENTAL.

RESIDUAL O SEDENTARIO. Desarrollado por intemperismo en el lugar de origen, tiende a ser lixiviado. Se considera ha derivado de las rocas bajo las cuales subyace, cuando falta evidencia de que haya sido modificada por movimiento.

TRANSPORTADO.

1. DEPÓSITO ALUVIAL. Sedimento depositado por escurrimientos de agua. Pueden presentarse en terrazas hacia la parte alta de las corrientes actuales o en planicies de inundación de los ríos. Las remanentes terrazas fluviales muy viejas pueden ser encontrados en áreas muy alejadas a las corrientes actuales.

Figura 30.

Depósito aluvial de material.

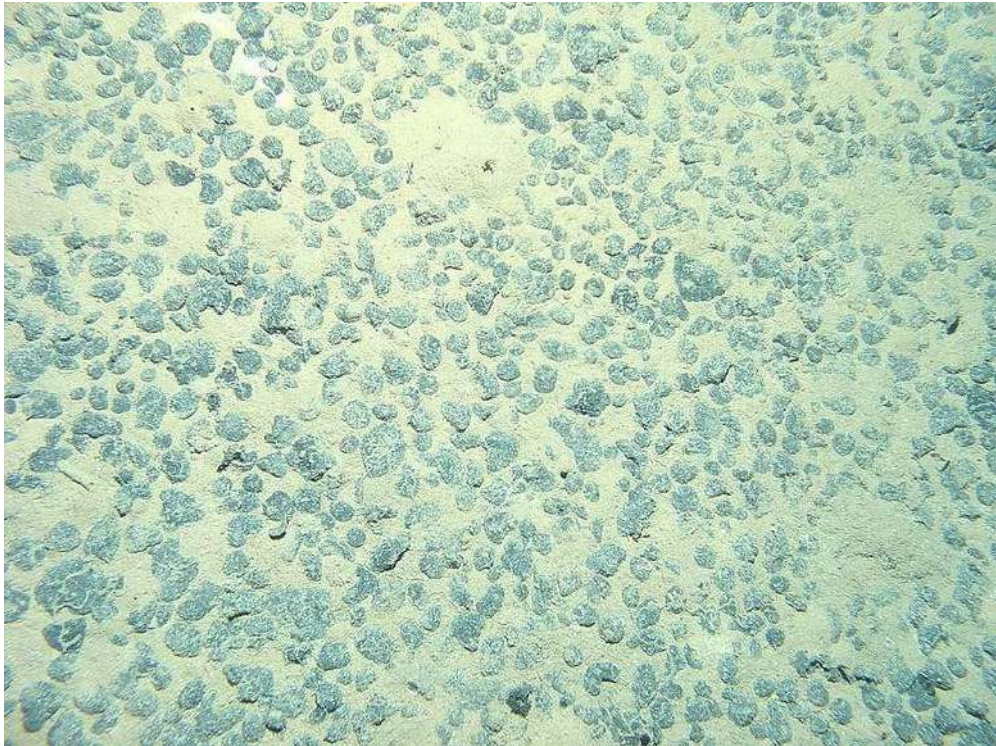


Fuente: Glenn, 2018.

2. SEDIMENTOS MARINOS. Estos sedimentos se desplazan fuera del mar y son comúnmente reacomodados por corrientes y mareas. Los sedimentos marinos son el depósito final de las sustancias producidas en las aguas superficiales y de aquellas introducidas al mar por procesos naturales y antrópicos. Entre estas sustancias se encuentran los compuestos orgánicos persistentes, nutrientes, combustibles, radionúclidos, patógenos y metales pesados.

Figura 31.

Sedimento marino de nódulos de manganeso.



Fuente: Roberts, 2009.

3. DEPÓSITO GLACIAR Y PERIGLACIAR. Los glaciares al desplazarse trasladan grandes volúmenes de materiales. El hielo ejerce una gran fricción y genera un fuerte desgaste sobre las rocas. En la geomorfología, el término periglaciario se refiere a procesos geomórficos creados por el congelamiento de agua en hielo y a las áreas en donde estos procesos operan. El sentido original, ya obsoleto, de la palabra periglaciario se restringía a áreas y procesos que ocurrieran en las zonas aledañas a glaciares.

Figura 32.

Depósito periglacial.



Fuente: Universidad Politécnica de Cataluña, s.f.

4. TIPOS DE MATERIALES DEPOSITADOS POR OTROS AGENTES:

- (1) **LACUSTRINAS.** Capas lacustres. Normalmente suelos de alta fertilidad y productividad. Suelos muy recientes dispuestos en terrazas, profundos, calcáreos (caracolillos), de bien a pobremente drenados.
- (2) **ALUVIO.** Material depositado no consolidado o en tránsito por las corrientes fluviales. Aluvio o aluvión, es el producto del aporte y acumulación de arenas, piedras y rocas, por una corriente de agua o sus desbordamientos. El aluvión es material detrítico transportado y depositado por una corriente de agua. Puede estar compuesto por arena, grava, arcilla o limo.
- (3) **COLUVIO.** Depósitos de fragmentos de roca y suelo como resultado de la gravedad. Son restos débilmente acodados que se han acumulado en la base de las pendientes, en depresiones o a lo largo del tiempo (material que ha rodado, caído o desplazado de las partes altas).
- (4) **LOESS Y DUNAS DE ARENA.** Material movido y depositado por el viento y dividido en grupos basados en el tamaño u origen de las partículas. El **loess** es un depósito eólico polvoriento que data principalmente del período frío del Pleistoceno. Las bajas temperaturas durante todo el año impidieron

la existencia de una vegetación exuberante en amplias zonas. Una **duna** o **médano** es una acumulación de arena en los desiertos o el litoral, generada por el viento, por lo que las dunas poseen unas capas suaves y uniformes. Pueden ser producidas por cambios en el viento o por variaciones en la cantidad de arena.

- (5) **PÉRDIDA DE MASAS O SOLIFLUXIÓN.** Movimiento de grandes cantidades de material por acción de la gravedad (deslizamientos, corrientes de lodo, hundimientos, caída de rocas, avalanchas, etc.). Forma parte de los “MOVIMIENTOS DE FLUJO”, o “MOVIMIENTOS MASIVOS”.

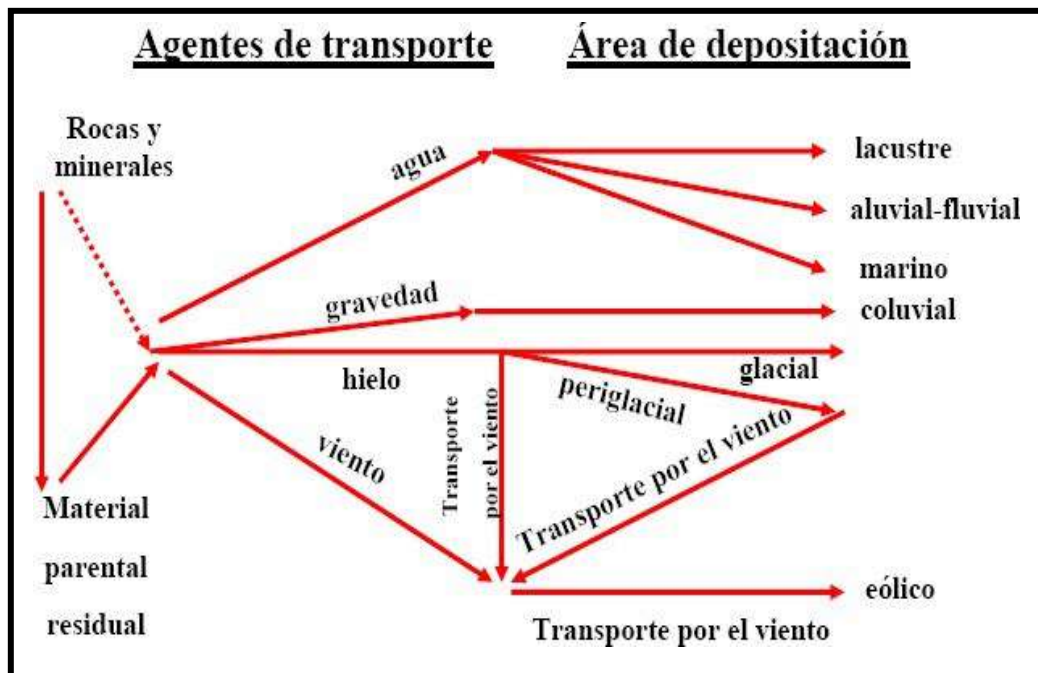
Cuadro 5.

Procesos más comunes de solifluxión.

Proceso.	Características.	Condicionantes.
<i>Solifluxión (solifluction).</i>	En suelos arcillo-limosos, el agua en los poros actúa licuando la masa y provocando elasticidad plástica y el deslizamiento del suelo. Gelifluxión en áreas periglaciales.	Pendiente moderada. Suelos arcillosos.
<i>Flujo de tierra (earthflow).</i>	Cuando el agua en el suelo supera el punto de saturación todo el perfil edáfico se moviliza bruscamente a favor de la pendiente (colada de barro).	Pendiente moderada. Umbría. Suelos porosos.
<i>Flujo de barro (mudflow).</i>	Si el peso específico de suelo movilizado sólo comprende menos del 40% de la masa movilizada y el resto es agua se produce una licuefacción que busca las líneas de talweg para evacuar.	Pendiente fuerte.
<i>Flujo de detritos (debris flow).</i>	En torrentes y quebradas el caudal aumenta hasta el punto de colmatación (<i>relleno de una cuenca sedimentaria con materiales detríticos arrastrados y depositados por el agua</i>). Sobrepasando la capacidad de evacuación del canal de escurrimiento (aluviones).	Talweg o vaguadas profundos.

Figura 33.

Mecanismos de transporte de fragmentos formadores de suelos.



PROCESOS ESPECÍFICOS DE ALTERACIÓN.

Estos procesos específicos conducen a la formación de un tipo concreto de suelo o a distintos tipos de suelos con características comunes.

- (1) **MELANIZACIÓN.** Es el proceso de adición y traslocación mineral responsable del “oscurecimiento de materiales minerales inicialmente claros por reacción con materia húmica, mólica o umbrica” (De las Salas, 1987); hace que los horizontes A del suelo se tornen oscuros.
- (2) **EMPARDECIMIENTO.** Coloración parda del suelo como consecuencia de la alteración de los minerales que liberan fuertes cantidades de Fe. Se forman hidróxidos férricos hidratados y cristalinos que se unen a la arcilla (directamente o a través del humus) formando compuestos (a veces complejos organominerales) de color pardo.
- (3) **RUBEFACCIÓN.** Proceso común en regiones cálidas y templadas (con larga e intensa sequía). Ahí, los compuestos de Fe producidos sufren una

deshidratación total, cristalizando en forma de óxidos, tipo hematitas (color rojo vivo, que impregna el perfil).

(4) FERSIALITIZACIÓN. Es el proceso de formación de silicatos de la arcilla (compuestos de Fe, Si y Al).

(5) FERRALITIZACIÓN. Esta solo se presenta en climas tropicales lluviosos con altas temperaturas, fuerte drenaje, constante percolación de agua y un profundo lavado de metales alcalinos, alcalinotérreos y silicio, en este hay enriquecimiento de compuestos estables como óxidos e hidróxidos de Fe y Al (hematitas, goethita y gibsita), de cuarzo y filosilicatos.

(6) GLEYZACIÓN. La formación está condicionada a la existencia de capas de agua más o menos permanentes que saturan el suelo provocando una extensa hidromorfía. El agua al desplazarse lentamente por el suelo se irá empobreciendo en O_2 y acidificando por efecto de la M.O., por lo cual el ambiente se irá volviendo reductor, lo que repercutirá en el suelo en relación con los compuestos de Fe y Mn. Si las condiciones de saturación se mantienen a lo largo del año y las condiciones reductoras predominan se moviliza el Fe^{++} , que es muy móvil, sufriendo una redistribución por el perfil, acumulándose compuestos ferrosos, dándole al suelo un color gris-verdoso-azulado.

Figura 34.

Suelo con hidromorfía (gleyización).



Fuente: Dorronsoro, s.f.

La clasificación de los suelos varía de acuerdo con: MATERIAL PARENTAL, MATERIALES CONSTITUYENTES ESPECIALES, MADUREZ, ESTRUCTURA, CLIMA Y VEGETACIÓN. La clasificación tiene múltiples objetivos: CIENTÍFICOS (génesis y evolución); AGRÍCOLAS (fertilidad y manejo); INGENIERÍA (estabilidad en pendientes, expansión y contracción, estabilidad de excavaciones, etc.).

ÁREAS SIN SUELO: las playas, cárcavas activas (grava/canteras), zonas urbanas, hábitat de aguas profundas, mantos rocosos expuestos y glaciares presentan regiones en las

que no existe una relación de factores formadores del suelo, por ello es considerado presentan áreas sin suelo.

PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Las propiedades físicas de los suelos (textura, estructura, densidad, porosidad, capacidad de retención de humedad, consistencia, temperatura y color) determinan la disponibilidad de O₂ en el suelo, la movilidad del agua en el perfil y la facilidad de penetración de las raíces de las plantas. Algunas de estas propiedades son inmutables, por ejemplo, la textura; pero otras son susceptibles al cambio a través de ciertas prácticas de manejo, tal es el caso de la densidad y la capacidad de retención de humedad.

TEXTURA DEL SUELO

La textura del suelo es la proporción relativa de los separados del suelo, caracterizados por su tamaño. Esta característica física del suelo se refiere al tamaño de las partículas sólidas minerales. Las partículas sólidas minerales son el resultado de la acción de los agentes de la intemperización sobre el material rocoso.

Hay minerales primarios que se fraccionan finamente mientras que otros muy resistentes que finalmente quedan en partículas gruesas. Así, si pudiésemos separar las partículas sólidas minerales de una muestra de suelo por su tamaño, las podríamos agrupar en tres categorías: partículas grandes, medianas y pequeñas. Cada una de estas tres categorías las denominamos, separados del suelo.

Las partículas minerales del suelo se derivan de las rocas que han sido fragmentadas y transformadas en piezas cada vez más pequeñas a través de millones de años, en un proceso denominado intemperismo, causado por factores químicos y físicos. Las partículas del suelo varían, mucho en tamaño y son agrupadas por tamaño, desde las más pequeñas como arcillas, lis, arenas y gravas.

La gran mayoría de las propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas del suelo, como: estructura y grado de agregación de las partículas, densidad y peso del suelo, color, consistencia, porosidad, aireación, permeabilidad, hidromorfía, retención y pérdida de agua; lavado, capacidad de cambio, reserva de nutrientes, erosividad, plasticidad, cohesión o adherencia, consistencia y cementación, rigidez y fuerza de sostenimiento, tipo de drenaje, están influenciadas por la granulometría.

Debido a que el suelo está formado de partículas de disímiles tamaños, las cuales son heterogéneas en su composición física y química. El análisis granulométrico representa el dato más valioso para interpretar la génesis y las propiedades de los suelos, es así que conocer esta granulometría es esencial para cualquier estudio del suelo.

Este concepto es descrito como “ el porcentaje de materia mineral en peso de cada fracción, obtenida por separación de las partículas minerales en dos más clases por tamaño mutuamente excluyentes” (Rucks, *et al.*, 2004). Para clasificar a los constituyentes del suelo según su tamaño de partícula se han establecido muchas clasificaciones granulométricas. Básicamente todas aceptan los términos de grava, arena, limo y arcilla, pero difieren en los valores de los límites establecidos para definir cada clase.

De acuerdo con lo anterior, los separados del suelo son: arena, limo y arcilla. La arena es el separado más grande y su tamaño varía entre los 2.0 a 0.02 mm; el limo tiene un tamaño que va de 0.02 a 0.002 mm y la arcilla cuyo tamaño 0.002 mm (2 μ).

Cuadro 6.

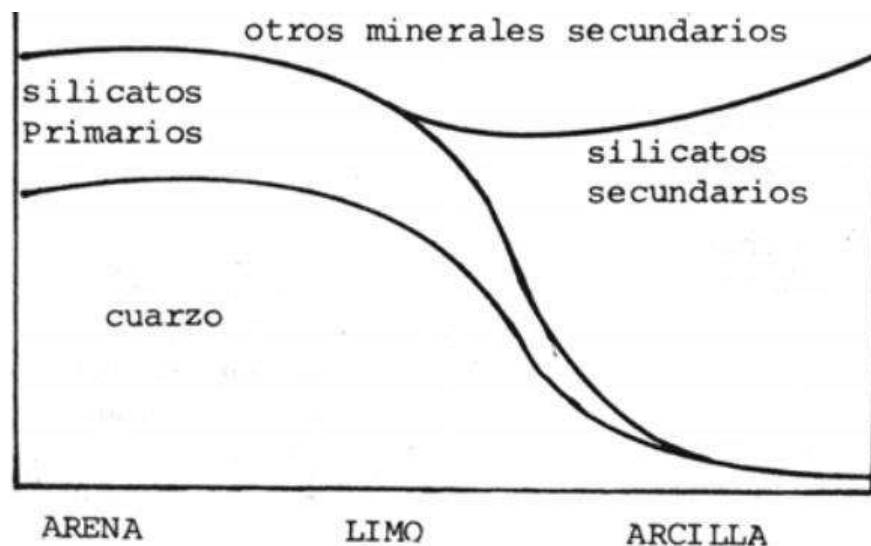
Límites de tamaño de las partículas minerales de los suelos.

<i>Límites de tamaño de los separados del suelo</i>					
<i>USDA</i>		<i>Internacional</i>		<i>ITM</i>	
<i>Partículas</i>	<i>Diámetro en mm</i>	<i>Partículas</i>	<i>Diámetro en mm</i>	<i>Partículas</i>	<i>Diámetro en mm</i>
<i>Grava</i>	> 2.0	<i>Grava</i>	> 2.0	<i>Piedras</i>	> 2.0
<i>Arena muy gruesa</i>	1.0 - 2.0				
<i>Arena gruesa</i>	0.5 - 1.0	<i>Arena gruesa</i>	0.2 - 2.0	<i>Arena gruesa</i>	0.6 - 2.0
<i>Arena mediana</i>	0.25 - 0.5			<i>Arena mediana</i>	0.2 - 0.6
<i>Arena fina</i>	0.10 - 0.25	<i>Arena fina</i>	0.02 - 0.2	<i>Arena fina</i>	0.06 - 0.2
<i>Arena muy fina</i>	0.05 - 0.10				
<i>Limo</i>	0.002 - 0.05	<i>Limo</i>	0.002 - 0.02	<i>Limo</i>	0.002 - 0.06
<i>Arcilla</i>	< 0.002	<i>Arcilla</i>	< 0.002	<i>Arcilla</i>	< 0.002

El término textura se usa para simbolizar la composición granulométrica del suelo. (Fertilab, 2016) considera que “la textura del suelo representa las cantidades de

partículas minerales inorgánicas de diferentes tamaños”, esta está en función de la proporción relativa de separados minerales menores de 2 mm, esto es arenas, limos y arcillas (no se considera a las gravas). es así como podemos considerar que cada término textural corresponde con una cierta composición cuantitativa única de arena, limo y arcilla. Los términos texturales se definen de una manera gráfica en un diagrama triangular que representa los valores de las tres fracciones (ver figura 39).

El equilibrio en el contenido de carbono orgánico en cada fracción de la materia orgánica, se encuentra fuertemente influenciado por el clima, el material parental, la vegetación y el manejo del suelo (Manlay et al., 2007



Fuente: Rucks, *et al.*, 2004.

Los procesos químicos son determinados o dependen del área superficial total que es donde se efectúan varias reacciones del suelo. Asimismo, el intemperismo de minerales que proporciona nutrimentos a la planta, depende de la superficie que presenten las partículas pequeñas, las cuales predominan en los suelos de textura arcillosa, ocasionando que estos suelos retengan más el agua, reduciendo el drenaje y la aireación, por otra parte, estos suelos son finos y plásticos, así como difíciles de trabajar.

En tanto que los suelos arcillosos, debido al contenido de humedad que retienen son denominados "PESADOS", pues dificultan, mucho las actividades de laboreo.

Figura 35.

Textura de la arcilla mojada (alta retención de agua).



Fuente: Siim, 2005.

Muchas propiedades agrológicas están definidas por la textura del suelo. Los suelos arenosos son inertes desde el punto de vista químico, carecen de propiedades coloidales y de reservas de nutrimentos. Muchos de los iones nutritivos que deben tomar las plantas del suelo están adsorbidos por los coloides, además retienen poca agua (presentan un drenaje excesivo); Por esta razón, cuanto más fina sea la textura del suelo mayor será su fertilidad. Los suelos más fértiles son aquellos que tienen 30% o más de arcillas.

1. **CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LAS ARCILLAS:** plasticidad (facilidad para ser trabajados y moldeadas), baja permeabilidad, alta resistencia cuando están secos. Las arcillas son plásticas y muy adherentes cuando están húmedas y forman grandes, y fuertes, bloques cuando están secas. Los suelos arcillosos cuando están muy húmedos forman masas imposibles de desintegrar, la maquinaria se atasca por esa consistencia “CHICLOSA”; y cuando están muy secos, los terrones adquieren una dureza extrema que convierten su trabajo en una tarea demasiado laboriosa. Se dice entonces que los suelos arcillosos son pesados para el laboreo, y son considerados suelos de barrial; son muy activos desde el punto de vista químico, adsorben iones y moléculas, floculan y dispersan, muy ricos en nutrientes, retienen mucha agua, bien estructurados, pero son impermeables y asfixiantes para la vegetación. Los suelos lisos tienen nula estructuración, sin propiedades coloidales, son impermeables y con mala aireación.

Figura 36.

Partículas de la arcilla.



Fuente: Gaitán, *et al.*, s.f.

Los suelos arcillosos presentan una capacidad excepcional para anegar y retener agua por lo tanto es complicado el cultivo en este tipo de suelos; en estos suelo las

plantas pueden verse afectadas por no tener suficiente oxígeno en el espacio poroso para que ellas puedan respirar.

2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LAS ARENAS. Los suelos arenosos son poco fértiles y como tienen poco poder de absorción, son muy permeables al agua y sufren los efectos del lavado de cationes. En cuanto a las propiedades físicas presentan mala estructuración, buena aireación, muy alta permeabilidad y nula retención de agua. Los suelos arenosos no retienen agua aprovechable para las plantas. Es necesario regarlos asiduamente o, solamente, podremos cultivar especies poco demandantes de este líquido. Los suelos arenosos no tienen capacidad de almacenamiento de nutrientes para las plantas, ya que el agua al tener un movimiento muy rápido los puede solubilizar y acarrearlos a otros horizontes inferiores, lejos del alcance de las raíces de las plantas. Los suelos arcillosos tienen una gran capacidad para almacenar nutrientes, y en general son potencialmente fértiles. Una dominancia de partículas grandes da como resultado suelos arenosos, que retienen poco agua, tienen excesivo drenaje, se encuentran bien aireados, pero son de baja fertilidad por la escasa retención de nutrimentos, alta permeabilidad, poca consistencia y demás propiedades inherentes a los suelos arenosos. Las partículas de arena son arrastradas por el viento y agua, las arenas finas son muy erosionables. Los suelos arenosos a menudo son denominados "LIGEROS" porque suelen ser fáciles de trabajar.

Figura 37.

Partículas de la arena.



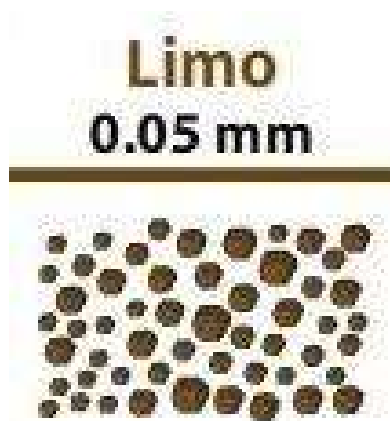
Fuente: Gaitán, *et al.*, s.f.

Los suelos arenosos pueden ser laboreados en cualquier momento y son muy ligeros, es decir, que requieren menos energía para removerlos que en el caso de los suelos arcillosos.

3. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS LIMOS. No tienen plasticidad, de alta permeabilidad, poca resistencia a la ruptura cuando se secan, dificultad para compactarse. Normalmente se sienten suaves y harinosos cuando se secan y se rompen fácilmente al manipularlos.

Figura 38.

Partículas del limo.



Fuente: Gaitán, *et al.*, s.f.

4. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS SUELOS FRANCOS. Los suelos francos son los equilibrados con propiedades compensadas. Las arcillas se pegan y se protegen, los limos no se unen y se erosionan más fácilmente. Las arenas son muy inertes mientras que las arcillas tienen un alto poder de amortiguación, pueden fijar y transformar a los contaminantes y presenta por tanto una alta capacidad de autodepuración.

Las texturas arenosa y arcillosa pueden presentar inconvenientes para el desarrollo de las plantas de un cultivo por lo que se considera a la textura franca-arcillosa, como la ideal y está determinada por un ligero predominio de arcilla y un balance entre la arena y el limo.

La acción de los factores formadores queda reflejada en la textura del suelo. Así, la roca da cierta clase textural, que será más patente cuanto más joven sea el suelo. El clima tiende a condicionar la textura en función de su agresividad, existiendo texturas gruesas en climas áridos, como en los desiertos y texturas arcillosas en climas húmedos y templados. El relieve condiciona el transporte de las partículas. El tiempo da una mayor alteración y favorece el aumento de la arcilla. La relación entre la cantidad de arcilla del material original y la de cada uno de los horizontes de un suelo es un buen índice del grado de evolución.

Figura 39.

Arena del desierto.



Fuente: Ascensión, 2018.

En los suelos las partículas no están sueltas, sino que se encuentran formando agregados. Para destruir la agregación y separar las partículas se utilizan diversos métodos, unos son métodos físicos (tritución suave, agitación lenta, agitación rápida, ultrasonidos, lavado y cocción) y otros son técnicas químicas (oxidación de la materia orgánica con agua oxigenada, ataque ácido de los carbonatos y compuestos de Fe^{3+} con HCl, dispersión de las arcillas con hexametáfosfato sódico o amoníaco).

Con los agentes agregantes pueden ser muy distintos, normalmente no sirve uno sólo de estos métodos, sino que se monta una cadena de tratamientos. La extracción final de las fracciones se realiza por tamizado para las arenas, mientras que la

sedimentación en fase acuosa es el método normal de separación de los limos y de las arcillas. Si se necesita subfraccionar a la fracción arcilla se ha de recurrir a la centrifugación.

En todas las clasificaciones de suelos la textura es un carácter diferenciador usado para definir las clases de suelos a todos los niveles. A nivel de evaluación la textura del suelo es un parámetro de calidad de los terrenos. Los nombres de las clases texturales están basados en las proporciones relativas de cada uno de los tres separados del suelo arena, limo y arcilla. De esa forma, suelos que están constituidos principalmente por arcilla se denominan arcillosos, aquellos con un alto contenido de limo son llamados limosos y los que contienen un alto porcentaje de arena son arenosos. Un suelo que no presenta las propiedades físicas dominantes de ninguno de estos tres grupos (40% de arena, 20% de arcilla y 40% de limo) se denomina franco. Cuando las cantidades relativas del separado menos dominante varían, también cambia la clase textural y el nombre refleja el cambio en composición, tales como franco arcillo liso, franco arcilloso y franco liso.

Después de haber denominado los porcentajes de arena, limo y arcilla mediante un análisis de laboratorio, se puede usar el TRIÁNGULO DE TEXTURAS DEL SUELO para determinar el nombre textural del suelo. Las clases texturales del suelo son: arena, arenoso franco, franco arenoso, franco arcillo arenoso, franco, franco limos, franco arcilloso, limoso, franco arcillo limoso, arcillo arenoso, arcillo limoso, arcilloso. En todas las clasificaciones de suelos la textura es un carácter diferenciador ampliamente utilizado para definir las clases de suelos a todos los niveles. A nivel de evaluación la textura del suelo es un parámetro evaluador de la calidad de los terrenos.

Figura 39.

Triángulo de las texturas del suelo.

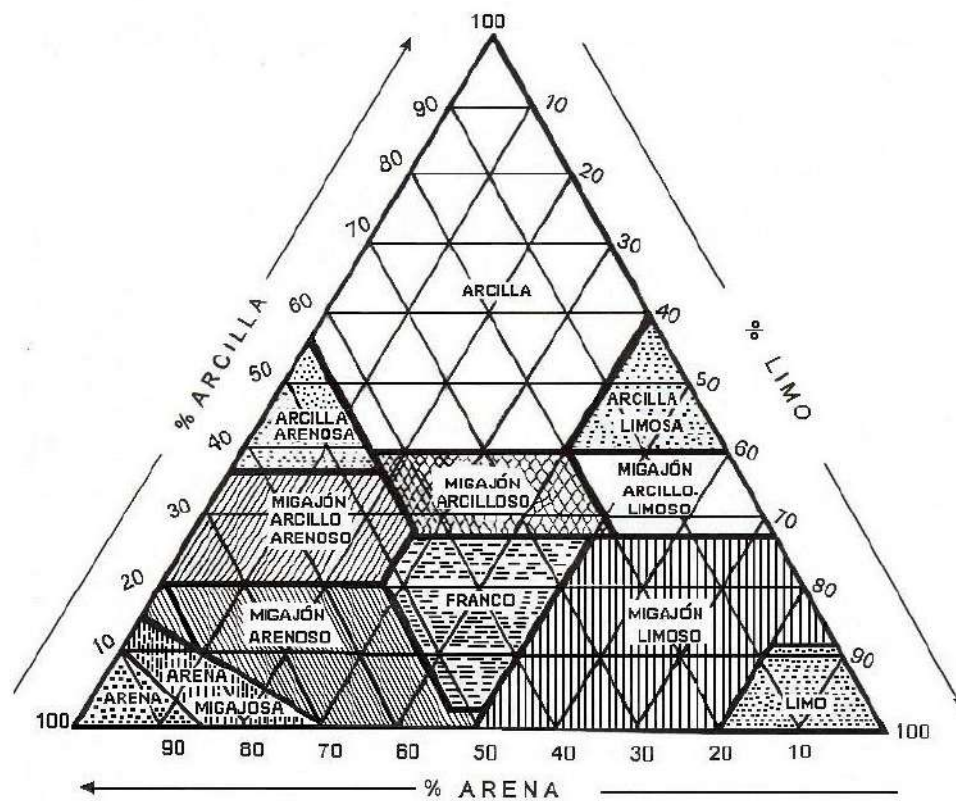


DIAGRAMA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA DE LOS SUELOS

Cuadro 7.

Características y propiedades físicas de las distintas clases texturales.

Características de las clases texturales					
Clase textural	Contenido de arena	Friable	Pegajosidad	Plasticidad	Cohesión
Arena	Muy abundante	No	No	No	No
Arenoso franco	Muy abundante	No	No	No	Poca
Franco arenoso	Abundante	No	No	No	Poca
Franco	Medio	Ligeramente	Ligera	Ligera	Intermedia
Franco areno arcilloso	Medio	No	Moderada	Moderada	Intermedia
Arcilla arenosa	Moderado	No	Alta	Alta	Alta

Franco liso	Ligero	Bastante	Ligera	Ligera	Intermedia
Franco arcilloso	Muy ligero	Si	Mediana	Mediana	Muy alta
Lis	Ligero o muy ligero	Extremadamente	Alta	Alta	Intermedia
Franco arcillo arenoso	Ligero o muy ligero	Medianamente	Mediana	Mediana	Intermedia
Arcillo liso	Muy ligero o no arenoso	Medianamente	Alta	Alta	Muy alta
Arcilla	Muy ligero o no arenoso	No	Muy alta	Muy alta	Muy alta

Cuadro 8.

Relación entre la densidad aparente(Dap) y el crecimiento de las raíces.

<i>Relación de densidad aparente (Dap-g/cm3) del suelo con textura y crecimiento de las raíces</i>			
<i>Clases texturales</i>	<i>Dap ideal</i>	<i>Dap. que afecta</i>	<i>Dap. que reduce</i>
<i>Arenas y arenoso franco</i>	< 1.6	1.69	> 1.8
<i>Franco arenoso</i>	< 1.4	1.63	> 1.8
<i>Franco arcillo limoso</i>	< 1.4	1.6	> 1.75
<i>Franco y franco limoso</i>	< 1.3	1.6	> 1.75
<i>Franco limoso y franco arcilloso y franco arcillo limoso</i>	< 1.4	1.55	> 1.65
<i>Arcillo arenoso, arcillo limoso y arcillosos (35-45% de arcilla)</i>	< 1.1	1.49	> 1.58

Cuadro 9.

Relación entre la textura y otras propiedades del suelo.

<i>Relación entre la textura del suelo y otras propiedades</i>			
<i>Propiedad</i>	<i>Suelos muy arenosos</i>	<i>Suelos muy lisos</i>	<i>Suelos muy arcillosos</i>
<i>Capacidad de retención de humedad</i>	<i>Baja</i>	<i>Media a alta</i>	<i>Alta</i>

<i>Aireación</i>	<i>Bien aireados</i>	<i>Moderada aireación</i>	<i>Pobre aireación</i>
<i>Drenaje</i>	<i>Rápido</i>	<i>Lento a moderado</i>	<i>Muy lento</i>
<i>Contenido de</i>	<i>Bajo</i>	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>
<i>Descomposición de la</i>	<i>Rápido</i>	<i>Medio</i>	<i>Lento</i>
<i>Capacidad de retención de nutrimentos</i>	<i>Baja</i>	<i>Media</i>	<i>Alta</i>
<i>Capacidad para aportar nutrimentos</i>	<i>Lenta</i>	<i>Media</i>	<i>Alta</i>
<i>Capacidad de lavado de contaminantes</i>	<i>Rápida</i>	<i>Moderada</i>	<i>Lenta</i>
<i>Encharcamiento</i>	<i>Pobre</i>	<i>Pobre</i>	<i>Buena a excelente</i>
<i>Expansión y contracción</i>	<i>Poca o ninguna</i>	<i>Poca</i>	<i>Moderada a alta (según arcilla)</i>
<i>Compactación</i>	<i>Muy difícil</i>	<i>Fácil</i>	<i>Muy fácil</i>

Cuadro 10.

Relación entre la textura y la proporción de agua aprovechable en el suelo.

<i>Relación entre la textura del suelo y la proporción de agua aprovechable</i>	
<i>Textura</i>	<i>Fracción de agua aprovechable</i>
<i>Arena, arenas lisas y lis arenosos</i>	<i>< 0.10</i>
<i>Lis, lis arcilloso, lis areno arcillosos y arenas arcillosas</i>	<i>0.10 - 0.15</i>
<i>Arcillas lisas y arcillas</i>	<i>0.10 - 0.20</i>
<i>Franco, franco liso y franco arcillo liso</i>	<i>0.15 - 0.25</i>

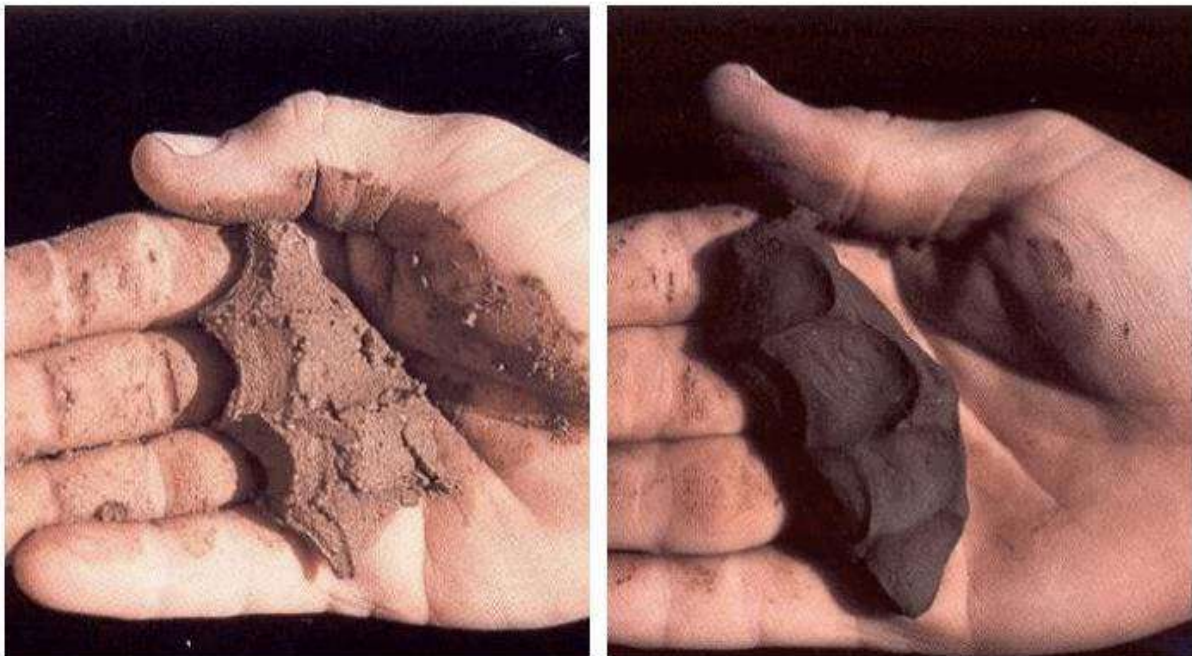
Para la determinación de la textura de una muestra de suelo se recurre al MÉTODO DEL HIDRÓMETRO DE BOUYOUCOS, que es el método mecánico y se lleva a cabo en el laboratorio. Los resultados de este método son el porcentaje de arena, limo y arcilla. Con estos datos en mano y con la ayuda del triángulo de las texturas se determina esta característica.

En campo también se puede utilizar un MÉTODO EMPÍRICO CUALITATIVO llamado MÉTODO DEL TACTO o, mejor dicho, MÉTODO SENSORIAL, para saber de manera aproximada esta característica. Este método consiste en tomar una pequeña muestra de suelo y adicionarle agua,

solo para mojarla, y friccionar una pequeña porción entre los dedos índice y pulgar y notar la sensación de aspereza o fineza del material. La arcilla se “siente” como plastilina, muy fina y pegajosa, mientras que la arena se siente abrasiva y dura. Solo la experiencia nos aproxima a los resultados de laboratorio. No obstante, en ocasiones cuando el laboratorio es inaccesible este método es muy útil y junto con otras determinaciones nos ayuda a tomar las decisiones correctas sobre el manejo agronómico del suelo.

Figura 40.

Método del tacto para la determinación de la textura del suelo.



Fuente: Díaz, 2019.

ESTRUCTURA.

Estas estructuras son indicativas de un drenaje deficiente del agua excedente en el suelo. Mientras que la textura de un suelo es prácticamente imposible de cambiar; la estructura si que la podemos mejorar con la incorporación de materia orgánica.

Las sustancias orgánicas producto de la descomposición de la materia orgánica, así como las secreciones de microorganismos, sirven como “PEGAMENTO” para las partículas minerales sin capacidad natural de floculación.

La estructura, determinada por el modo de asociación o la forma de unión de las diversas partículas elementales que constituyen el suelo es una propiedad edáfica que está, enormemente, influenciada por la textura del suelo. Excepto donde la textura es uniformemente gruesa, la posición de las partículas en el suelo es rara vez casual. Las partículas más pequeñas se acumulan en los espacios dejados por las de mayor tamaño, y los coloides forman capas alrededor de los granos mayores, enlazándolos en unidades estructurales de variados tamaños y diferente, dejando superficies débiles entre unas y otras.

La agrupación o agregación de las partículas tiene enorme relevancia en la productividad. La estructura del suelo puede ser modificada por el laboreo, el contenido de humedad, el congelamiento y deshielo, el crecimiento de las raíces, la presencia de lombrices terrestres u otros habitantes del suelo y el paso constante de vehículos, personas o animales sobre el terreno. La estructura del suelo es la forma que toman los AGREGADOS del suelo, es decir, como las partículas sólidas se agrupan naturalmente. A estos agregados también se les llama “PEDS”.

Los agregados o peds están formados por partículas individuales (minerales, MO y poros) y le dan al suelo cierta estructura. La estructura más que una propiedad es un estado, ya que cuando el suelo está seco, se agrieta y se manifiesta la estructura, pero si está húmedo, el suelo se vuelve masivo, sin grietas y la estructura no se manifiesta. Los suelos muy arenosos carecen casi siempre de estructura pues las partículas que lo constituyen son difíciles de agregar. Por el contrario, los de textura muy fina pueden unirse fácilmente y conformar estructura de una extremada agregación. En los peds hay un material inerte, partícula mineral, que se une por la MO, arcillas y otros agentes cementantes. Si las arcillas están dispersas, el suelo carece de estructura, si están floculadas, forman estructura.

MORFOLOGÍA. Desde el aspecto morfológico la estructura del suelo se define por una forma, un tamaño y un grado de manifestación de los agregados.

A) Forma. Se definen los siguientes tipos:

1. MIGAJOSA. Agregados porosos redondeados Típica de los horizontes A.
(similar a la estructura del migajón del pan), es característica de suelos con

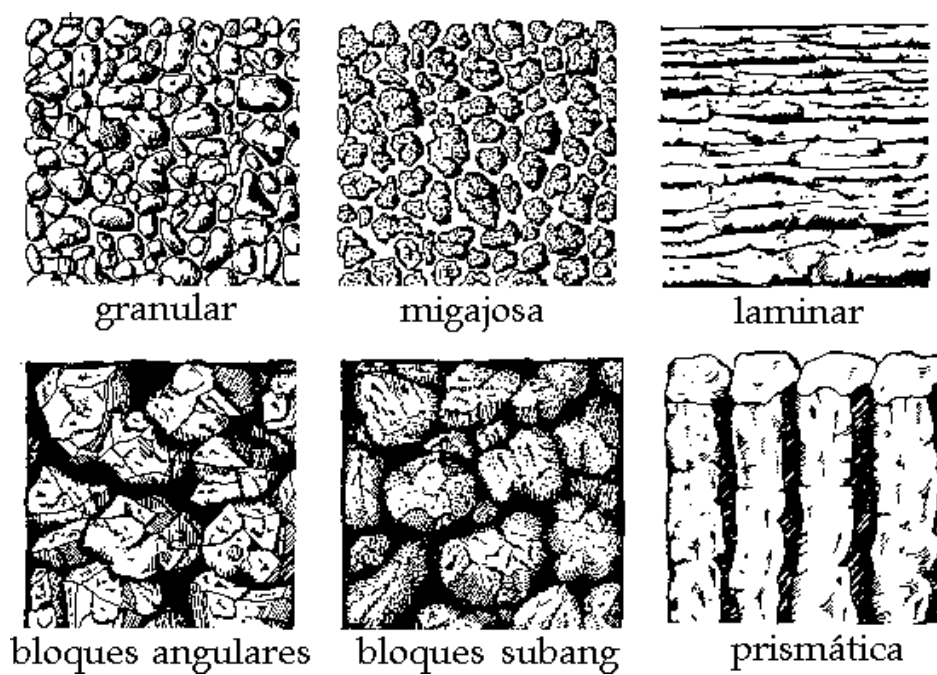
una textura de franca-arcillosa a arcillosa, posee agregados pequeños con muchos microporos o poros capilares. Se considera la estructura ideal.

2. GRANULAR. Agregados sin apenas poros en su interior, redondeados. Es similar a la migajosa, pero con los agregados compactos. Típica de los horizontes A; son los granos sueltos de arena de los horizontes y suelos con un predominio casi exclusivo de arena.
3. BLOQUES ANGULARES. Agregados poliédricos, con superficies planas, aristas vivas y vértices. Las caras del agregado se ajustan muy bien a las de los agregados vecinos. Típicas en los HB arcillosos.
4. BLOQUES SUBANGULARES. Agregados poliédricos, con superficies no muy planas, de aristas romas y sin vértices. Las caras del agregado se ajustan moderadamente a las de los agregados vecinos. Típicos en los horizontes HB arcillosos.
5. PRISMÁTICA. Cuando los bloques se desarrollan en una dirección (vertical) más que en las dos horizontales. Presente en los horizontes más arcillosos, a veces HB y en ocasiones HC.
6. COLUMNAR. Prismas con su cara superior redondeada. Estructura muy rara. Típica de suelos salinos.
7. LAMINAR. Se presenta cuando los agregados se desarrollan en dos direcciones (horizontales) más que en la tercera (vertical). Es una estructura típica de los horizontes arenosos, como los E. se presenta en suelos derivados de rocas sedimentarias y está constituida de placas superpuestas que llegan a ser verdaderos obstáculos para la penetración y crecimiento de las raíces de las plantas.
8. SIN ESTRUCTURA. Cuando no hay desarrollo de agregados. (1) Horizontes de partículas sueltas muy arenosas o pulverulentos y (2) suelos masivos o endurecidos.

Las estructuras de bloques angulares, columnar y prismática son características de horizontes con gran contenido de arcilla.

Figura 41.

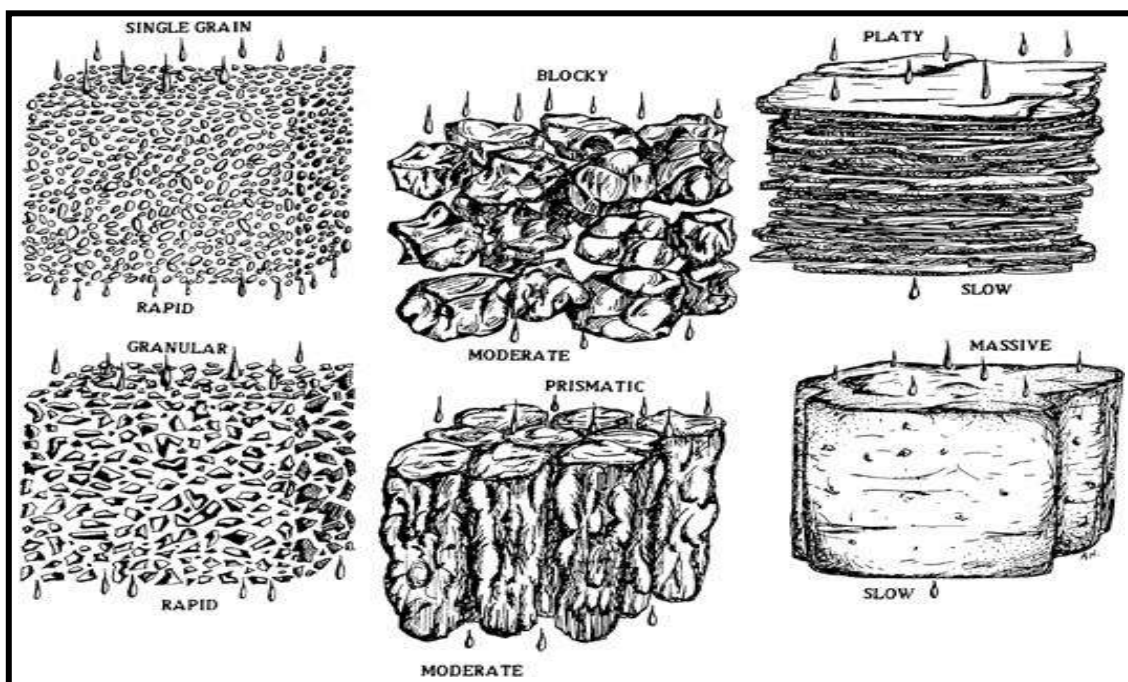
Estructuras del suelo.



Fuente: Salazar, 2022.

Figura 42.

Tipos principales de estructuras del suelo.



B) Tamaño. Por el tamaño de los agregados las estructuras se clasifican en: (1) GRUESA, (2) MEDIA, (3) FINA Y (4) MUY FINA.

C) Grado de desarrollo. Según la intensidad con que se manifieste el desarrollo de la estructura: (1) FUERTE, (2) MEDIA, (3) DÉBIL Y (4) NULA.

Los principales procesos de formación de agregados son:

1. PROCESOS FISICOQUÍMICOS: Floculación (unión de arcilla por cationes multivalentes). Formación de microagregados (arcilla + humus).

Los procesos (congelamiento y deshielo, contracción y expansión, humedecimiento y secado) causan fuertes uniones en los microagregados.

2. PROCESOS BIOLÓGICOS: La M.O. es el principal agente de formación y estabilización de agregados. Agregación por raíces, lombrices, hifas de los hongos y microorganismos (vivos y muertos). Formación de complejos órgano-minerales.

Influencia de la labranza.

(1) Efectos favorables: rompimiento de terrones, incorpora materia orgánica, elimina áreas compactadas.

Figura 43.

Tierra labrada.



Fuente: Arabuko, s.f.

(2) Efectos desfavorables: rompe agregados estables, produce compactación y acelera la oxidación de materia orgánica.

Estabilidad de la estructura. La resistencia a la modificación de agregados. El agente destructor de la estructura es el agua. Hinchiza los materiales y dispersa los agregados. Los agregados que están en la superficie del suelo son dispersados por el impacto de las gotas de lluvia. Por otra parte, al mojarse los pedos el agua va entrando hacia el interior de los agregados, va comprimiendo el aire que había y llega un momento en el que el aire tiene que salir y resquebraja o rompe el agregado.

Si la arcilla es abundante, puede formar estructuras muy compactas, muy malas, desfavorables a la penetración de raíces y agua, que puede provocar condiciones de asfixia temporales en áreas lluviosas. En los horizontes de superficie los limos y las arenas finas favorecen el fenómeno de "BATIDO", causa de la degradación de la estructura, lo que se traduce en la formación de una superficie que impide la penetración de agua y favorece el escurrimiento. Representa una fuerte limitante al crecimiento de las raíces, la infiltración y percolación del agua en el suelo. La M.O. modifica la condición estructural del suelo, favorece la retención, la percolación e infiltración del agua, el crecimiento de las raíces, el intercambio gaseoso y la labranza.

Cuando un suelo es compactado, por el paso frecuente de vehículos o por medio de la construcción, la estructura del suelo es destruida, parcial o totalmente, dependiendo del grado de compactación. La reducción en volumen ocurre a expensas de todos los macroporos y muchos de los mesoporos. La densidad aparente aumenta y la retención y movimiento del agua se reducen. Los suelos arenosos se compactan muy poco en ciertas condiciones de humedad. Pero muchos suelos de textura media y fina son particularmente susceptibles a la compactación. El contenido de humedad en el momento de la compactación es importante.

Figura 44.

Compactación del suelo.



Fuente: Agrovoy, 2017.

DENSIDAD

Existen dos valores de densidad del suelo, la DENSIDAD REAL (DR), que puede definirse como “la densidad media de sus partículas sólidas” (Gaitán, *et al.*, s.f.); y la DENSIDAD APARENTE (DAP). Es importante concentrarse en las fórmulas presentadas y diferenciarlas claramente. PARA FINES PRÁCTICOS, LA DENSIDAD REAL O DENSIDAD DE LAS PARTÍCULAS NO CAMBIA Y SE PUEDE TOMAR COMO CONSTANTE EL VALOR DE 2.65 g/cm^3 .

En contraparte del valor de la densidad aparente es muy variable y se debe determinar ya sea en campo o en el laboratorio. Como la densidad del suelo es una relación entre masa o peso y el volumen, las unidades empleadas son: g/cm^3 (o sus equivalentes escalares, ton/m^3) o g/ml . Considerando que, a nivel práctico, 1 mililitro de agua ocupa un volumen de 1 cm^3 .

La densidad aparente “es el peso de suelo seco que tiene una unidad de volumen de suelo determinada” (Gaitán, *et al.*, s.f.), Por ello hay que tener claro este concepto. El suelo seco es una convención que significa que la muestra de suelo debe de ser

sometida a un tratamiento de secado en una estufa de convección a 105°C por un tiempo mínimo de 24 horas.

En general, el valor de la densidad aparente de un suelo nos proporciona una idea de su grado de compactación o agregación, y al mismo tiempo del volumen de espacio poroso.

“A mayor densidad aparente menor porosidad tiene un suelo y por lo tanto menos espacios por los que pasar el agua con lo que la velocidad de infiltración es menor. Esta característica del suelo se modifica con el manejo del mismo, reduciéndola al labrar o aumentándola en las zonas compactadas” (Gaitán, et al., s.f.).

Con esta idea en mente, podemos deducir que, durante el mantenimiento del cultivo, que requiere del paso constante de maquinaria, el suelo sufre compactación y por consecuencia de la reducción del espacio poroso, lo que puede afectar el cultivo del siguiente ciclo, y nos conduce a reflexionar sobre la necesidad de laborear al suelo antes de realizar la siembra del siguiente ciclo. Los suelos arcillosos tienden a requerir de un laboreo más intensivo mientras que los suelos francos y arenosos no necesitan de mucho trabajo. Un valor ideal de la densidad aparente es de 1.25 g/cm³. A medida que el valor de la Dap es mayor, la compactación es también mayor, y un valor alrededor o próximo a 1.25 g/cm³ significa que la compactación no es de consideración y que contamos con un porcentaje de espacio poroso de aproximadamente el 50%, que es un valor ideal.

Los suelos arenosos que de manera natural no se compactan, presentan valores de densidad aparente superiores a 1.4 g/cm³, pudiéndose mejorar con la incorporación de materia orgánica al lograr una mayor agregación.

El valor de la densidad aparente (Dap) de un suelo nos ayuda a determinar de manera indirecta el peso de un suelo. Si por ejemplo tenemos que la determinación de la Dap de la muestra de un suelo nos arrojó el valor de 1.35 g/cm³ y queremos saber cuánto pesa un terreno de 10,000 m² (1 hectárea) a una profundidad de 30 cm, seguimos el siguiente procedimiento:

- En primer lugar, debemos saber que 1.35 g/cm^3 es igual a 1.35 ton/m^3 . Lo anterior se analiza de la siguiente manera: un metro cúbico de suelo tiene un peso de 1.35 toneladas (solo para este ejemplo).
- Luego, tenemos que calcular cual es el volumen total del terreno multiplicando la superficie o área (m^2) por su grosor (m). En este caso sería multiplicar los $10,000 \text{ m}^2$ por 0.3 metros (recuerden que debemos hacer operaciones siempre con las mismas unidades y debemos transformar 30 cm a metros, 0.3 m), lo que resulta en $3,000 \text{ m}^3$ (m^2 por m es igual a m^3). Volumen del terreno (m^3) = Superficie (m^2) x Grosor (m).
- Finalmente, nos hacemos el planteamiento siguiente; si un metro cúbico de suelo tiene un peso de 1.35 toneladas, ¿Cuántas toneladas pesarán $3,000 \text{ m}^3$?

$$X = \frac{1.35 \text{ ton} \cdot \text{m}^3 \times 3000 \text{ m}^3}{1 \text{ m}^3} = 4.050 \text{ toneladas}$$

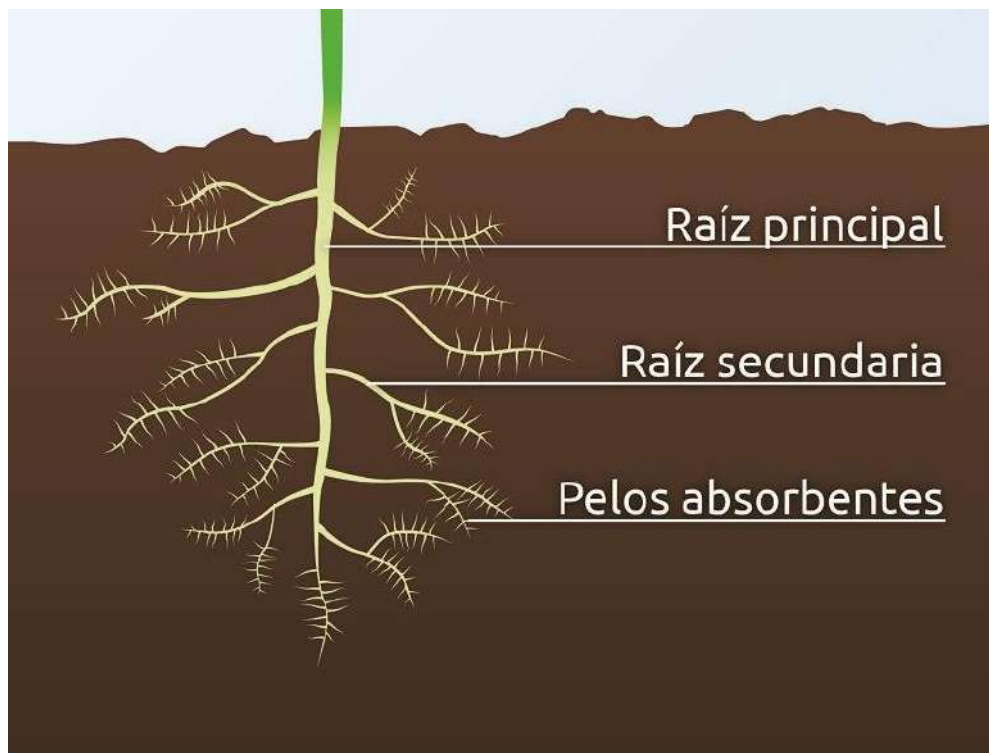
- Si nos queremos ahorrar tiempo, podemos prescindir de la regla de tres simple y solamente multiplicamos el valor de Dap por el volumen del terreno y obtendremos el peso correspondiente.

POROSIDAD DEL SUELO.

La porosidad expresa el volumen de espacios vacíos llenados de agua de agua o de aire que se expresa en porcentaje del volumen de tierra total. Se distinguen los macroporos (poros más grandes del suelo, $> 8 \mu$), ocupados por agua en un suelo húmedo y, reemplazados por aire en un suelo seco). La microporosidad (volumen de capilares $< 8 \mu$, que conservan el agua después del secado inicial, o sea a capacidad de campo); los pelos absorbentes de las raíces de la planta y los microorganismos viven en entre estos poros. La porosidad depende de la textura, contenido de MO, estructura y actividad biológica del suelo. Los suelos que contienen limo y arcilla, al ser pequeñas las partículas, forman muchos microporos; la MO contribuye a aumentar la porosidad debido a su gran capacidad agregante. La porosidad total es la suma de micro y macroporosidad para un suelo cercano a la capacidad de campo (el volumen de los poros varía con la humedad). Tiene de esa forma una acción directa sobre la aireación de los suelos y las posibilidades de abastecimiento de agua por las plantas. La porosidad varía con la naturaleza de los suelos y con su estado físico; disminuye, asimismo, con la degradación de la estructura.

Figura 45.

Morfología de la raíz de una planta.



Fuente: Herogra, 2020.

Los suelos arenosos están constituidos de partículas y macroporos. Las arcillas son partículas extremadamente pequeñas con presencia de microporos, aunque en mayor proporción total, lo que les permite totalizar una mayor porosidad que los suelos arenosos.

La acción capilar es mayor en micro que en macroporos, por lo tanto, las arcillas absorben y retienen mayor cantidad de humedad que las arenas, pero esa misma condición favorece un drenaje deficiente y una débil aireación. Los limos combinan las características de los dos tipos de suelos.

La porosidad varía alrededor del 50%; es más alta en suelos orgánicos y disminuye con la profundidad. Los suelos arenosos pueden tener una porosidad de 30 a 40%, mientras que los suelos arcillosos logran valores de 40 a 70%. El material poroso llega a ser más denso cuando las partículas decrecen en diámetro. Las partículas más pequeñas ocupan más espacio de la unidad de volumen que las partículas de mayor tamaño. Es la misma relación que ocurre entre partículas de arena contra partículas de limo o de arcilla. Las partículas que predominan en las arenas tienen poros

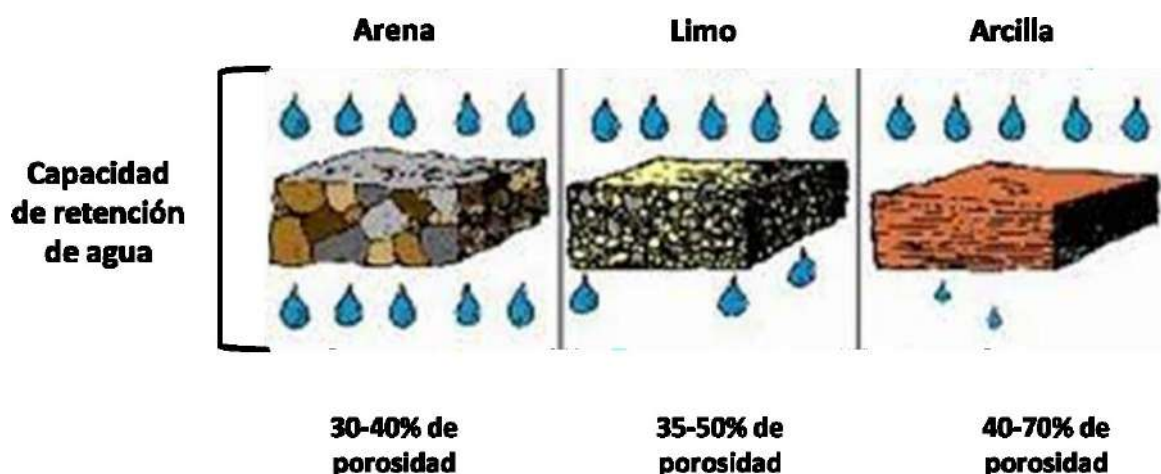
mayores que los suelos limosos. Algo ocurre cuando la densidad aumenta con la disminución del tamaño de las partículas, pues el tamaño de los poros entre las partículas decrece; esto incrementa la impedancia del movimiento del agua y la penetración de la raíz. Una situación diferente se origina cuando se considera la densidad y un suelo donde predominan las partículas de arcilla.

Es importante mencionar que la porosidad de los suelos con textura gruesa y de los suelos pesados que se encuentran bien agregados tiende a favorecer la condición de equilibrio térmico entre el suelo y la atmósfera.

La noción de porosidad es complementaria de la permeabilidad y velocidad de percolación y se vinculan en beneficio de la circulación del agua y del aire en el suelo.

Figura 46.

Porosidad de los tipos de suelo.

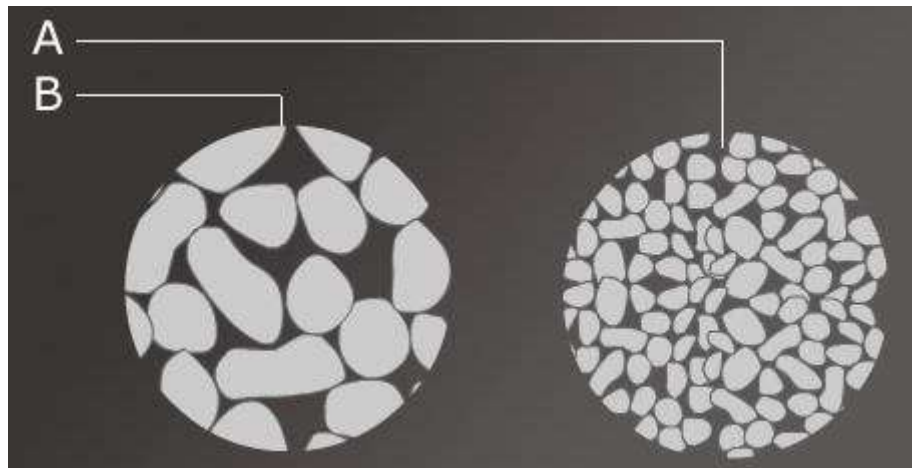


La aireación del suelo es una característica sobresaliente en suelos moderadamente gruesos y de los suelos pesados que están bien agregados, pues en ellos, existen grandes espacios que facilitan la difusión de los gases (espacio poroso). Como resultado, el CO_2 , producido en el suelo por la respiración de organismos del suelo y raíces, escapa fácilmente, y el O_2 empleado en esta función se dispersa en el suelo con la facilidad correspondiente. En suelos muy arcillosos, la deficiencia de O_2 y la toxicidad del CO_2 se convierten en factores limitativos. Por otra parte, en suelos

arenosos con ventilación favorable y temperaturas más altas, el contenido de humus es muy bajo debido a la rapidez de la oxidación.

Figura 47.

Aireación del suelo.



Fuente: Ministerio de educación de Perú, 2021.

Nota: A) suelo limoso B) suelo arenoso.

EL TRABAJO DEL SUELO es el factor más importante para mejorar la porosidad; conviene remarcar que la mayor parte de los abonamientos, actúan favorablemente sobre la porosidad por su acción sobre la estructura, la cual incide en la aireación del suelo; una buena aireación del suelo influye, considerablemente, en el crecimiento de las plantas pues promueve el crecimiento de la raíz, evita la compactación y la resistencia mecánica del suelo y estimula el intercambio de gases a la atmósfera.

Debido al intercambio más libre de gas y a la escasa capacidad de retención de humedad, los suelos gruesos se calientan de manera más uniforme que aquellos de textura fina.

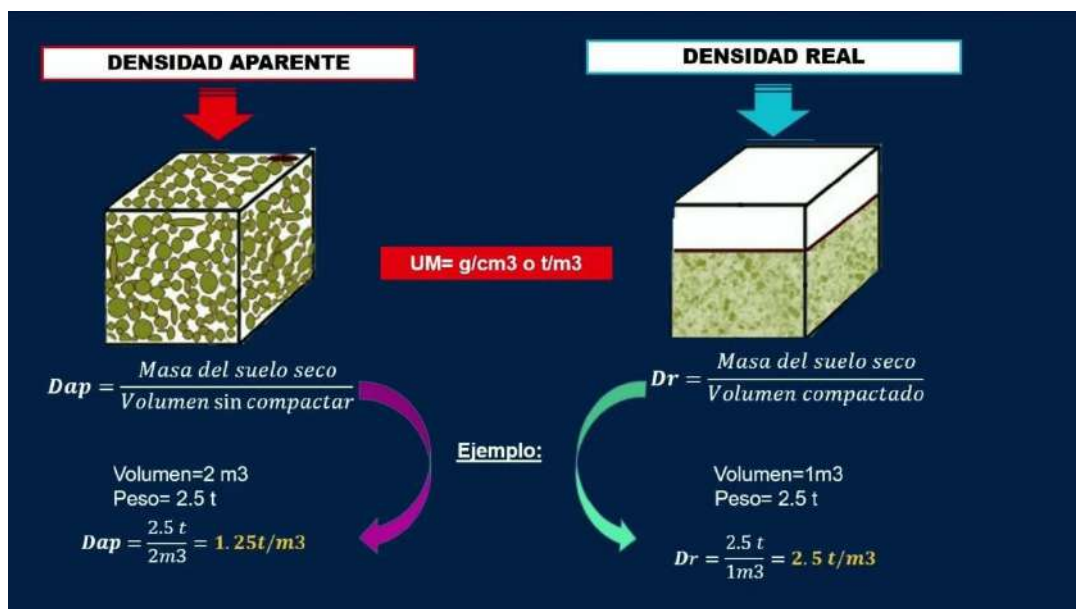
La DENSIDAD APARENTE DEL SUELO es la masa de suelo seco por unidad de volumen e incluye el peso del aire y partículas minerales y ciertos componentes orgánicos. Es una referencia para conocer la capacidad de lixiviación del suelo, la erosión potencial y la productividad agrícola. El escurrimiento y la erosión pueden ser causadas por una densidad aparente elevada, pues ésta genera un movimiento superficial del agua muy

restrictivo. Ofrece, además, un valor aproximado de la cantidad de agua susceptible de ser almacenada por el suelo.

La densidad aparente se distingue de la DENSIDAD DE PARTÍCULAS o DENSIDAD REAL en que esta última es la masa por unidad de volumen, pero sólo de la fase sólida. La densidad de real excluye espacios porosos entre partículas. La densidad aparente no considera la masa ni el volumen de fragmentos de roca.

Figura 48.

Densidad aparente y real.



Fuente: Agrocultivos TV, s.f.

El agua y el aire son componentes importantes del suelo y su dinámica es uno de los aspectos de más relevancia. Así, la densidad aparente y la porosidad afectan el estatus del aire y del agua, la penetración de la raíz y el desarrollo de las plantas. Los valores se usan para determinar si las capas del suelo son lo suficientemente compactas como para permitir la penetración de la raíz o una adecuada aireación. Las densidades que pueden ser limitativas para el crecimiento de la planta varían con el tipo de textura, tal como se indica en el siguiente cuadro:

Cuadro 11.

Principales factores que influyen en la densidad aparente.

<i>Factores que influyen sobre la densidad aparente</i>	
<i>Incrementan la densidad aparente</i>	<i>Disminuyen la densidad aparente</i>
<i>Laboreo continuo</i>	<i>Cultivos continuos</i>
<i>Quema de residuos</i>	<i>Aplicación de materia orgánica</i>
<i>Bajo aporte de materia orgánica</i>	<i>Tráfico en suelo húmedos</i>

Los suelos están constituidos de partículas sólidas y espacios porosos. Las partículas del suelo consisten en pequeños fragmentos minerales y orgánicos. Los espacios entre ellas son espacios porosos y pueden contener agua o aire. Es deseable que los suelos agrícolas tengan, por volumen, la mitad de los espacios porosos y el resto de los sólidos. El contenido de materia orgánica deberá ser del 5% o más del peso total de las partículas. El contenido de humedad varía según factores como el drenaje, la cantidad y la frecuencia de las lluvias o del riego.

FACTORES QUE AFECTAN LA DENSIDAD APARENTE:

Algunos de los Aspectos que presenta el suelo influyen la medición de la densidad aparente, por ejemplo:

- (1) **TEXTURA.** Los rangos de aceptados de densidad aparente van de 1.0-2.0 g/cm³ suelos arenosos reportan valores de 1.2-1.8; Mientras que suelos arcillosos presentan valores desde 1.0 hasta 1.6.
- (2) **ESTRUCTURA.** Arreglo de las partículas del suelo. (granular: suelo suelto y poroso).
- (3) **MATERIA ORGÁNICA.** La presencia de materia orgánica (humus) mantiene separadas las partículas del suelo.
- (4) **PROFUNDIDAD.** Como anteriormente se menciona la densidad aparente aumenta con la profundidad debido al bajo contenido de M.O. (hay menos agregación y penetración de las raíces).
- (5) **MICROORGANISMOS.** Existe una relación entre la cantidad de espacio y poroso y el desarrollo de la vida microbiano; menor cantidad de espacio poroso se traduce a la

disminución de espacio para la vida de los microorganismos del suelo debido a que se presenta mayor dificultad de movimiento microbiano así también la limitación de agua.

CÁLCULOS Y DETERMINACIONES.

Composición del aire del suelo. Un suelo bien aireado permite el crecimiento de los microorganismos en cantidades suficientes y en proporciones adecuadas para alentar tasas óptimas de procesos metabólicos esenciales de los organismos. Tiene más alta cantidad de CO₂ y O₂ que la atmósfera. Alta cantidad de vapor de agua (100% de humedad).

Cuadro 12.

Composición del aire de los suelos.

<i>Gas</i>	<i>Aire del suelo</i>	<i>Aire atmosférico</i>
<i>N</i>	79%	79%
<i>O₂</i>	20.5%	21%
<i>CO₂</i>	0.5%	0.03%

Cómo medir la densidad aparente.

Para obtener la densidad aparente es necesario seguir una serie de pasos. A a continuación se menciona.

1. Tomar muestra de suelo
2. Pesar y registrar el peso del suelo húmedo
3. Secar la muestra de suelo en estufa a 105°C por 24 horas.
4. Pesar y registrar el peso en seco.
5. Medir el volumen ocupado por el suelo.
6. Calcular la densidad aparente de la siguiente forma: Peso del suelo secado en la estufa / Volumen de suelo.

Fórmula de la densidad aparente.

$$DAP = \text{MASA DE SUELO SECO} / \text{VOLUMEN DE SUELO Y POROS}$$

Unidades gcm^{-3} o g/ml o g/cm^{-3} ó ton/m^3

Fórmula de la densidad de partículas

$$DP = \text{MASA DE PARTÍCULAS} / \text{VOLUMEN DE PARTÍCULAS}$$

Unidades g cm^{-3} o g/ml o g/cm^{-3} ó ton/m^3

Se asume que la Dp es 2.65 g/cm^3 (2.65 Ton/m^3)

Espacio poroso.

El espacio poroso es también llamado porosidad (área ocupada por aire y agua). El espacio poroso se expresa como un %.

La fórmula para su determinación depende de los valores de densidad aparente y de partículas.

Fórmula del espacio poroso.

$$\text{ESPACIO POROSO} = (1 - DAP/DP) \times 100$$

Textura, densidad aparente y porosidad. El 50% del volumen sólido del suelo se encuentra constituido por materia orgánica y minerales. La fase líquida y gaseosa del suelo (el resto del total: 50%) es variable, por lo tanto en ocasiones la podemos encontrar en valores del 40-60%.

El suelo húmedo presenta un espacio con contenido de aire del 10-15% del volumen total, mientras que el suelo seco del 20-30%.

Los valores de densidad aparente, densidad real y porosidad sirven para conocer algunas características como las siguientes: (a) detección de capas endurecidas; (b) presencia de cierto tipo de agentes cementantes minerales u orgánicos; (c) determinación y cuantificación de materiales orgánicos y cenizas volcánicas de baja densidad; (d) presencia de estructuras masivas; (e) detección de zonas compactadas que impidan el crecimiento de la raíz o la penetración del agua en el suelo; “cuando la densidad aparente del suelo aumenta se incrementa la compactación y se afectan las condiciones de retención de humedad limitando a subirse el crecimiento de las raíces” (Salamanca & Sadeghian, 2005).

Los resultados de la densidad aparente pueden ser usados para determinar si las capas de suelo son lo suficientemente compactas para permitir la penetración de la raíz o una adecuada aireación. Las densidades que pueden ser limitativas para el crecimiento de la planta varían con el tipo de textura.

El porcentaje de porosidad de un suelo es la relación entre el volumen de espacio poroso (V_{ep}) y el volumen total del suelo, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de porosidad} = \frac{V_{ep}}{V_t} \times 100$$

Si recordamos que la densidad real (D_r) es la relación entre el peso seco del suelo y el volumen de las partículas sólidas y la densidad aparente (D_{ap}) es la relación entre el peso seco del suelo y su volumen total (volumen total = volumen de las partículas + volumen del espacio poroso), entonces:

$$\% \text{ porosidad} = \left(1 - \frac{D_{ap}}{D_r}\right) \times 100$$

Por ejemplo, tenemos que el valor de la $D_{ap} = 1.25 \text{ g/cm}^3$ y el valor de la $D_r = 2.65 \text{ g/cm}^3$ y queremos calcular el porcentaje de porosidad. Al sustituir los valores en la fórmula tenemos:

$$\% \text{ porosidad} = \left(1 - \frac{1.25}{2.65}\right) \times 100 = 52.83\%$$

Con fines estrictamente teóricos podemos también calcular el valor de la D_{ap} conociendo el valor del porcentaje de porosidad y considerando como constante el valor de la densidad real (2.65 g/cm^3).

Ejemplo, sabemos que el valor del porcentaje de porosidad es de 32% y queremos calcular el valor de la D_{ap} . De la fórmula del porcentaje de porosidad arriba mencionada, despejamos:

$$D_{ap} = \left(1 - \frac{\% \text{ de porosidad}}{100}\right) \times D_r$$

Sustituyendo valores en la fórmula tenemos:

$$D_{ap} = \left(1 - \frac{32}{100}\right) \times 2.65 = 1.8 \text{ g/cm}^3$$

Al considerar que aproximadamente la mitad del espacio poroso del suelo estará ocupada por el agua (solución del suelo) y la otra mitad por los gases necesarios para la sobrevivencia de las plantas y la mayoría de los organismos del suelo, entonces dimensionamos correctamente la importancia de esta característica. A mayor porosidad, es mayor la cantidad de agua aprovechable por las plantas y mayor será la difusión del aire de la atmósfera del suelo.

Existe una relación inversamente proporcional entre la porosidad del suelo y su densidad aparente, ya que si analizamos los ejemplos anteriores veremos que un suelo con una densidad aparente de 1.25 g/cm^3 presenta un porcentaje de porosidad del 52.8%, mientras que el otro suelo posee una densidad aparente de 1.8 g/cm^3 y una porosidad del 32% tendremos como resultado que el primer suelo tendrá más capacidad de almacenamiento de agua y para el flujo de aire, mientras que el segundo tiene capacidades más limitadas.

Dos suelos con las mismas dimensiones y grosor pueden almacenar diferente cantidad de agua como resultado de su porosidad, densidad aparente, textura, estructura y contenido de materia orgánica. Un suelo con limitada capacidad de retención de agua tiene que ser regado más frecuentemente y se debe utilizar un mayor volumen de agua. Si se trata de un sistema de producción agrícola de temporal, que solo depende del agua de lluvia, las plantas que crezcan sobre este suelo no alcanzarán su máximo potencial productivo.

Figura 49.

Maíz.



Fuente: Sánchez, 2013.

El maíz es uno de los cultivos de temporal más predominantes en México.

COLOR DEL SUELO

El color del suelo es un índice de alta precisión para el estudio la pedogénesis (origen de los suelos). Es, además, una propiedad intensiva del suelo que se emplea para la descripción de horizontes y guarda relaciones con la naturaleza de este, así como con sus condiciones ecológicas.

El color es el rasgo físico más evidente de los horizontes del suelo, aunque para poder establecer valores cuantitativos se requiere utilizar un SISTEMA CROMÁTICO, que en este caso es el SISTEMA DE MUNSELL, el cual describe tres variables:

1. TONO, MATIZ O TINTE (HUE). Es el color de reflexión que toma las variantes de color del arcoíris, desde el amarillo, pasando por el rojo, púrpura, azul hasta el verde. Puede tomar valores de 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 y 12.5. El matiz es la medida de la composición cromática de luz que es apreciada por el ojo humano. Se relaciona con la longitud de onda dominante de la luz. Se consideran en cinco matices principales: rojo (R), amarillo (Y), verde (G), azul (B) y morado (P), y algunos matices intermedios (YR, GY, BG, PB y RP).

2. LUMINOSIDAD, VALOR, BRILLO O PUREZA (VALUE). Se refiere a la claridad u oscuridad del color, va del blanco al negro (toma valores desde 0, negro; hasta 10, blanco). El **valor** es el grado de luminosidad u oscuridad de un color en relación con una escala gris neutra (acromática). Es la relativa iluminación o tenuidad del color y es una función (raíz cuadrada) de la cantidad total de luz. Los valores se extienden desde el negro puro (0/) hasta el blanco puro (10/), considerando al gris como intermedio (5/). Es una medida de la cantidad de luz que aprecia el ojo humano en condiciones de luminosidad estándar.

3. SATURACIÓN O INTENSIDAD (CHROMA). Varía del gris (casi sin color) al color puro. (tiene valores del 0 hasta 10). La **intensidad** es la pureza relativa de la longitud de onda que domina o la fuerza de color espectral e indica el grado de saturación de gris neutro en el color espectral. Aumenta conforme disminuye el gris. La escala se extiende de /0 para colores neutros a /8 en suelo de la mayor expresión espectral.

Figura 50.

Tabla de Munsell.



Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2017.

El procedimiento para determinar los valores del color del suelo es muy simple y comienza por tomar de la muestra dos pequeños terrones. El primero de ellos se moja con agua y el segundo se procesa en seco y, buscando tener una buena exposición a

la luz natural, se comparan con los diferentes valores de HUE DE LA CARTA DE COLORES DE MUNSELL. Cada página de esta carta representa un valor de esta variable de tono. En el caso de los suelos de zonas semiáridas y templadas con lluvias en verano, los colores se localizan en la página 5YR, que significa que nos ubicamos en un intervalo del espectro entre el amarillo (Yellow) y el rojo (Red); aunque más cercano del amarillo que del rojo. La muestra del ejemplo presentó un valor de luminosidad (VALUE) intermedio de 4.0 y un valor de saturación (CHROMA) de 2.0. El resultado de la combinación de estas tres variables nos brinda un color gris rojizo oscuro con una fórmula cromática, 5YR 4/2.

La determinación de este puede ser un indicador del origen geográfico de los suelos, así, en zonas áridas, pobres en humus, son de tonalidades claras, mientras que en el trópico son de color rojizo, en tanto que en las áreas templadas predominan los colores pardos; se sabe que los suelos humíferos son de color negro o pardo oscuro, así como los suelos hidromorfos presentan tonos grises, azules o verdes. Es una de las características más obvias del suelo y aunque no tiene un efecto directo sobre el crecimiento de las plantas, indirectamente afecta la temperatura y la humedad del terreno (a través de su efecto sobre la radiación solar afecta la cantidad de energía calorífica del suelo y la evaporación). Así, un suelo oscuro, en idénticas condiciones, se secará más rápidamente que claro. Una cubierta vegetal o de residuos reducirá a la eliminación de esta diferencia.

La fórmula cromática del suelo tiene que relacionarse con sus características físicas, químicas y biológicas para que tenga una utilidad práctica, ya que por sí sola, solo tiene un valor descriptivo. Los suelos de color blanco por lo general se originan de rocas calizas con altos contenidos de carbonatos de Ca y Mg, estos son suelos con un pH alcalino y de textura de media a gruesa. En México se les conoce como suelos con “TEPETATE” o “TEPETATOSOS” y muy delgados, se presentan en ambientes de clima seco con escasa cobertura vegetal y nula acumulación de materia orgánica donde habitan diversas especies de nopales, magueyes, y otras cactáceas, algunos portainjertos de vid o parra necesitan de estos suelos, el guayabo produce fruta de alta calidad en estas condiciones, sin embargo no se recomienda el establecimiento de cítricos, ni de la mayoría de los cultivos pues este tipo de suelo tiende a tener severas deficiencias nutrimentales.

Figura 51.

Tepetate.



Fuente: Vázquez, 2015.

El color anaranjado y rojo de ciertos suelos se debe a la presencia de elementos metálicos oxidables naturalmente, principalmente la abundancia de minerales como la hematita constituida de abundante Fe. Son suelos de textura gruesa con un drenaje rápido y climas secos.

Figura 52.

Suelo de misiones, Venezuela.



Fuente: Ministerio de turismo, 2020.

Se dice, frecuentemente, que los suelos de color negro contienen una importante cantidad de materia orgánica. En general esto no es verdad, ya que existen arcillas que poseen ese color, como es el caso de la Montmorillonita, que es una arcilla abundante en suelos de importantes regiones agrícolas de nuestro país.

Los suelos de montmorillonita son suelos aluviales de grandes valles donde, a través del tiempo, se han depositado minerales de arcilla provenientes de zonas boscosas de montaña. Dentro de la clasificación de suelos se les denomina Vertisoles pélicos, o suelos Invertidos; este es un tipo de arcilla que cuando está húmeda se expande y en seco se contrae formando profundas grietas a través del perfil. También exhiben un color negro, suelos con un alto contenido de Manganeseo (pirolusita [Mn^{4+}O_2]) o de NaHCO_3 (bicarbonato de sodio).

No obstante, existen arcillas de otros colores, además del negro. Las puede haber blancas, grises, amarillas o rojas.

Figura 53.

Arcillas.



Fuente: Nuñez, s.f.

Los suelos que exhiben un color café marrón oscuro, en general, contienen un porcentaje alto de materia orgánica en fases terminales de descomposición. Son ricos en humus y con una actividad microbiana intensa; estos suelos presentan una alta capacidad de retención de humedad, muy buena estructuración, fertilidad y productividad.

Los suelos amarillos deben su color a la presencia de minerales como goethita y limonita. Se presentan en climas secos y templados con limitada precipitación pluvial. En regiones cercanas a los litorales pueden presentarse condiciones de manto freático alto, lo que significa que el nivel del agua subterránea se encuentra solo a pocos centímetros del ras del suelo. Estos suelos pasan largas temporadas en ausencia de O_2 , en condiciones anaeróbicas y en consecuencia toman un color gris a blanquizco.

El color en varios tipos de suelo es debido al contenido de materia orgánica y al estado químico de varios de los componentes minerales (óxidos, sulfuros, carbonatos y bicarbonatos). Otros minerales (cuarzo, granito, etc.) pueden influir en el color del suelo. El color del subsuelo puede revelar ciertas relaciones con la edad, con el drenaje del suelo y con la aireación o anaerobiosis del suelo. Los compuestos de

hierro pueden existir como formas oxidadas (rojas); cuando los óxidos se hidratan adquieren un color amarillo y cuando están en condiciones reducidas, son grises o verdosos. Sirve al agricultor y al especialista para poder conocer algunas propiedades. Así, el color del suelo da información de la materia orgánica, drenaje del terreno, aireación, actividad biótica y fertilidad del suelo, cantidad y estado algunos minerales del suelo.

Figura 54.

Coloraciones del suelo.

color	descripción
Gris pizarra	Acumulación de materia orgánica (humus) descompuesta
Amarillo naranja	Arcillas ricas en óxido de silicio
Rojo ladrillo	Arcillas ricas en óxido de hierro
Anaranjado	Arcillas ricas en óxido de aluminio y óxido de hierro
Amarillo claro	Arena, pobre en nutrientes
Gris pardo claro	Mezcla de grava y arena
Gris ratón	Mezcla de arena, arcilla y materia orgánica sin descomponer
Terracota	Mezcla de arena, arcilla y materia orgánica descompuestas
Pardo oscuro	Arcilla rica en nutrientes
Verde oscuro	abundante vegetación y materia orgánica

Fuente: Blogg, 2012.

LOS ELEMENTOS QUE PERMITEN DESCRIBIR EL COLOR DEL SUELO SON: (1) NOMBRE, (2) NOTACIÓN MUNSELL, (3) CONTENIDO DE HUMEDAD Y (4) ESTADO FÍSICO. El valor del color de la mayor parte de los materiales del suelo disminuye después de perder humedad (SE DETERMINA EN SECO Y EN HÚMEDO). El color en seco se hace secando la muestra al aire. El color en húmedo es determinado con una cantidad moderada de humedad. Los suelos húmedos o mojados presentan un color más oscuro que los suelos secos (los componentes sólidos del suelo tienen propiedades refractivas muy disímiles a las del aire, por lo que la luz que cae sobre un suelo seco es casi totalmente reflejada). Esto genera los colores más oscuros de los suelos húmedos o mojados.

LA NOTACIÓN ES OBTENIDA POR COMPARACIÓN CON LA CARTA DE COLORES DE MUNSELL, LA CUAL CONTIENEN, EN SU VERSIÓN ESTÁNDAR, AL MENOS, 250 COLORES, ORGANIZADOS EN PÁGINAS DE ACUERDO CON LOS MATICES PRINCIPALES DEL SUELO.

Diferencia de color en los horizontes del suelo.

La coloración de un perfil de suelo tiende a diferir; “las diferencias de tinte permiten a menudo distinguir los horizontes” (Rucks, *et al.*, 2004).

En horizontes superficiales el color oscuro está correlacionado con el contenido de MO y la capacidad de suministro de nutrimentos para la planta.

El color del suelo es un indicador del régimen de agua y aire en un suelo. Los suelos con pobreza de oxígeno (suelo reducido) tienen compuesto de Fe y Mn solubles. Los suelos oxidados tienen óxidos de Fe y Mn. Además, esta coloración relaciona el suelo con el tipo de minerales (EL HUMUS ES NEGRO, LOS ÓXIDOS DE FIERRO ROJOS, LOS COMPUESTOS DE FIERRO REDUCIDO SON VERDE-AZULOSOS, EL CUARZO DA COLORES LUMINOSOS, LOS FELDESPATOS SON ROJOS, ETC.) y al régimen de humedad.

Es importante mencionar qué debe ser reportado si el suelo se encontraba húmedo o seco al momento de determinar su color.

Cuadro 13.

Color del suelo y características del drenaje edáfico.

<i>Drenaje del suelo y color dominante</i>	
<i>Condición de drenaje</i>	<i>Color subsuperficial</i>
<i>Inundación frecuente y baja aireación</i>	<i>Gris opaco</i>
<i>Buen drenaje</i>	<i>Amarillo, pardo rojizo, rojo o negro (suelos forestales)</i>
<i>Inundación temporal</i>	<i>Moteado grisáceo</i>
<i>Drenaje moderado</i>	<i>Amarillo brillante</i>
<i>Drenaje imperfecto</i>	<i>Amarillo pálido</i>
<i>Drenaje variable</i>	<i>Oscuro</i>

Cuadro 14.

El color del suelo y su relación con otras propiedades de los suelos.

<i>El color del suelo y su relación con otras propiedades edáficas</i>			
<i>Factores del suelo</i>	<i>Nivel</i>		
	<i>Alto</i>	<i>Medio</i>	<i>Bajo</i>
<i>Intensidad del color</i>	<i>Oscuro</i>	<i>Moderadamente</i>	<i>Claro</i>
	<i>o</i>	<i>oscuro</i>	<i>o</i>
<i>Contenido de M.O.</i>	<i>Alto</i>	<i>Medio</i>	<i>Bajo</i>
<i>Posibilidad de erosión</i>	<i>Baja</i>	<i>Media</i>	<i>Alta</i>
<i>Aireación</i>	<i>Alta</i>	<i>Media</i>	<i>Baja</i>
<i>Nitrógeno disponible</i>	<i>Alto</i>	<i>Medio</i>	<i>Bajo</i>
<i>Fertilidad</i>	<i>Alta</i>	<i>Media</i>	<i>Baja</i>

Cuadro 15.

Principales elementos cromógenos de los suelos orgánicos y minerales.

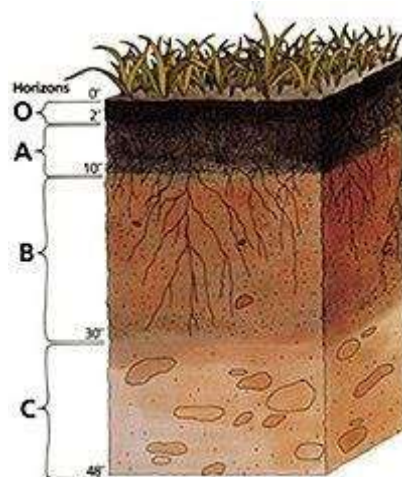
<i>Color</i>	<i>Elemento cromógeno</i>
<i>Negro</i>	<i>Humus muy polimerizado, carbonato sódico, magnetita o ilmenita, pirolusita, sulfuro ferroso, pirita, grafito, cierto tipo de ceniza volcánica</i>
<i>Gris</i>	<i>Humus, compuestos ferrosos, eliminación del óxido férrico por eluviación en suelos ácidos. Minerales ricos en sílice como cuarzo, feldespato y caolinita</i>
<i>Gris-azul</i>	<i>Mal drenaje del suelo, óxidos e hidróxidos de cobre. Puede ser la actividad de raíces de plantas en áreas encharcadas.</i>
<i>Gris oscuro</i>	<i>Glauconita</i>
<i>Rojo</i>	<i>Hematita y goethita, complejo ferrisilícico en zonas tropicales. Muy común en climas cálidos con estaciones de intensa y larga sequía. Indica un buen drenaje del suelo que favorece la oxidación.</i>
<i>Rojo oscuro</i>	<i>Ferrihidrita, margherita, ferroxihita</i>
<i>Pardo</i>	<i>Complejo Fe-Arcilla-Humus + óxidos de hierro en el trópico</i>
<i>Amarillo</i>	<i>Goethita, limonita, Sesquióxidos de aluminio, jarosita, schwertmannita.</i>
<i>Amarillo-rojizo</i>	<i>Lepidocrita, lepidocrocita o pyrrhosiderita, akaganeita</i>
<i>Blanco*</i>	<i>Sílice, calcita, dolomita, arcilla, yeso, cloruros. En horizontes eluviales, se debe al lavado de las arenas (cuarzo) en zonas frías y muy húmedas.</i>
<i>Amarillo- gris</i>	<i>Hidróxidos férricos $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ + Humus + Elementos blancos</i>
<i>Naranja claro</i>	<i>Hematita + Elementos blancos</i>
<i>Manchado</i>	<i>Acumulación de CaCO_3, MO o hierro oxidado (Fe_2O_3)</i>
<i>Azul-olivo</i>	<i>Largos períodos de inundación y poca aireación. Calcopirita, hidróxido de cobre, hierro reducido en vivianita de color azul, o nontronita, clorita, glaucomita verde.</i>
<i>Veteado</i>	<i>Infiltraciones de coloides orgánicos y sesquióxidos de hierro (Fe_2O_3)</i>
<i>Matizado</i>	<i>Infiltraciones (con roca completamente intemperizada)</i>

PROFUNDIDAD DEL SUELO

Es el grosor del perfil con material edáfico propicio para el crecimiento de las raíces de las plantas y de los microorganismos de la rizosfera. Algunos suelos solo poseen algunos centímetros de horizonte A (capa arable), y son llamados suelos someros o delgados, mientras que otros tienen los horizontes A y B bien desarrollados y diferenciados, por lo que llegan a tener algunos metros de profundidad. Esta característica determina la superficie agrícola a establecer.

Figura 55.

Horizontes del suelo.



Fuente: Glabiseu, 2009.

Los árboles frutales requieren de más de dos metros de profundidad, mientras que el maíz o el frijol con 20 cm de grosor es suficiente, aunque si son establecidos en suelos profundos su productividad sería, en teoría, mayor.

Cuando estos suelos no están intervenidos por el ser humano, presentan una exuberante vegetación de selva, pero cuando se elimina la cobertura vegetal y se aprovecha agrícolamente, la roca madre no tarda en aflorar, y en pocos años pasarán a ser suelos inutilizables. Esto representa un reto para los especialistas de la llamada Agricultura de Zonas Tropicales. Hemos de precisar que los suelos someros no son

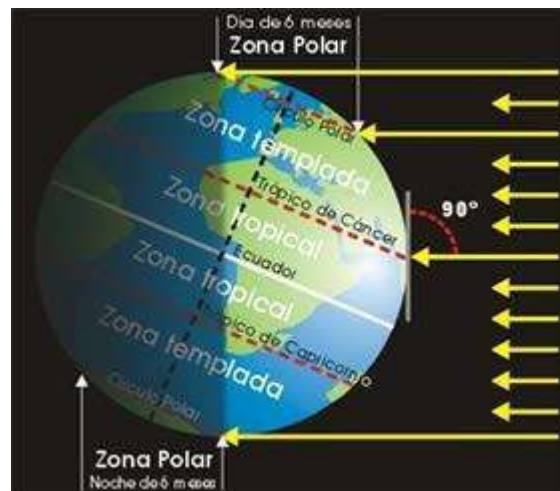
exclusivos de las regiones cálidas, también se pueden presentar en cualquier condición de clima.

TEMPERATURA DEL SUELO

El suelo recibe la radiación solar y se calienta. Su temperatura depende de cómo llegue esa radiación a la superficie (reflexión en las capas de la atmósfera, absorción atmosférica, humedad relativa, transparencia, nubosidad, lluvia, viento, topografía, cobertura vegetal, presencia de nieve, etc.) y de cómo el suelo la asimile (humedad, color, calor específico, conductividad, etc.). Otro factor básico es la orientación respecto a la topografía, las zonas orientadas al sur, en el hemisferio norte, reciben los rayos solares con más perpendicularidad y más intensidad; sobre todo si la pendiente es la adecuada a la latitud. Las vertientes de orientación norte reciben menor insolación, que incluso llega a ser nula en valles muy abruptos y cerrados.

Figura 56.

Radiación solar.



Fuente: Sebastián, 2018.

Los principales parámetros que definen el comportamiento térmico de un suelo son su calor específico y su conductividad térmica, pero para que se produzca un calentamiento de los diversos horizontes edáficos, es necesario que la radiación solar llegue hasta la superficie y penetre en ella. La temperatura del suelo está directamente relacionada con la del aire atmosférico de las capas próximas al suelo. La temperatura del suelo y la del aire, están sometidas a cambios diarios y estacionales que se van amortiguando hacia los horizontes profundos. La distribución de la temperatura con la

profundidad constituye el perfil térmico. Una parte de la radiación solar es reflejada por la superficie del suelo y el resto es absorbido y depende del color del horizonte superficial (cuanto más oscuro mayor es la absorción, pero también lo es la emisión nocturna). En este sentido el contenido en materia orgánica resulta decisivo, pues hace decrecer el brillo. En los suelos blancos, el reflejo puede ser tan intenso que llega a quemar los frutos cercanos al suelo por la adición del calor incidente al reflejado por el suelo. Un suelo muy rico en MO puede absorber hasta 80% de la radiación recibida, que decrece hasta el 30% en suelos blanquecinos.

La radiación solar es una medida de la que se dispone de muy pocos datos. Se acepta que 50 cm de profundidad es igual a la del aire atmosférico más 1°C.; mientras que “la cantidad de calor solar recibida por el suelo se expresa en calorías por centímetro cuadrado” (Rucks, *et al.*, 2004).

Cuando en superficie aparecen horizontes con colores de alta pureza la absorción variará con el matiz. Las radiaciones más caloríficas son las correspondientes al infrarrojo, mientras que menos lo son las ultravioleta, aunque éstas sean más energéticas por su mayor frecuencia. La radiación visible más calórica será la roja que es la que absorben los objetos de color verde, de ahí la gran absorción ejercida por la vegetación. La menos calórica será la violeta que es la absorbida por los objetos amarillos, y por esta razón los suelos de este color absorben menos que los rojos, que al hacerlo en el verde están en una posición intermedia.

Una vez que la radiación llega al suelo, el calentamiento o el enfriamiento del mismo será más rápido cuanto menor sea su calor específico y éste será función del material que lo forma y sobre todo del nivel de humedad, pues como promedio los constituyentes minerales tienen un calor específico que va de 0.1 en arenas a 0.2 en arcillas y en el CaCO_3 , mientras que los compuestos orgánicos alcanzan valores cercanos a 0.5, todos ellos muy por debajo del valor de uno que posee el agua.

Los suelos húmedos se calentarán más lentamente que los secos, pero conservarán más el calor, por eso en época de heladas no conviene labrar el suelo porque cuanto más suelto y mullido se halle mayor será su pérdida de calor al amanecer y más probabilidades tendrá de helarse, con el consiguiente daño a las plantas; es más útil que se mantenga compacto y húmedo que mullido y seco. La nieve también posee un efecto protector del frío, por razones que ya indicadas.

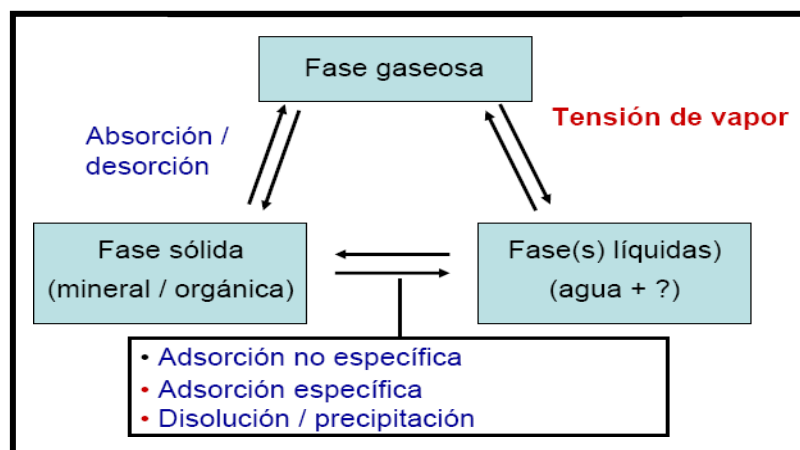
Habrá que considerar el reparto de calor en el perfil (conductividad térmica) y que en sólidos del suelo es tres veces mayor que en el agua y 110 veces mayor que en el aire. Así, los suelos húmedos, en los que hay desplazamiento del aire por agua, conducen mejor el calor que los secos. Si la humedad aumenta mucho, los sólidos pueden perder el contacto entre sí y disminuir la conductividad térmica, que tendrá un máximo para un determinado contenido de humedad, rebasado el cual bajar .

La temperatura del suelo presenta una considerable importancia agronómica, ya que determina el momento de la germinación, la velocidad de enraizamiento y la longitud del ciclo vegetativo, que en muchas ocasiones se expresa por el número total de calorías necesarias. Tamb n determina la actividad de los microorganismos, gobernando procesos tan importantes como la humificación, la mineralización o la fijación de n tr geno atmosférico. Además, regula la evaporación del agua y el aprovechamiento de la lluvia; en climas con déficit de agua la orientación de los cultivos puede afectar su rendimiento.

Figura 57.

Principales reacciones fisicoquímicas del suelo.

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO



Coloides del suelo. Este término hace referencia a la existencia de un sólido en un líquido, es considerado la parte más activa del suelo. El tamaño de estos varía entre 1 m o 0.001mm.

Existen dos tipos de coloides: (1) minerales [arcillas] y (2) orgánicos [humus].

Propiedades de los sólidos minerales: (1) SUPERFICIE ESPECÍFICA. (2) CARGA FIJA Y/O VARIABLE. (3) AGUA DE HIDRATACIÓN.

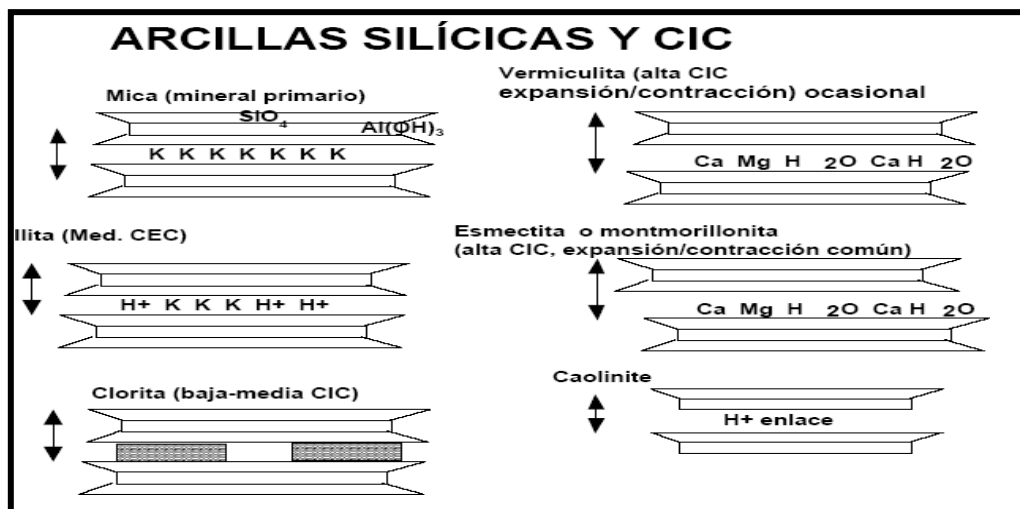
Cuadro 16.

Principales minerales formadores de arcillas.

Minerales de la arcilla		
Características generales	Tipos	Localización
1. Estructura cristalina	Caolinita.	Zonas tropicales y húmedas
2. Formas Laminadas	Montrillonita (arcilla de expansión-contracción).	Zona semiárida a semihúmeda templada
3. Carga electronegativa	Hidromicas (ilita).	Zonas frías.
4. Área de exposición externa y abundante	Arcillas óxidohidratadas	Zonas de trópico húmedo

Figura 58.

Propiedades de las principales arcillas silíceas del suelo.



Coloides orgánicos del suelo (humus).

Los coloides orgánicos presentan una serie de características que los hacen distinguirse, por ejemplo:

- (1). Es un anión cargado negativamente.
- (2). Se encuentra rodeado por una diversidad de cationes adsorbidos.
- (3). Son compuestos de C, H y O.

- (4). Cuando una arcilla silícica contiene Al, Si y O.
- (5). Su capacidad de intercambio catiónico (CIC) es más alta.
- (6). No es tan estable como la arcilla (se forman y destruyen).

Composición de un sistema arcilloso.

Entre las propiedades que lo distinguen se encuentra.

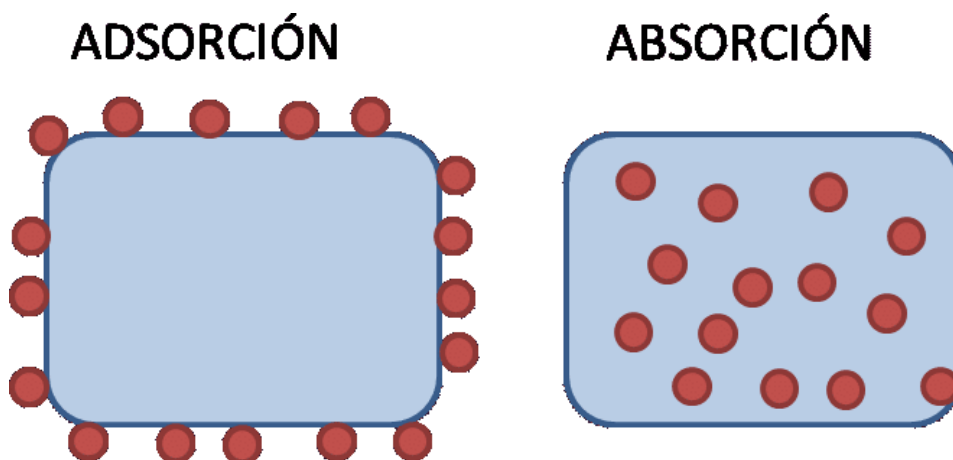
- (1) Presencia de Micela (conjunto de moléculas que constituye una de las fases de los coloides) insoluble.
- (2) Sistema con cargas negativas.
- (3) Intercambio de cationes (sustitución de un catión adsorbido por otro catión).

Floculación/dispersión. La dispersión es facilitada cuando la concentración de la solución disminuye y los iones divalentes (Ca^{2+}) son sustituidos por iones monovalentes (Na^+). Depende del tipo de arcilla (carga y distribución de carga en la superficie). Los coloides en suspensión pueden servir de vectores para transferir contaminantes poco móviles pero adsorbidos. La dispersión de coloides puede ocasionar fuertes reducciones de la permeabilidad del medio.

¿Qué es la adsorción? Es la unión a la superficie, pero sin incorporación interna.
«Proceso resultante de una acumulación neta de una sustancia en la interfase entre dos fases contiguas.»

Figura 59.

Diferencias entre adsorción y absorción.



CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC).

Se define el CAMBIO IÓNICO a los procesos reversibles por los cuales las partículas sólidas del suelo adsorben iones de la fase acuosa liberando al mismo tiempo otros iones en cantidades equivalentes, estableciéndose el equilibrio entre ambas fases, la determinación de este dato es importante ya que “estima los sitios de carga de las arcillas, tanto las cargas permanentes, como las cargas dependientes de pH. Estos sitios de intercambio retienen por fuerzas electrostáticas a los cationes” (Pérez, y otros, 2017).

Puede haber un INTERCAMBIO DE CATIONES E INTERCAMBIO DE ANIONES. Es un proceso dinámico que se desarrolla en la superficie de las partículas. Como los iones adsorbidos quedan en posición asimilable forman la reserva de nutrientes para las plantas.

Las causas que originan el intercambio iónico son los desequilibrios eléctricos de las partículas del suelo. Para neutralizar las cargas se adsorben iones, que se unen a la superficie de las partículas. Quedan débilmente retenidos sobre las partículas del suelo y se pueden intercambiar con la solución del suelo. Cuanto más superficie tenga el material y más desequilibrada se encuentre, más iones se fijarán. En el suelo son varios los materiales que pueden cambiar cationes. Los principales son las arcillas y la materia orgánica (los dos materiales presentan propiedades coloidales). Autores como (Yong, *et al.*, 1990) consideran a este como “un indicador indirecto de la capacidad amortiguadora de los suelos y que es función de la cantidad y tipo de arcilla”

Figura 60.

Capacidad de retención de cationes de los coloides del suelo.



Factores que influyen en el intercambio de cationes.

FUERZA DE ABSORCIÓN: $\text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ = \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{H}^+$ (FUERTE RETENCIÓN $\rightarrow$ FÁCIL SUSTITUCIÓN).

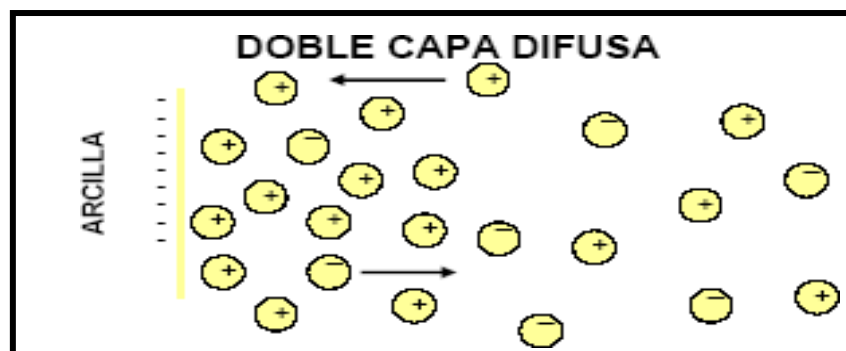
Principales cationes del suelo bajo condiciones naturales.

(1) ÁREAS HÚMEDAS: H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ; (2) ZONAS ÁRIDAS: Ca^{2+} , Mg^{3+} , Na^+ , K^+ , H^+ y (3) ZONAS ÁRIDAS CON MAL DRENAJE: Na^+ , Ca^{2+} .

Teorías sobre la CIC: (A) RED CRISTALINA que considera las partículas de los minerales como sólidos iónicos; los iones de los bordes están débilmente retenidos por lo que pueden abandonar la estructura y pueden cambiarse con los de la solución del suelo. (B) DOBLE CAPA ELÉCTRICA O DIFUSA que toma en cuenta el contacto entre el sólido y la fase líquida como un condensador plano; entre el metal (el sólido) y el electrolito (la disolución) existe una diferencia de potencial que atrae a los iones de la solución del suelo; se forma una doble capa eléctrica formada por los iones del sólido y los atraídos en la solución. (C) MEMBRANA SEMIPERMEABLE representada por la interfase sólido-líquido que deja pasar los iones de la solución y a los de la superficie de las partículas, pero no a los del interior de los materiales.

Figura 61.

Estructura hipotética de la doble capa difusa.



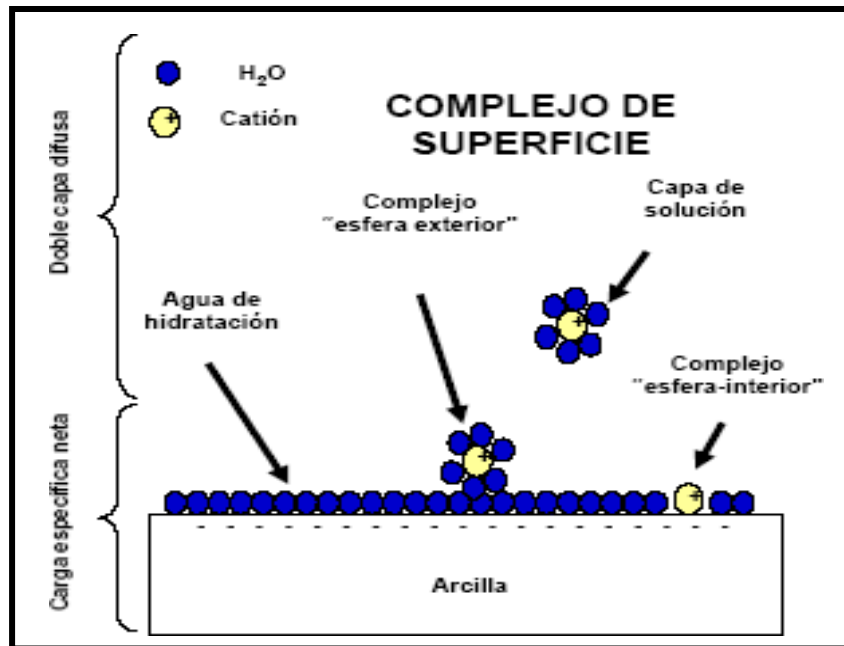
Las causas de la CIC de las arcillas son:

(A) SUSTITUCIONES ATÓMICAS dentro de la red; (B) EXISTENCIA DE BORDES (superficies descompensadas); (C) DISOCIACIÓN DE LOS OH de las capas basales; (D) ENLACES DE VAN DER WAALS.

En las arcillas, además de en su superficie, los iones pueden entrar entre las capas. Las causas de la capacidad de cambio de la M.O. son: disociación de los OH^- y de los COOH^- .

Figura 62.

Complejo de superficie electrostática de las arcillas.



Los cationes (elementos con carga positiva) que frecuentemente ocupan las posiciones de cambio en los suelos son: H^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , NH_4^+ , Mn^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} . En los suelo ácidos predominan H^+ y Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} ; en los suelos alcalinos predominan las bases Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , y en los neutros el Ca^{2+} ; otros cationes como el plomo (Pb^{+2}), zinc (Zn^{+3}), cobre (Cu^{+1}), se encuentran en cantidades tan bajas que no son considerados significativos en la determinación de la CIC, aún y cuando sean de importancia en la nutrición vegetal.

Las partículas de arcilla y el humus son considerados los coloides del suelo, o partículas sólidas (el primero de origen mineral o inorgánico y el segundo de naturaleza orgánica) que presentan, sobre su superficie, cargas eléctricas negativas, por lo que poseen actividad eléctrica. Estos atraen a compuestos o iones con carga positiva (cationes) por fuerzas electrostáticas a las superficies de la arcilla y del humus por un fenómeno conocido como adsorción. Varios de estos cationes son importantes en la dinámica del suelo agrícola, como son: H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ . Este fenómeno

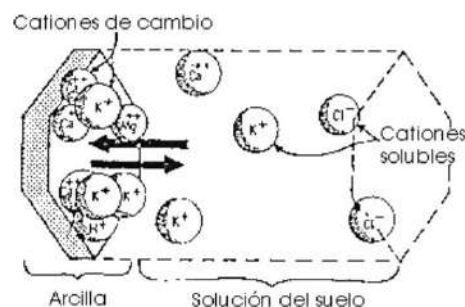
se da por adsorción, el cual es el proceso en el que los átomos o moléculas de una sustancia son retenidas en la superficie de otra sustancia.

INTERCAMBIO DE CATIONES. Hasta este punto es necesario tener claro que en el suelo existe dos clases de cationes: (1) LOS CATIONES INTERCAMBIABLES DEL COMPLEJO DE ADSORCIÓN y (2) LOS CATIONES APROVECHABLES DE LA SOLUCIÓN DEL SUELO. También es importante insistir que los cationes intercambiables del complejo de adsorción no pueden ser “ARRANCADOS” por las raíces de las plantas, pero éstas si pueden absorber los cationes aprovechables de la solución del suelo sin gasto de energía.

CATIONES LIBRES O APROVECHABLES. Los cationes aprovechables o cationes libres se encuentran asociados a las moléculas de agua del suelo, formando la solución del suelo, por lo que se conocen también con el nombre de cationes de la solución del suelo. Estos cationes están disponibles para su absorción por las raíces absorbentes de las plantas. Las raíces de las plantas absorben los nutrientes, que necesitan para su crecimiento y desarrollo, junto con el agua por flujo de masas, y de esta manera no gastan energía.

Figura 63.

Cationes del suelo y de la solución del suelo.



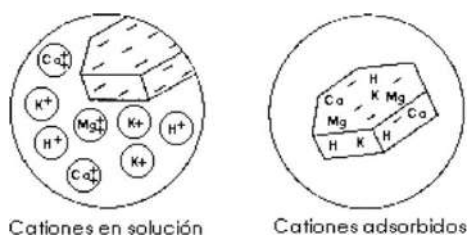
El COMPLEJO DE ADSORCIÓN del suelo está compuesto por las partículas de arcilla y por el humus (material amorfo que proviene de la descomposición de la materia orgánica) y sus cationes adsorbidos. Un suelo con un alto contenido de arcilla y de humus ostentará un mayor complejo de adsorción que un suelo arenoso y desprovisto de humus. A los cationes del complejo de adsorción del suelo se les denomina, CATIONES INTERCAMBIABLES. Los cationes intercambiables están “PEGADOS” a la superficie de las arcillas

y del humus con tal fuerza que no pueden ser absorbidos por las raíces de las plantas, y solo podrán ser liberados por efecto de un intercambio por cationes que se encuentran en la solución del suelo.

Existe un balance entre la cantidad de cationes intercambiables y los cationes aprovechables, y cuando se rompe ese balance, se produce un INTERCAMBIO DE CATIONES entre el complejo de adsorción y la solución del suelo, y viceversa. La dirección hacia donde se mueven los cationes depende de un gradiente que va de mayor concentración a menor concentración. Esto significa que, si adicionamos cationes a la solución del suelo con la fertilización, los cationes tenderán a moverse al complejo de adsorción hasta cubrir las cargas de la superficie de la arcilla y del humus, es decir, llenarán el complejo de adsorción, y los cationes que no alcancen carga superficial, se quedarán asociados al agua del suelo. Por otra parte, si los cationes aprovechables son absorbidos por las raíces de las plantas, o se pierden por lixiviación, la solución del suelo recibirá cationes del complejo de adsorción por intercambio, y pasarán de ser intercambiables a aprovechables. Aún y cuando el complejo de adsorción se encuentre saturado y la solución del suelo sea rica en cationes aprovechables; los cationes tienden a intercambiarse, siempre y cuando se respeten las equivalencias de masa y de valencia.

Figura 64.

Cationes adsorbidos y en solución.



Fuente: Dorronsoro, s.f.

Los iones son átomos o moléculas con carga eléctrica: los iones con carga positiva son los cationes y los iones con carga negativa son los aniones. Si las cargas eléctricas de signo opuesto se atraen, entonces, la superficie de las arcillas y del humus adsorberán a los cationes.

EQUIVALENTES (Eq) y MILIEQUIVALENTES (meq). Un catión de hidrógeno que se encuentra en el complejo de adsorción puede intercambiarse por otro catión hidrógeno, o por otro catión disponible en la solución del suelo. No obstante, las masas de esos cationes son diferentes, así como también los sitios de carga que pueden ocupar. La definición de las equivalencias de los diferentes cationes del suelo se hace a partir de la siguiente fórmula:

$$1 \text{ Eq} = \frac{\text{Masa atómica}}{\text{Valencia}}$$

Así tenemos que (ver cuadro 17):

Cuadro 17.

Equivalencias de cationes.

<i>1 Eq de hidrógeno</i>	<i>1 gramo de H⁺</i>
<i>1 Eq de calcio</i>	20 gramos de Ca ²⁺
<i>1 Eq de magnesio</i>	12 gramos de Mg ²⁺
<i>1 Eq de sodio</i>	23 gramos de Na ⁺
<i>1 Eq de potasio</i>	39 gramos de K ⁺

Siempre 1 Equivalente de cualquier catión se intercambiará por 1 Equivalente de otro catión, pero las masas serán diferentes. Ejemplo: 1 gramo de hidrógeno es equivalente a 20 g de calcio, 12 gramos de magnesio, 23 gramos de sodio o 39 gramos de potasio.

Como la medida del Equivalente (Eq) resulta muy grande para cuantificar las cantidades de cationes en el intercambio catiónico, se ha convenido en generar otra unidad, el miliequivalente (meq), que es la milésima parte de un Equivalente:

$$1 \text{ meq} = \frac{1 \text{ Eq}}{1000}$$

Ahora tenemos (ver cuadro 18):

Cuadro 18.

Miliequivalencias de cationes.

<i>1 meq de hidrógeno</i>	<i>0.001 g (1 mg) de H⁺</i>
<i>1 meq de calcio</i>	0.020 g (20 mg) de Ca ⁺⁺
<i>1 meq de magnesio</i>	0.012 g (12 mg) de Mg ⁺⁺
<i>1 meq de sodio</i>	0.023 g (23 mg) de Na ⁺
<i>1 meq de potasio</i>	0.039 g (39 mg) de K ⁺

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO DE CATIONES (CIC)

La CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC) DE UN SUELO ES EL NÚMERO DE MILIEQUIVALENTES (MEQ) DE CATIONES INTERCAMBIABLES POR CADA 100 GRAMOS DE SUELO SECO. Entonces la CIC está determinada por el tamaño del complejo de adsorción, y a su vez, por su contenido de arcillas y de humus. Esta característica del suelo se puede ver como la CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE CATIONES, aunque puede haber casos en los que un suelo tenga un valor alto de CIC, pero los cationes que contiene no son útiles para la nutrición de las plantas. En todo caso, un suelo con alta CIC es mejor que uno con un valor bajo de CIC. Como resultaría natural, los suelos arenosos con bajo contenido de arcilla tienen valores muy bajos de CIC, del orden de 0 – 10 meq/100 g de suelo seco, mientras que los suelos arcillosos pueden poseer de 40 a 50 meq/100 g de suelo seco.

En términos generales la **CIC** se refiere a la cantidad total de esos elementos de carga positiva que el suelo retiene. Los cationes están unidos a los "SITIOS DE INTERCAMBIO" donde un catión puede ser intercambiado por el mismo tipo de catión o por otro diferente. La CIC es expresada en miliequivalentes por 100 gramos (meq/100g) de suelo. LA CANTIDAD EXPRESA EL CONTENIDO DE CATIONES QUE SE ENCUENTRAN EN LOS SITIOS DE INTERCAMBIO DEL SUELO.

Las pruebas de extracción de cationes que permite estimar el valor de CIC remueven el 90% de la cantidad total de cationes del complejo de intercambio, por lo cual es recomendable dividir la suma de las bases entre 0.9 para corregir la eficiencia de la extracción. Con un pH de 8.0 o superior el suelo está, comúnmente, saturado de cationes básicos. Con un pH mayor de 8.2 la presencia de carbonatos puede dificultar una correcta determinación.

En cuanto a los factores que hacen que un suelo tenga una determinada CIC son varios Y entre ellos encontramos:

(A) TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS, pues cuanta más pequeña sea ésta, más grande será la CIC.

(B) LA COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE LAS ARCILLAS.

(C) TIPO DE CATIONES CAMBIABLES. (D) EL PH (a pH bajos los H^+ están fuertemente retenidos en las superficies de las partículas, pero a pH altos los H^+ de los $COOH^-$ primero y de los OH^- después, se disocian y los H^+ pueden ser intercambiados por cationes.

El humus puede alcanzar hasta los 300 meq/100 g de muestra. La determinación de la CIC se realiza en el laboratorio exclusivamente, y es un análisis imprescindible para saber el estado nutricional del suelo y elaborar el programa de fertilización o incorporación de abonos orgánicos. Los resultados del laboratorio nos reportan la cantidad de miliequivalentes por cada 100 gramos de suelo seco. En el texto se proporciona un ejemplo teórico del desglose del valor de la CIC de un suelo:

Cuadro 19.

Capacidad de intercambio catiónico de una muestra de suelo.

Calcio	21 meq/100 g de suelo seco
Magnesio	6 meq/100 g de suelo seco
Sodio	2 meq/100 g de suelo seco
Potasio	2 meq/100 g de suelo seco
Hidrógeno	1 meq/100 g de suelo seco
CIC	32 meq/100 g de suelo seco

CÁLCULO DE LAS CANTIDADES DE LOS CATIONES A PARTIR DE LA CIC

Tenemos un terreno de 10,000 m² de superficie, 30 cm de profundidad el cual tiene una $Dap = 1.28 \text{ g/cm}^3$ y queremos saber a cuantos kilogramos de los cationes corresponden las cantidades de miliequivalentes.

- (1) Calcular el peso del suelo, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, y que consiste en la determinación del volumen del suelo y luego multiplicarlo por la Dap :

$$Vol = (10,000) (0.30) = 3,000 \text{ m}^3$$

$$Peso \text{ del terreno} = (3,000) (1.28) = 3,840 \text{ ton}$$

(2) Tomar en consideración las siguientes equivalencias de medida:

1 ton = 1,000 Kg; 100 g = 0.1 Kg; 1 mg = 0.000 001 Kg..

1 meq de Hidrógeno	0.000001 Kg
1 meq de Calcio	0.000020 Kg
1 meq de Magnesio	0.000012 Kg
1 meq de Sodio	0.000023 Kg
1 meq de Potasio	0.000039 Kg

(3) Multiplicar las cantidades en kilogramos correspondientes a 1 meq de cada catión por la cantidad de meq de la CIC:

Hidrógeno	0.000001 Kg x 1 meq = 0.000001 kg / 0.1 Kg de suelo
Calcio	0.000020 Kg x 21 meq = 0.00042 Kg / 0.1 Kg de suelo
Magnesio	0.000012 Kg x 6 meq = 0.000072 Kg / 0.1 Kg de suelo
Sodio	0.000023 Kg x 2 meq = 0.000046 Kg / 0.1 Kg de suelo
Potasio	0.000039 Kg x 2 meq = 0.000078 Kg / 0.1 Kg de suelo

(4) Razonar el siguiente planteamiento y aplicarlo para todos los cationes:

Si tenemos 0.000001 Kg de H⁺ ----- -- 0.1 Kg de suelo

$$X = \frac{(0.000001)(38400009)}{0.1} = 38.4 \text{ Kg de H}^+ \text{ en el terreno}$$

38.4 Kg de Hidrógeno

16, 128 Kg de Calcio

2,764.8 Kg de Magnesio

1,766.4 Kg de Sodio

2,995.2 Kg de Potasio

Estas cantidades están presentes en el terreno de 10,000 m² a una profundidad de 30 cm y con un valor de Dap= 1.28 g/cm³.

Figura 65.

Expresión numérica de la CIC del suelo.

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO en moles y centimoles/kg suelo		
MOL - Un gramo de un peso molecular de un elemento o compuesto. Una mol contiene el número de Avogadro en átomos o moléculas Número de Avogadro = 6.023×10^{23} /mol (602,300,000,000,000,000,000,000/mol) UN CENTIMOL = 1/100 moles = cmol = 6.023×10^{21} UN MILIMOL = 1/1000 moles = mmol = 6.023×10^{20} UNIDADES Centimoles de carga + por kg de suelo; cmol (p+)/kg; cmol/kg; cmol (+)/kg		
CIC del suelo = 50 cmol (+)/kg		
Ion	cmol (+)/kg	cmol ion/kg
H	5	5
K	10	10
NH ₄	5	5
Ca	20	10
Mg	10	5

Tipo de suelo	CIC
Arena	3-5
Arena limosa	10-20
Franco	15-20
Limo	15-25
Arcillas limosa	20-50
Suelos orgánicos	50-100

Figura 66.

CIC del suelo en miliequivalentes.

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO en meq/100 g de suelo	
El número de sitios de absorción de cationes por unidad de peso de suelo o la suma total de cationes intercambiables que un suelo puede adsorber. Miliequivalente (meq.) - Un miligramo de hidrógeno o la cantidad de algún otro ion que pueda combinarse con él o desplazarlo. Expresado como meq/100 g de suelo seco Catión Ca⁺⁺ Peso atómico = 40 Un Ca⁺⁺ reemplaza 2H⁺ De esta manera el calcio requerido para reemplazar 1 mg de H⁺ es 40/2, esto es 20 mg⁻¹ meq de Ca.	
CIC de humus y arcillas (cmol(+)/kg) o meq/100g	
Humus	200
Montmorillonita	100
Ilita	30
Vermiculita	100
Esmeclita	150
Micas	30
Arcilla oxidohidratada	4
Caolinita	8

Peso equivalente = $\frac{\text{peso atómico o molecular (g)}}{\text{valencia}}$

La importancia de la CIC es evidente pues controla la disponibilidad de nutrientes para las plantas, interviene en la floculación-dispersión de arcilla y en el desarrollo de la estructura y estabilidad de los agregados; determina el papel del suelo como depurador natural al permitir la retención de elementos contaminantes en el suelo.

La arcilla del suelo puede tener un valor más alto en la CIC que la arena, y, aún entre los diferentes tipos de arcilla pueden existir diferentes valores y pueden, ser indicadores de la capacidad potencial del suelo para retener nutrimentos y aprovechables por la planta.

Cuadro 20.

Superficie específica, capacidad de intercambio de cationes y densidad de carga de varios minerales de arcilla.

<i>Mineral de arcilla</i>	<i>Superficie específica (m²/gr)</i>	<i>Capacidad de intercambio catiónico (meq/gr)</i>	<i>Densidad de carga (meq/m² x10³)</i>
<i>Caolinitas</i>	50-20	0.03-0.15	6-7.5
<i>Illitas</i>	100-200	0.10-1040	1.0-2.0
<i>Montmorillonitas</i>	300-500	1.0-1.50	3.0-3.3
<i>Vermiculitas</i>	700-800	0.80-1.50	1.1-1.9

Fuente: Rucks, *et al.*, 2004.

El aumento en el contenido de MO del suelo favorece un aumento en los valores de CIC, pues los compuestos orgánicos retienen cationes al igual que la arcilla. La MO tiene un alto valor de CIC, pero dicho material no abunda en el suelo.

Una alta CIC es deseable porque los nutrientes son menos sometidos a lavado y se puede mantener una mayor reserva de nutrimentos en el suelo. Sin embargo, los suelos arenosos, por naturaleza, presentan valores bajos. UN ALTO VALOR DE CIC INDICA UNA MAYOR FERTILIDAD DEL SUELO Y, ES USADO PARA SUGERIR UNA SERIE DE RECOMENDACIONES SOBRE CIERTOS NUTRIMENTOS, PUES SE TRATA DE UN VALOR CASICONSTANTE EN EL TIEMPO. Sin embargo, pueden existir algunas fuentes de error en suelos con altos contenidos de CaCO₃, yeso o alcalinos, y aunque muchas veces se estima teniendo en cuenta la textura del suelo, el contenido de MO, el tipo de cationes y el pH, dichas estimaciones, a menudo son inexactas. El método de la

"SUMA DE BASES" para calcular la CIC de suelos alcalinos puede ofrecer imprecisiones debido a la presencia de CaCO_3 libre.

Se puede estimar como la Σ de cationes y la acidez intercambiables. Algunos laboratorios lo determinan en base a la cantidad de cationes extraídos por NH_4Oac (oxalacetato de amonio) 1N o estimando separadamente por titulación. Es un indicador indirecto de la textura del suelo. Generalmente, los suelos arenosos tienen un valor de CIC < 10, los suelos limosos de 10 a 30 y los arcillosos > 30. La MO del suelo puede ejercer gran influencia sobre los valores de CIC, siendo más alto en los suelos con mayor contenido de materiales orgánicos. De igual forma, se vincula, estrechamente con las arcillas dominantes en el suelo, pudiéndose señalar las siguientes relaciones:

Cuadro 21.

Relación entre minerales y coloides del suelo con la CIC.

<i>Relación entre tipo de arcilla y otros valores de CIC del suelo</i>	
<i>Materiales</i>	<i>Meq/100 g</i>
<i>Bentonitas</i>	60 - 100
<i>Caolinita y zeolitas</i>	3 - 20
<i>Cuarzo y feldespatos</i>	1 - 2
<i>Esmectitas, vermiculitas, ácidos húmicos (silicatos de tipo arcilla)</i>	100 – 150
<i>Humus</i>	200
<i>Ilita y cloritas (silicatos)</i>	20- 60
<i>Materia orgánica</i>	300 – 500
<i>Mica hidratada</i>	30
<i>Montrillonita (arcillas 2:1)</i>	80 – 150
<i>Óxidos e hidróxidos de Fe y Al</i>	4
<i>Óxidos hidratados</i>	4

PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE BASES (PSB)

ESTA DETERMINACIÓN ES IMPORTANTE PARA SABER CUÁL ES LA PROPORCIÓN DE CATIONES BASE CON RELACIÓN A LA CIC, SI ESTA PROPORCIÓN ES > 50% SE TRATA DE UN SUELO FÉRTIL, MIENTRAS QUE SI < 50% ES UN SUELO INFÉRTIL Y ÁCIDO.

EL PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE BASES (PBS) INDICA EL VALOR PROPORCIONAL DE LOS SITIOS DE INTERCAMBIO QUE ESTÁN OCUPADOS POR LOS CATIONES BÁSICOS. Si el Ca^{2+} , por ejemplo, tiene un valor de saturación de bases de 50% y el Mg de 20%, significa que el primer elemento ocupa la mitad y el segundo catión una quinta parte del total de los sitios de intercambio (CIC) presentes en el suelo. Por otra parte, si todas las bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg, K^+ y Na^+) totalizan el 100%, entonces, no existe intercambio ácido (H^+ y Al^{3+}).

El PSB es calculado al dividir los miliequivalentes de cada catión entre el valor de CIC calculado y multiplicándolo por 100, Es así que representa el porcentaje de sitios de intercambio catiónico en el suelo que están ocupados por iones básicos: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y NH_4^+ . La diferencia entre este número y 100 es el porcentaje de sitios de intercambio catiónico ocupados por iones ácidos, esto es Al^{3+} e H^+ . Un valor de saturación de bases de 50% o mayor es deseable.

Comúnmente, un alto de PSB indica una mayor fertilidad del suelo. Las bases extractables de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ (miliequivalentes por 100 gramos de suelo seco) son asumidas como las principales bases intercambiables de los sitios de intercambio catiónico del suelo. El término extractable más que intercambiable es usado porque alguna fuente adicional de bases solubles influye los resultados. Las bases extractables de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ se extraen con NH_4OAc , con pH amortiguado a 7.0 y medidas por absorción atómica.

El rango ideal de saturación de Ca es 60 - 80% de la CIC del suelo. Cuando el Ca^{2+} es > 80% es excesivo. El rango ideal de saturación para el Mg es 10-25%. Se recomiendan aplicaciones de Mg cuando los valores de saturación son < 15% o cuando la relación de % de Mg^{2+} y % K^+ es < 2:1. Por otra parte, se considera cantidades excesivas del elemento aquellas que superan 25% de la CIC.

El intervalo ideal de saturación de K^+ varía de acuerdo con cada cultivo, pero se considera adecuado de 3 a 5%. Cantidades más altas se consideran inadecuadas porque este elemento compite con el Mg.

Un PSB "IDEAL" se considera aquel en el cual los valores de saturación de cada uno de los cationes básicos alcanzan los siguientes valores: 65 a 85% de Ca^{2+} , 6 a 12% de Mg^{2+} y 2 a 5% de K^+ . Además, es necesaria la existencia de relaciones numéricas apropiadas entre los diferentes elementos catiónicos, para evitar la existencia de

desbalance de nutrimentos, por lo que se consideran adecuados los siguientes valores: Ca:Mg:K (20:4:1).

Si un suelo presenta un porcentaje de saturación de bases podemos decir que este tiene “los nutrimentos necesarios para que los microorganismos y las plantas actúen eficientemente en los procesos de biorremediación” (Frick, *et al.*, 1999).

Se ha mostrado una relación directa entre el pH del suelo y el Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables. La relación entre pH y crecimiento de cultivos ha sido verificada en experimentos realizados en invernaderos. El concepto relación óptima de cationes tendrá una gran desventaja si se le considera un valor inmutable, pues, la cantidad total de cationes intercambiables en suelos arenosos es muy baja, cuando tienen un bajo contenido de MO. Ahí, es posible tener deficiencia de K^+ o Mg^{2+} aunque los valores de la relación de cationes estén considerados como ideal.

Por otra parte, mientras las relaciones catiónicas puedan ser consideradas menores que los valores ideales para algunos suelos de textura fina, dichos suelos podrán tener cantidades adecuadas de nutrimentos para las plantas y no será recomendable ninguna adición.

Hay una relación inversa y adversa entre una alta concentración de un catión en el suelo y la disponibilidad y aprovechamiento de otro catión por la planta. Una cantidad excesiva de Ca^{2+} induce déficits de Mg^{2+} , cuando este es inferior al 5% de saturación. De igual forma, un alto contenido de K^+ suprime el aprovechamiento de Mg^{2+} , mientras que una alta proporción de Mg^{2+} limita la disponibilidad de Ca^{2+} .

El balance entre estos tres cationes nutrimentales es importante. Un desbalance puede ocurrir si uno o más cationes se encuentran presentes en una alta cantidad, pues la competencia inherente entre ellos puede crear “DEFICIENCIAS INDUCIDAS” O EXCESOS DE CUALQUIERA DE LOS ELEMENTOS CATIÓNICOS. El PSB se interrelaciona, además, con el pH del suelo, pues ambos valores aumentan correlativamente, como se señala a continuación:

Cuadro 22.

Relación entre porcentaje de saturación de bases y pH.

<i>%SB</i>	<i>PH</i>
0	3.9
0	4.5
25	5.3
50	6.2
75	7.1
90	7.5
100	8.0

Un PSB limitativa para muchas actividades ocurre cuando el Na^+ logra valores de 15%. Esta capacidad se conoce como porcentaje de sodio intercambiable (PSI). Valores mayores de 15% favorecen la dispersión del suelo, deficiente velocidad de infiltración del agua y toxicidad a las plantas. Un cálculo demuestra que la relación actual de un nutrimento catiónico con otro habrá de resultar, con toda seguridad, en un amplio intervalo de valores. Así, el intervalo óptimo para Ca^{2+} (60 - 80%) y Mg^{2+} (10 - 25%) resulta en relaciones numéricas Ca:Mg que varían de 2.4-8 para el calcio y de 1 para el magnesio.

SOLUCIÓN O DISOLUCIÓN DEL SUELO

Este es un componente dinámico (solución) en balance con el aire del suelo retenido en los poros del suelo con variaciones de fuerza. En una solución del suelo el pH es una propiedad importante, al igual que un equilibrio en la presencia de los componentes sólidos

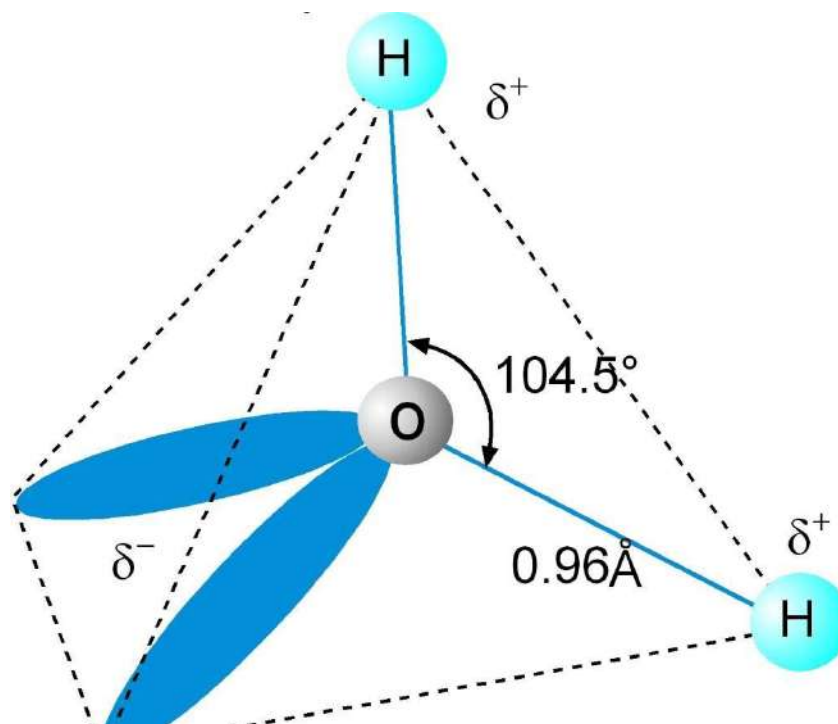
Existen dos conceptos del agua del suelo: 1. El agua es retenida entre los poros del suelo con grados de variación de la tenacidad que depende de la cantidad de agua presente. 2. El agua disuelve las sales en una solución del suelo; por ello es el medio para el suministro de nutrientes.

Una disolución o solución es una mezcla homogénea entre dos o más sustancias que se asocian y no reaccionan entre sí; donde la sustancia en mayor concentración será el solvente y la otra tendrá el papel de soluto. En química se conocen muchas soluciones, pero en las más comunes el solvente (disolvente) es un líquido y el soluto es un sólido, y finalmente el estado de la solución es líquido. Aunque es importante

insistir que existen soluciones con solventes y solutos en estado gaseoso, sólido o en estado supercrítico. Cuando el solvente es el agua, a las soluciones resultantes se les llama: SOLUCIONES ACUOSAS. Estas soluciones tienen propiedades y reactividades químicas muy particulares que se diferencian en mucho con las propiedades del agua pura. El agua tiene alto potencial como solvente polar por su estructura química. La disposición de los átomos de H⁺ con relación al átomo de O₂ tiene un ángulo de 104.5°, lo que induce un campo eléctrico con una carga positiva (d⁺) por el lado de los átomos de H⁺, y una carga negativa (d⁻) por el lado del átomo de O₂.

Figura 67.

Estructura del agua.



Fuente: Aulafacil, s.f.

La molécula de agua se dice que es un dipolo o una molécula bipolar, ya que tiene la capacidad de adsorber o adherirse a sustancias con carga eléctrica positiva y negativa. En estado líquido puede disolver una gran cantidad de solutos, tanto en estado líquido, sólido o gaseoso. De aquí que, al agua se le considera como el solvente universal.

Cuando el agua está en estado puro, sus propiedades físicas y químicas están determinadas solo por la temperatura y la presión, pero si el agua forma parte de una disolución, o está mezclada con otras sustancias, las propiedades de la solución acuosa resultante comienzan a diferir de las del agua pura y a depender de la reactividad de los solutos y de su concentración.

El agua en el suelo no puede estar en estado puro por dos razones fundamentales: 1) La presencia natural de sales solubles derivadas del intemperismo de los minerales de las rocas originales, y de los compuestos orgánicos solubles producidos por la descomposición de la MO y las secreciones de las raíces de las plantas y del crecimiento de los organismos del suelo. 2) Que el agua misma se disocia en iones (H^+) e (OH^-) en una cierta concentración de agua. En otras palabras, una parte de las moléculas de agua se descomponen de forma natural liberando el catión (H^+) e (OH^-). Por lo antes descrito, el agua al penetrar al suelo de inmediato se asocia a los solutos disponibles y se convierte en una solución acuosa del suelo, o solución del suelo.

LA REACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DEL SUELO (pH)

El potencial de reactividad química de la solución del suelo se sin nombra comúnmente como el pH del suelo. Aunque en realidad, se trata de una propiedad de reactividad de la solución del suelo debida a su concentración de iones H^+ y que tiene importantes implicaciones en el crecimiento y desarrollo de las plantas de un cultivo.

Como ya se describió, anteriormente, el ion (H^+) es un ion ácido que al encontrarse en cantidades importantes en la solución del suelo va a provocar que ésta adquiera un grado de acidez que dependerá de su concentración $[H^+]$. Las concentraciones del ion $[H^+]$ y del ion $[OH^-]$ en la solución del suelo son inversamente proporcionales, es decir, cuando un ion aumenta el otro disminuye. Cuando la concentración del catión H^+ crece, (y aumenta la acidez de la solución del suelo) el anión $[OH^-]$ disminuye. Cuando el anión hidroxilo aumenta, (crece la alcalinidad de la solución del suelo) la concentración del catión H^+ disminuye. Para entender mejor lo que hemos escrito arriba debemos tener claro que cualquier cantidad de agua pura, a presión normal (1 atm) y a $25^\circ C$, se descompondrá o se disociará en iones H^+ y OH^- . Es una cantidad muy pequeña de agua que se ioniza y que se puede determinar al calcular la constante de equilibrio de esa reacción:



$$K_{eq} = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]} = [1.82 \times 10^{-16}]$$

Al calcular la concentración molar del agua, es decir, la cantidad de moles de agua en un litro de agua tenemos:

$$[H_2O] = \left[\frac{997}{18} \right] = 55.3 \text{ moles/litro}$$

A la temperatura y presión descritas tenemos que la densidad del agua es de 997 cm³ (ml) por litro, y 18 es el peso molecular del agua (2 + 16; 2 = 2 átomos de H⁺ y 16 = 1 átomo de O₂). Así que se obtienen 55.3 moles/litro.

Al multiplicar la constante de equilibrio de la reacción de ionización del agua por la concentración molar del agua se obtiene el valor de la constante del producto iónico del agua

$$(K_A): K_A = [H^+] [OH^-] = 1.82 \times 10^{-16} \times 55.3 = 1.01 \times 10^{-14}$$

El significado de esta constante es que, la concentración de iones H⁺ y iones OH⁻ en cualquier cantidad de agua pura será de 1.01 x 10⁻¹⁴ moles/litro, y que habrá igual cantidad de H⁺ y de OH⁻.

Retomando algo muy importante que se escribió antes: (1) Si la concentración de H⁺ es mayor que la concentración de OH⁻, tenemos una solución del suelo ÁCIDA. (2) Si la concentración de OH⁻ es mayor que la concentración de H⁺, tenemos una solución del suelo ALCALINA O BÁSICA. (3) En cualquier cantidad de agua PURA (sin solutos) la concentración de H⁺ y la de OH son iguales; que esta agua es considerada NEUTRA.

De la constante del producto iónico del agua (K_A) podemos concluir que, en cualquier cantidad de agua pura, la concentración de iones hidrógeno y de iones hidróxido será:

$$[H^+] [OH^-] = 1.0 \times 10^{-14} \text{ moles/litro}$$

$$[H^+] = 1.0 \times 10^{-7}$$

$$[OH^-] = 1.0 \times 10^{-7}$$

Cualquier cantidad de agua pura tendrá igual concentración de iones H⁺ y de iones OH⁻ y esta concentración será para cada uno de los iones igual a 0.0000001 mol/litro.

ÁCIDOS Y BASES. Hemos mencionado que el agua del suelo no podría estar en estado puro, ya que debido a su carácter polar siempre tenderá a solubilizar algunas sustancias del suelo y a formar una disolución o solución (la solución del suelo). Las sustancias que se encuentran en el suelo, y que pueden asociarse con las moléculas de agua pueden también ionizarse y liberar, si en su estructura química los poseen, iones H^+ y iones OH^- . A los compuestos químicos que al ionizarse en el agua y liberan iones H^+ , se les llama **ÁCIDOS**, mientras que a los compuestos químicos que al ionizarse en agua y liberan iones OH^- , se les llama **BASES**. De hecho, por lo que ya se ha mencionado, el agua pura es considerada un **ÁCIDO** y al mismo tiempo una **BASE**, ya que libera de manera natural tanto iones H^+ y iones OH^- .

En condiciones normales, las raíces de las plantas y los organismos del suelo pueden secretar ácidos y liberar iones H^+ a la solución y participar a una eventual acidez. Los contaminantes atmosféricos originados por los motores de combustión de los vehículos y por la actividad industrial, al solubilizarse con el vapor de agua en proceso de condensación, producen lo que se conoce comúnmente como, “**LLUVIA ÁCIDA**” que al infiltrarse en el suelo puede provocar acidez. Por otro lado, los minerales de las rocas que dieron origen del suelo, pueden ser fuentes abundantes de sustancias básicas o bases, que liberan al agua importantes cantidades del ion hidróxido. Es común observar en México suelos con un origen de rocas calizas, con una baja concentración de iones H^+ y muy altas concentraciones de iones OH^- .

El agua de riego puede ser ácida o básica y modificar las concentraciones de los iones en cuestión en la solución del suelo. Asimismo, los fertilizantes (sean naturales o sintéticos) pueden acidificar o alcalinizar la solución del suelo. En todo caso, cualquier aportación al suelo de sustancias que liberen H^+ u OH^- , van a modificar, en algún grado, esta característica química de la solución del suelo.

Entre “los factores involucrados en la actividad microbiana del suelo, se encuentra la temperatura, pH, humedad, disponibilidad de oxígeno, nutrientes inorgánicos y accesibilidad al sustrato, [estos] influyen en la descomposición de la materia orgánica” (Vásquez & Zuñiga, 2008).

FÓRMULA DE SORENSEN (1909). La fórmula propuesta por Sorensen sirve para simplificar y facilitar el manejo de las concentraciones iónicas del H^+ . Estas son muy pequeñas y

en principio resultan difíciles de expresar, por lo que al transformarlas a una escala logarítmica facilita su comprensión y uso cotidiano.

$$pH = \log \left(\frac{1}{H^+} \right)$$

Al aplicar esta fórmula a una pequeña concentración de iones H^+ , se obtiene un número mucho más grande y accesible:

$$pH = \log \left(\frac{1}{1.0 \times 10^{-7}} \right) = 7.0$$

Si se recuerda, en el agua pura, la concentración de $[H^+]$ y de $[OH^-]$ son iguales y tienen un valor de 1.0×10^{-7} , entonces: $pH = 7.0$ y $pOH = 7.0$ (en caso de contar con una fórmula similar para el ion OH^-). Lo anterior nos conduce a plantear ciertas consideraciones para el manejo de escalas logarítmicas:

1. Una concentración de, por ejemplo, 0.01 (1.0×10^{-2}) es muchas veces mayor que una concentración de 0.0000001 (1.0×10^{-7}). También que una concentración de 1.0×10^{-7} es mucho mayor que una concentración de 1.0×10^{-14} . Si sustituimos los valores en la fórmula de pH, tenemos:

$$pH [1.0 \times 10^{-2}] = 2.0$$

$$pH [1.0 \times 10^{-7}] = 7.0$$

$$pH [1.0 \times 10^{-14}] = 14.0$$

2. A menores valores en la escala logarítmica de pH, la concentración de iones H^+ es mayor, por lo que la acidez de una solución con $pH = 1.9$ es DIEZ VECES MAYOR que en una con un $pH = 2.0$. Esto también significa que un $pH = 0$, no solo puede existir teóricamente, sino que sería una solución extremadamente ácida. Afortunadamente, las soluciones de los suelo agrícolas no alcanzan tal grado de acidez.
3. Un valor de $pH = 14.0$, significa que, prácticamente, no hay iones H^+ y hay una predominancia casi completa de iones OH^- . Como ambas concentraciones de iones H^+ e OH^- son inversamente proporcionales en las soluciones, también los valores de pH y pOH son inversamente proporcionales. En una solución del suelo con la misma concentración de iones H^+ y de iones OH^- , su $pH = 7.0$ y su $pOH = 7.0$; diremos que es una solución neutra. Cuando el $pH = 6.0$ y el pOH

= 8.0, se dice que es una solución ácida. Esta relación entre el pH y el pOH, nos permite hacer el siguiente planteamiento:

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14$$

$$\text{Entonces: } \text{pH} = 14 - \text{pOH} \text{ y } \text{pOH} = 14 - \text{pH}$$

DETERMINACIÓN DEL pH DE LA SOLUCIÓN DEL SUELO. La reacción de la solución del suelo o pH se determina por medio de tiras de papel indicador o de manera más precisa, con un potenciómetro o comúnmente llamado “POTENCIÓMETRO”. Los hay de campo o portátiles, o de mesa; como los que se usan en el laboratorio.

Figura 68.

Potenciómetro.



Fuente: Instituto Hanna, 2021.

IMPORTANCIA DEL pH DE LAS SOLUCIÓN DEL SUELO EL pH Y LA ADAPTACIÓN DE LAS ESPECIES AGRÍCOLAS.

Esta característica química del suelo es muy importante ya que influye en la adaptación, crecimiento y desarrollo de las especies agrícolas a ciertas regiones. Dependiendo del origen de las especies de plantas cultivadas, éstas se adaptan a ciertos valores de pH, y aunque pueden desarrollarse en un rango amplio, no alcanzan su máximo potencial productivo o, inclusive, pueden presentar problemas de crecimiento. Especies como: alfalfa, cebada, lechuga y apio, se producen bien en suelo con un pH moderadamente alcalino. Algunos portainjertos de vid y el guayabo requieren abiertamente suelos con un pH fuertemente alcalino > 8.5 , para producir fruta de alta calidad.

La mayoría de los cultivos se desarrollan óptimamente en suelos con un pH neutro. Pero, los cítricos prefieren suelos con un pH moderadamente ácido (6.5 a 5.5) y el arándano exige un pH que va de fuerte a extremadamente ácido (< 5.5).

Antes de intentar la introducción de una especie agrícola, o una nueva variedad, a una cierta zona o región, es recomendable consultar sus requerimientos de pH, para así evitarse pérdidas innecesarias. Muchos proyectos frutícolas han fracasado estrepitosamente debido a que no se tomaron precauciones técnicas en este punto.

A continuación, se presentan algunas plantas de interés agronómico, junto a sus requerimientos de pH.

Figura 69.

Requerimiento de pH de cultivos.

					PH DEL SUELO				
CULTIVOS	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8
Maíz									
Trigo									
Cebada									
Espárragos									
Apio									
Patatas									
Pepino									
Tomate									
Arándanos									
Acelgas									
Coliflor									
Cítricos									
Fresas									

Fuente: Catalán, 2016.

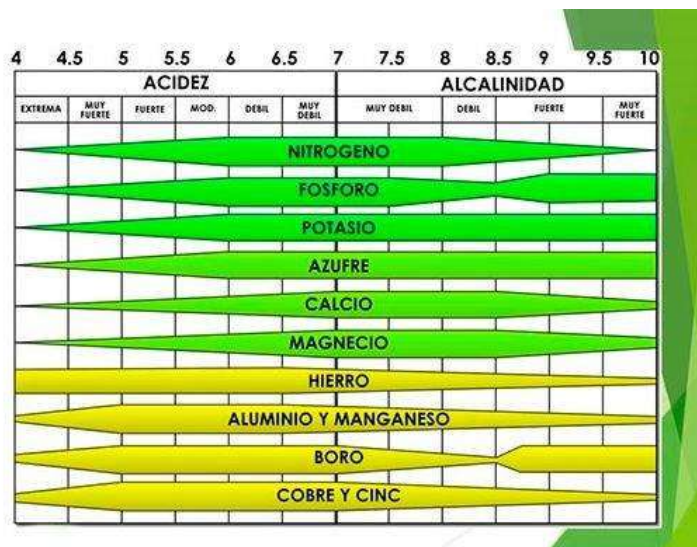
EL pH Y LOS NUTRIENTES DEL SUELO

El pH de la solución del suelo determina la disponibilidad de los elementos nutrientes esenciales o indispensables para la vida de las plantas. Dependiendo del pH de la solución del suelo, los elementos pueden estar disponibles o asequibles para su absorción por las raíces de las plantas, o fijados químicamente o en una forma no aprovechable. La fijación química significa que, aunque existan grandes cantidades de los elementos, éstos no pueden ser asimilados por las plantas ya que se integran a compuestos químicos insolubles, o poco móviles.

En la figura 70 podemos observar que, de acuerdo con el pH, las barras de los elementos se adelgazan cuando aumenta su fijación química. La anchura máxima de las barras significa que los elementos están completamente disponibles. Así es que, por ejemplo, el nitrógeno en un intervalo de pH de 6.0 hasta 8.0, su disponibilidad en el suelo es máxima, pero por debajo de 6.0 comienza su fijación química disminuyendo su disponibilidad, y también a valores de pH > 8.0.

Figura 70.

Presencia de los elementos en relación con el pH.



Fuente: Eurogrow, 2021.

El P, K⁺ y S en suelos ácidos tiende a fijarse, mientras que a pH alcalino su disponibilidad aumenta. El Ca²⁺ y el Mg²⁺ presentan un rango de máxima disponibilidad en pH que van desde 6.5 - 8.5, y al aumentar la acidez o la alcalinidad también aumentan su fijación. El Fe y el Mn tienen su mayor disponibilidad a valores de pH ácidos, y a valores alcalinos aumentan su fijación. El Cu y el Zn se fijan a valores de alcalinidad. Prácticamente todos los elementos presentados en la diapositiva tienen su intervalo de máxima disponibilidad a un valor de pH neutro. Cuando el pH de la solución del suelo provoca la fijación química de los elementos esenciales, las plantas expresarán síntomas de deficiencia nutricional, que pueden ser leves o severos; incluyendo la muerte, según sea la gravedad de la carencia o deficiencia.

pH DE LA SOLUCIÓN DEL SUELO. Se determina por el logaritmo negativo de la concentración de los iones hidrógeno (H⁺) en la solución del suelo:

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

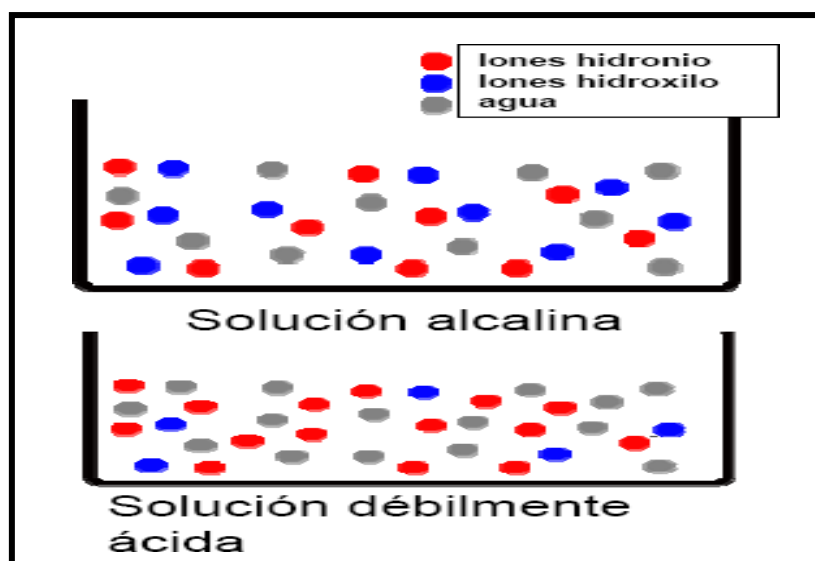
Cuadro 23.

El pH del suelo y sus características químicas.

<i>Reacción del suelo expresada en términos de pH</i>	
<i>pH > 7: suelo alcalino (OH^-); pH igual a 7: suelo neutro; pH < 7: suelo ácido (H^+)</i>	<i>A pH de 6 hay 10 veces más iones H^+ que a pH 7 y hay 100 veces más iones H^+ entre 7 y 5</i>
<i>Suelo ácido (H^+) > (OH^-); suelo neutro (H^+) igual a (OH^-); suelo alcalino (H^+) < (OH^-)</i>	<i>La escala de pH es la medida de la acidez y de la alcalinidad de las soluciones.</i>
<i>Un ácido es un donador de protones (sustancia química que aumenta la concentración de los iones H^+ en una solución).</i>	<i>Una base es un aceptor de protones (reduce la concentración de los iones H^+ en una solución y aumenta la concentración de iones OH^-).</i>

Figura 71.

Solución ácida y solución alcalina.



¿QUÉ ES EL PH DEL SUELO? El pH del suelo está relacionado con la concentración de iones H^+ libres en la matriz del suelo por la disociación del agua, por la actividad química de las raíces y por muchas reacciones de intemperismo químico. La concentración de iones H^+ determina el pH del suelo. El pH del suelo es una medida de acidez o de alcalinidad. El valor es, realmente, una medida de la concentración de los iones H^+ . La mayoría de los suelos tienen un pH de 3.5 a 10 (en ciertas condiciones y en presencia de H_2SO_4 los suelos pueden tener valores de 2.0).

Cuando la actividad de H^+ sube, el pH del suelo baja. Suelos con valores de $pH < 7$ son denominados "ÁCIDOS" y aquellos con valores > 7 se conocen como "ALCALINOS"; los suelos con valor muy cercano a 7 se denominan "NEUTROS". En los suelos los hidrogeniones están en la solución, pero también existen en el complejo de cambio, o sea hay dos tipos de acidez, ACTIVA O REAL (en solución, debida a la actividad del ion H^+ en la solución del suelo) y DE CAMBIO O DE RESERVA (para los adsorbidos y es representada por el H^+ y Al_3^+ que son fácilmente intercambiados). Ambas están en equilibrio dinámico. Si se eliminan H^+ de la solución se liberan otros tantos H^+ adsorbidos. Como consecuencia el suelo muestra una fuerte resistencia a cualquier modificación de su pH (CAPACIDAD BUFFER O AMORTIGUADORA DEL SUELO O SEA LA HABILIDAD PARA RESISTIR CAMBIOS EN EL PH DEL SUELO).

En la mayoría de los suelos el pH es amortiguado por diferentes compuestos de la fase sólida, incluidos los monómeros y polímeros de hidroxialuminio $[NaAl(OH)_2CO_3]$ y la MO y, en suelos alcalinos, por compuestos insolubles de carbonato. Una condición de equilibrio existe entre tales componentes y la solución del suelo, de tal manera que cuando una base o un ácido se agregan a la solución, los agentes amortiguadores pueden absorber la adición y/o liberar ácidos o bases para mantener el equilibrio inicial. De esa forma, un cambio en el pH del suelo debido a la adición de una base o de un ácido es mucho menor que aquella pronosticada por neutralización basada solamente en la cantidad de ácido o base presente en la solución del suelo.

Cuadro 24.

Valores de referencia del pH del suelo y su interpretación.

Interpretación del valor del pH del suelo

<i>Escala</i>	<i>Categoría</i>
< 3.5	Ultra-ácido
3.5 - 4.4	Extremadamente ácido
4.5 - 5.0	Muy fuertemente ácido
5.1 - 5.5	Moderadamente ácido
5.6 - 6.0	Ligeramente ácido
6.1 - 6.5	Muy ligeramente ácido
6.6 - 7.3	Neutro
7.4 - 7.8	Ligeramente alcalino
7.9 - 8.4	Moderadamente alcalino
8.5 - 9.0	Fuertemente alcalino

pH y propiedades físicas. Los pH neutros son los mejores para las propiedades físicas de los suelos. A pH muy ácidos hay una intensa alteración de minerales y la estructura se vuelve inestable. En pH alcalino, la arcilla se dispersa, se destruye la estructura y existen malas condiciones desde el punto de vista físico.

pH, propiedades químicas y fertilidad. La asimilación de nutrimentos del suelo está influenciada por el pH, ya que determinados elementos nutritivos se pueden bloquear en determinadas condiciones de pH y no son asimilables para las plantas. Alrededor de pH 6 - 7.5 son las mejores condiciones para las plantas. La disponibilidad de nutrientes es directamente afectada por el pH del suelo, de tal forma que, si el valor es muy alto o bajo, algunos nutrimentos llegan a ser insolubles limitando la disponibilidad de éstos. Puede afectar las actividades y naturaleza de las poblaciones microbianas y reacciones de ciertos pesticidas.

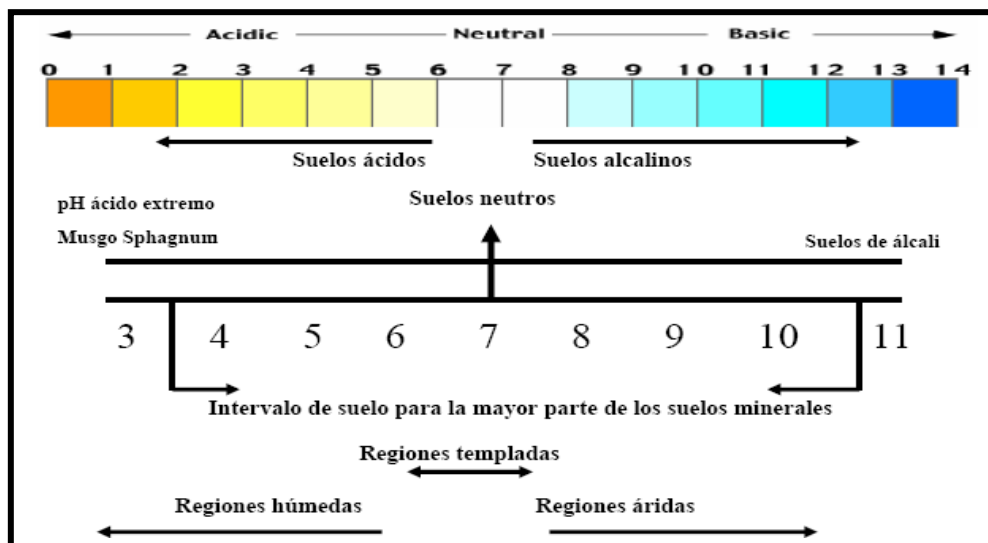
El pH como indicador de fertilidad del suelo.

El potencial de hidrógeno afecta el rendimiento de los cultivos, funciona como un indicador de adaptabilidad de especies, influye en la fijación biológica de N_2 e Incide en la eficacia de los herbicidas.

Importancia del pH. El pH es de gran importancia ya que de él depende el uso de tratamientos adicionales o enmiendas para modificar las condiciones de acidez o alcalinidad excesiva que pueda existir y que afectarán la respuesta del fertilizante que se aplique. También afecta la cantidad de nutrimentos que están solubles en el agua del suelo, así como también, la cantidad de elementos nutritivos disponibles para las plantas, pues algunos son más cuantiosos bajo condiciones de acidez, en tanto que otros lo son en condiciones de basicidad. Pero, la mayoría de los nutrimentos son más fácilmente aprovechables por las plantas si el pH se halla cerca de la neutralidad. El pH influye en la solubilidad de los nutrientes, la mayor parte de las transformaciones químicas y, afecta, además, la actividad de los microorganismos responsables de la descomposición de la MO en el suelo. Por ello, se considera a esta, la determinación más importante en estudios de suelos.

Figura 72.

El pH de los distintos suelos minerales.



Con valores de $\text{pH} > 7.5$, el Ca^{2+} y el Mg^{2+} son abundantes, y, el pH, no es restrictivo, pero, presentan problemas para un adecuado crecimiento de muchas plantas. Así, el P y el Fe pueden estar en forma no aprovechable por las plantas. Suelen haber problemas de corrosividad en los metales de la maquinaria. Los suelos con un pH de 7.8 a 8.2 tienen CaCO_3 libre; presentan deficiencias de algunos micronutrientes y, requieren suplementos adicionales de fertilizantes fosfatados. Los suelos con un valor de $\text{pH} > 8.5$ presentan un alto porcentaje de Na^+ intercambiable y muy mala estructura del suelo, y al humedecerse exhiben un aspecto grasoso y lodoso, transformándose en estructura muy endurecidas al secarse. Los suelos con $\text{pH} > 7.5$ sólo pueden ser corregidos con azufre agrícola, siendo ésta una práctica poco común y, económicamente, poco factible. Cuando el pH alcanza valores > 8.6 , el Na^+ es, a menudo, frecuente y abundante, siendo, por otro lado, escasa la cantidad de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (yeso) o de CaCO_3 (carbonato de calcio). Los suelos con valores de pH EXTREMADAMENTE ALCALINO (> 9), TIENEN, ALTOS NIVELES DE Na^+ .

Los factores que hacen que el suelo tenga alto valor de pH son:

- NATURALEZA DEL MATERIAL ORIGINAL. Según que la roca sea de reacción ácida o básica.
- FACTOR BIÓTICO. Los residuos orgánicos contienen muchos ácidos orgánicos.

- c) PRECIPITACIONES. Tienden a acidificar al suelo y desaturarlo al intercambiar los H^+ del agua de lluvia por los Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ o Na^+ de los cambiadores.
- d) COMPLEJO ADSORBENTE. Según esté saturado con cationes de reacción básica (Ca^{2+} , Mg^{2+}) o ácida (H^+ o Al^{3+}); también dependiendo de la naturaleza del cambiador variará la facilidad de liberar los iones adsorbidos; el tipo de arcilla predominante puede ser una referencia de la saturación de bases.
- e) CONTENIDO DE SALES O ELECTROLITOS.
- f) CONTENIDO DE CO_2 .
- g) (G) OTROS FACTORES. El pH del suelo es afectado por la aplicación de fertilizantes, MO, textura y los microorganismos del suelo.

La mayoría de los técnicos y profesionales emplean los electrodos para determinar el pH, pero se han llegado a emplear hasta 8 técnicas alternativas. Los métodos difieren con respecto a: (A) MEDIO USADO (agua deionizada, solución de cloruro de calcio, etc.) o, (B) RELACIÓN SUELO/MEDIO (1:1 v/v, 1:2, 1:2.5; 1:5, etc.) o suelo/pasta; Algunos métodos llegan a permitir la formación de un material sobrenadante en el cual se hacen las determinaciones correspondientes. En condiciones de terrenos salinos o sódicos el pH se determina por el método de la pasta saturada, pues dicho valor nos permite tener una referencia del estatus del Na^+ en el suelo. En la determinación del pH del suelo se usan varias técnicas, aunque la mayoría de ellas se ubican en: MÉTODOS ELECTROMÉTRICOS. Los primeros son muy simples, baratos y precisos. El uso del potenciómetro es más recomendable.

1. El pH del suelo se determina en agua en una relación 1:2.5. Pero, los resultados se ven influidos por la presencia de pequeñas cantidades de sales existentes del suelo, las cuales varían con la época del muestreo y el manejo de la muestra. Puede ser determinado en una suspensión suelo-agua (5 g - 5 ml).
 - (a) Se pasa el suelo a través de un tamiz de 2 mm. (b) Se mezcla agua deionizada (destilada) con suelo. (b) Se mantiene en reposo por 30 minutos.
 - (c) Se calibra el potenciómetro. (d) Se mide el pH del suelo con el potenciómetro.

2. La presencia de sales solubles puede afectar el pH, y por ello, algunos analistas prefieren medirlo en una mezcla de suelo y 0.01M de CaCl_2 (registra menor variación que con los valores de pH contenidos con agua). Se sabe que en soluciones salinas el equilibrio para la determinación del pH se logra en 15 minutos, y en agua tarda, 18 horas, por lo cual la determinación de los valores de pH del suelo en solución de CaCl_2 , es más reproducible, rápida y se corresponde más estrechamente con el pH efectivo de la solución en contacto inmediato con las partículas del suelo.
3. La determinación del pH utilizando una solución de KCl 1N es un índice de la acidez del suelo y es muy popular en aquellas regiones con suelos muy ácidos y en los cuales el KCl es usado como un extractante del Al intercambiable. El valor determinado así indica el pH al cual es extraído el Al. Los valores obtenidos por este método suelen ser similares los obtenidos con una solución de CaCl_2 .
4. En suelos salinos o sódicos el pH del suelo se determina por el método de la pasta saturada, pues dicho valor nos permite tener una referencia del estatus del Na^+ en el suelo.
5. La determinación del pH por medio de una solución de NaF 1N puede ser usada como un indicador de que tipo de material amorfo (volcánico) domina en el complejo de intercambio del suelo.
6. El pH oxidado (solución orgánica y CaCl_2 0.01M) puede ser utilizado para valorar actividades de microorganismos del suelo o para diferenciar histosoles (suelos de tipo orgánico).

Cuadro 25.

Respuesta de los cultivos con relación al pH del suelo.

Respuesta de los cultivos al pH		
Valores de pH	Denominación	Respuesta normal de los cultivos
< 4.5	Extremadamente ácido	Muy pobre
4.5 - 5.0	Muy fuertemente ácido	Pobre
5.1 - 5.5	Fuertemente ácido	Moderadamente bueno
5.6 - 6.0	Medianamente ácido	Bueno
6.1 - 6.5	Ligeramente ácido	Muy bueno
6.6 - 7.3	Neutro	Muy bueno
7.4 - 7.8	Ligeramente alcalino	Moderadamente bueno
7.9 - 8.4	Medianamente alcalino	Pobre
8.5 - 9.0	Fuertemente alcalino	Muy pobre
> 9.0	Muy fuertemente alcalino	Escaso

Cuadro 26.

Relación de algunas condiciones edáficas y el pH.

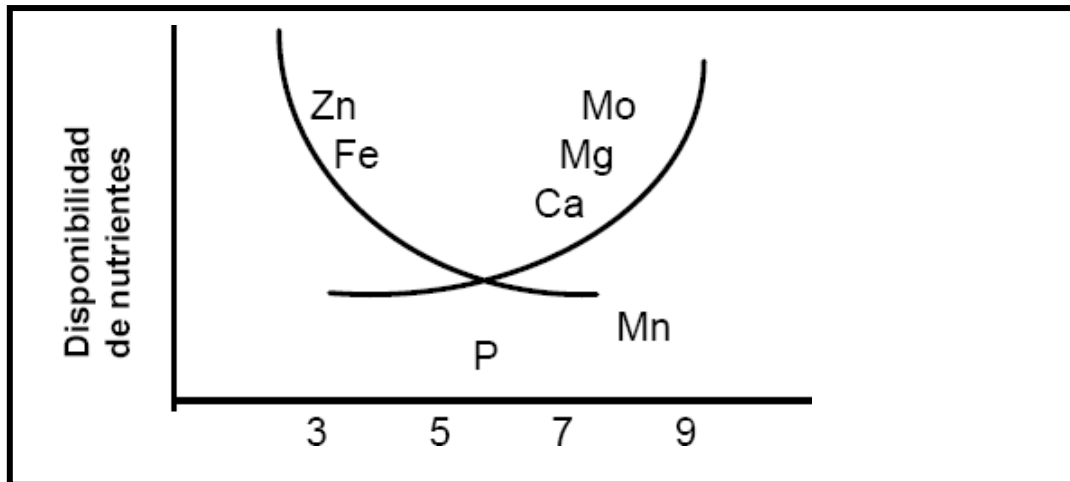
Valores de pH	Relación de algunas condiciones edáficas y el pH
	Condiciones del suelo
< 4.0	Ácidos libres originados por oxidación de sulfitos que generan suelos con H_2SO_4
< 5.5	Ocurrencia de Al intercambiable a niveles tóxicos
> 7.5	Presencia de niveles excesivos de sales solubles
7.8 - 8.2	Presencia de $CaCO_3$ en forma libre. Manifiestan presencia de micronutrientes.
> 8.5	Existencia de altas cantidades de sodio intercambiable. Mala estructura del suelo, muy dura al secarse; lustrosa y lodosa al humedecerse.

Importancia nutricional del pH del suelo. El suelo influye en la absorción de nutrientes y el crecimiento de la planta por dos mecanismos: (1) Efecto directo de los

iones hidrógeno. (2) Indirectamente a través de su influencia en la disponibilidad de nutrientes.

Figura 73.

pH del y la disponibilidad de nutrientes.



¿CÓMO PUEDE SER MODIFICADO EL PH?

1. La cal puede incrementar el pH por neutralización de H^+

$$CaCO_3 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^- + OH^-$$
2. El azufre puede disminuir el pH debido a su efecto acidificante
 (azufre básico) $S^0 + H_2O + 3/2 O_2 \rightarrow 2H^+ + SO_4^{2-}$
 (tiosulfato de aluminio) $Al_2(SO_4)_3 + 6 H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 6H^+ + 3SO_4^{2-}$

LA SALINIDAD Y SODICIDAD EN LOS SUELOS.

PORCENTAJE DE SODIO INTERCAMBIABLE (PSI).

El catión Na^+ tiene radios, atómico y de hidratación, grandes. Esto significa que ocupará mayor espacio en el suelo y llega a impedir la agregación de las partículas. Se dice que el catión Na^+ , dependiendo de la cantidad en el complejo de adsorción, puede desflocular o disgregar el suelo. UNA PROPORCIÓN MAYOR DEL 15% CON RELACIÓN A LA TOTALIDAD DE LOS CATIONES DEL COMPLEJO DE ADSORCIÓN, NOS INDICA QUE EL SUELO TIENE PROBLEMAS DE SODICIDAD O SE TRATA DE UN SUELO SÓDICO. Un suelo sódico no presenta estructuración de sus partículas y por lo tanto no tiene espacio poroso bien definido, sino que tiene una apariencia de harina suelta. En estas condiciones el agua no se infiltra y casi no hay flujo de aire. Así como

en una porción de harina, al verterle una cantidad de agua, ésta se queda sobre ella, así también los suelos sódicos no se estructuran en una matriz porosa.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

El agua pura es un pésimo conductor de electricidad, pero las soluciones acuosas con sales disueltas se convierten en eficientes electrolitos, es decir en conductoras de electricidad. A mayor concentración de sales disueltas en una solución acuosa, mayor será su capacidad para conducir la electricidad. Esta propiedad de las soluciones acuosas sirve para determinar su contenido de sales en análisis de suelos. La CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) de la solución del suelo, es un indicador directo del contenido de sales solubles, como: CLORUROS, SULFATOS, NITRATOS o CARBONATOS DE CALCIO, MAGNESIO, POTASIO o SODIO en el suelo. Las sales solubles, en altas concentraciones, pueden ser muy nocivas para las plantas debido a que aumentan el potencial osmótico fuera de las células provocando plasmólisis, o muerte citológica por roturas de la membrana del citoplasma y deshidratación. También a nivel de la absorción de agua y nutrientes por parte de las raíces, sucede que en lugar de favorecerse la absorción se provoca una salida de agua del interior de la planta. Y finalmente, un alto contenido de sales provoca la disminución de agua libre (DISMINUCIÓN DEL POTENCIAL HÍDRICO DEL SUELO).

Una CE de 4.0 mmhos/cm (milimhos por centímetro) o dS/m (deciSiemens por metro) nos indica un nivel de salinidad riesgoso. Al considerar la CE y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) al mismo tiempo tenemos la siguiente tabla:

Cuadro 27.

Características generales de los suelos salino y sódicos.

<i>Clasificación</i>	<i>CE (dS/m)</i>	<i>PSI</i>	<i>pH</i>
<i>Salinos</i>	> 4	< 15	< 8.5
<i>Sódicos</i>	< 4	> 15	> 8.5
<i>Salino-sódicos</i>	> 4	> 15	< 8.5

Es la capacidad de conducción de electricidad está determinada por la salinidad de una solución. La CE se incrementa al aumentar la cantidad de sales. El contenido de sales solubles en el suelo se obtiene de la CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN EXTRACTO DE PASTA SATURADA (CEE). Al paso del tiempo se ha encontrado que la respuesta de la

plantas es más evidente al relacionarse con la concentración de sal de la solución del suelo que con la concentración total de sales. De esa forma, la CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE UNA SOLUCIÓN (CEs) ha mostrado estar más correlacionada con la concentración total de sal y proporciona un método simple para su estimación.

La salinidad es medida en unidades de CEE y expresada en DECISIEMENS POR METRO o en MILIMHOS POR CENTÍMETRO, ambos, corregidos a 25°C de temperatura. La CEE es la medida estándar de la salinidad. Se mide en extracto saturado: agua de riego de calidad $\sim 2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y agua de mar $\sim 44 - 55 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

La caracterización de un suelo salino o sódico depende de la cantidad de sales solubles (estimada por la CEE), pH y porcentaje de sodio intercambiable. Los suelos salinos pueden contener por lo menos 2,600 ppm de sales solubles en la solución de un suelo saturado con agua y una conductividad eléctrica de al menos 4,000 micromhos/cm. Este contenido de sales es lo suficientemente grande para reducir la producción de los cultivos sensibles a las sales.

Cuadro 28.

Principales características de los suelos salinos y sódicos.

Características de suelos salinos y sódicos				
Clasificación	pH	CEe	% de sodio intercambiable	Física del suelo
Suelos salinos	8.5	> 4	< 15	Normal
Suelos sódicos no salinos	8.5 - 10	< 4	> 15	Mala
Suelos salino-sódicos	> 8.2	> 4	> 15	Normal
Sin problemas de salinidad y sodicidad	< 8.2	< 4	< 15	Normal

Cuadro 29.

Valores e interpretación de la conductividad eléctrica de los suelos.

Interpretación de distintas escalas de valores de conductividad eléctrica del suelo					
Escala	Categoría	Escala	Categoría	Escala	Categoría
< 2	Muy baja	< 1	Baja	< 2	No salino
2 - 4	Baja	1 - 2	Media	2 - 4	Poco salino
4 - 8	Moderada	> 2	Alta	4 - 8	Moderadamente salino
8 - 16	Alta			8 - 16	Muy salino
> 16	Muy alta			> 16	Extremadamente salino

Cuadro 30.

Interpretación biológica de la conductividad eléctrica del suelo.

<i>Interpretación de la conductividad eléctrica del suelo</i>			
<i>Escala</i>	<i>Categoría</i>	<i>Interpretación</i>	<i>Tolerancia en plantas</i>
< 2	Baja	Poca probabilidad de daño en la mayor parte de las plantas	Plantas sensibles
2 - 4	Moderada	La mayoría de las plántulas y plantas sensibles muestran daños	
4 - 8	Alta	La mayoría de las plantas no tolerantes a las sales muestran daño; casi todas las plantas sensibles a sales tienen daño severo	Moderadamente tolerantes
8 - 16	Excesiva	Las plantas tolerantes a las sales pueden crecer; la mayoría de las plantas muestran graves daños	Tolerantes
> 16	Muy excesiva	Muy pocas plantas pueden tolerar y crecer en tales concentraciones de sales	Altamente tolerantes

SUELOS SALINOS

Los suelos salinos o sódicos pueden reducir, el valor y la productividad de las tierras afectadas. La salinidad de los suelos y los problemas relacionados ocurren, en zonas con climas áridos o semiáridos en los cuales la lluvia es insuficiente para lavar las sales solubles o en aquellos sitios en los cuales el drenaje interno o superficial es restrictivo y en áreas irrigadas, cuando el agua es de mala calidad.

Salinidad.

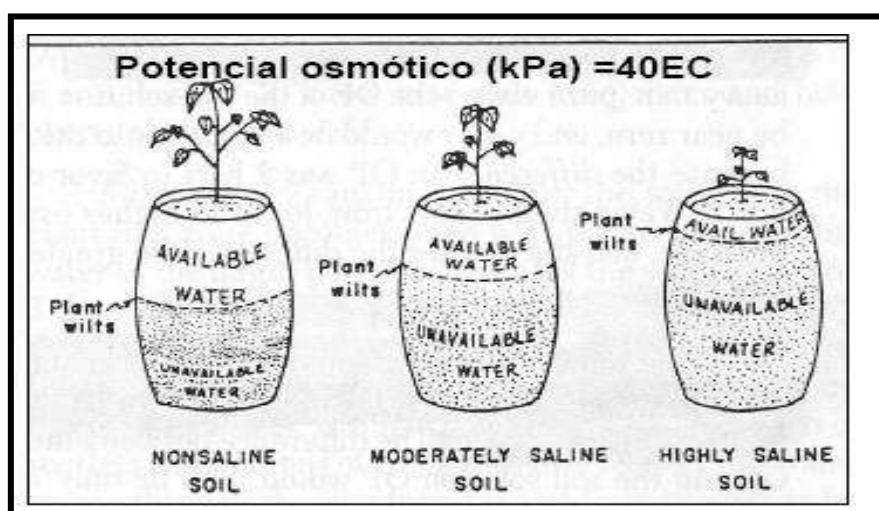
- Presencia de solutos inorgánicos disueltos, Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{4-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , puede incluir NH_4^+ , NO_3 , PO_4 , y partículas orgánicas cargadas.
- Conductividad eléctrica (CE) > 4 mmhos/cm o 4 deciSiemens/m (4 dS/m). ~ 40 mM NaCl litro. Contienen al menos 2,600 ppm o 4,000 micromhos/cm de sales solubles en la solución de un suelo saturado con agua.
- Porcentaje de Na intercambiable < 15 y pH mayor 8.5.
- Mucho Ca^{2+} y Mg^{2+} . A pesar de que el NaCl es la sal dominante en los suelos y aguas, existen otros elementos básicos formadores de sales.

- v. Agua de riego ($> 0.5 \text{ mg B litro}^{-1}$ perjudica a los cultivos sensibles; $> 2.0 \text{ mg B litro}^{-1}$ daña la mayoría de las especies).
- vi. La toxicidad de iones se asocia con el exceso de absorción de Cl^- y Na^+ .
- vii. Desbalance de nutrimentos (hay disminución en la absorción y/o el transporte en el tallo). Este nivel de sales es lo muy alto para inhibir el crecimiento de plantas sensibles a la salinidad.

Sólidos disueltos (sales): (1) FACTOR INTENSIDAD. Concentración de sal en la solución del suelo. (2) POTENCIAL OSMÓTICO: $\text{MPa} = \text{EC} \times 0.036$. (3) Factor capacidad. La habilidad de la fase sólida del suelo de proveer elementos si han disminuido en la solución.

Figura 74.

Potencial osmótico y crecimiento de la planta.



Las características principales de los suelos salinos son:

- a. **ÁREAS PEQUEÑAS.** Representan pequeñas áreas de terreno planas, en zonas bajas y con drenaje deficiente; puede tratarse de zonas erosionadas con subsuelos salinos o alcalinos expuestos; a menudo se trata de áreas húmedas cultivadas y compactadas con dificultades de drenaje, por lo que el agua se evapora y las sales se acumulan en la superficie del terreno.
- b. **BAJA PRODUCTIVIDAD.** Las sales retienen, excesivamente, el agua y provocan en la planta una "SEQUÍA FISIOLÓGICA", impidiendo su absorción; las plántulas son

más sensibles al estrés hídrico y pueden morir; los rendimientos se abaten en forma considerable.

- c. **COSTRAS BLANQUECINAS SUPERFICIALES.** Cuando el agua se evapora de los suelos salinos, las sales contenidas en el fluido pueden acumularse en la superficie del terreno; las sales son blancas y, después de un tiempo breve, se forma una delgada capa en el suelo; los encostramientos de sal se hacen más notables en la temporada seca.
- d. **BUENAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CAPA ARABLE.** Las sales al neutralizar la carga negativa de las arcillas permiten que éstas se unan unas con otras; cuando los suelos son muy húmedos son friables, suaves y de laboreo fácil.

LA SALINIDAD ES UN PROBLEMA SERIO. Impide el desarrollo de la agricultura. En muchas regiones del mundo los suelos están inhabilitados. Un 33% de las zonas irrigadas en el mundo están afectadas. La concentración de sal en los suelos afecta las propiedades del suelo: DEFICIENTE DRENAJE, DEFICIENCIAS DE NUTRIENTES Y TOXICIDAD EN LOS CULTIVOS.

Figura 75.

Costras de sal en el suelo.



Fuente: Solagro, 2019.

Cuadro 31.

Tolerancia y sensibilidad de las plantas a las sales del suelo.

Tolerancia de las plantas a las sales

<i>Plantas tolerantes</i>	<i>Plantas muy sensibles</i>
<i>Romeritos (Suaeda nigra), palma datilera (Phoenix spp.), cebada (Hordeum spp.), remolacha (Beta vulgaris), algodón (Gossypium spp.), cártamo (Carthamus spp.), trigo (Triticum spp.), jitomate (Lycopersicum spp.), alfalfa (Medicago spp.), cebolla (Allium cepa), girasol (Helianthus spp.).</i>	<i>Aguacate (Persea spp.), frijol (Phaseolus spp.), maíz (Zea mays), durazno (Prunus persica), cítricos (Citrus spp.), nuez (Juglans spp.; Carya spp.), calabacita (Cucurbita spp.), manzana (Malus spp.), coliflor (Brasica oleracea), pera (Pyrus spp.), fresa (Fragaria spp.), chícharo (Pisum sativum).</i>

Cuadro 32.

Principales limitantes y efectos de las sales del suelo en los cultivos.

Efecto salino esperado sobre el crecimiento de cultivos como una función de la concentración en el extracto de saturación (Manual 60, USDA)				
CEe (mmhos/cm)	Efectos de la salinidad	Concentración extracto de saturación (eq/l)	Presión osmótica (bares)	Clasificación propuesta
0	Normalmente despreciables	0.0	0	No salinos
2	Rendimiento restringido de cultivos muy sensibles	0.02	1	Ligeramente salinos
4	Rendimiento restringido de muchos cultivos	0.04	2	Moderadamente salinos
8	Rendimientos satisfactorios sólo de cultivos tolerantes	0.08	3	Muy salinos
16	Rendimientos satisfactorios de pocos cultivos muy tolerantes	0.016	4	Extremadamente salinos

Mecanismos de toxicidad de sales: 1. ANTIGUA TEORÍA. Inhibición de enzimas e inadecuado compartimiento entre vacuolas y citoplasma. 2. NUEVA TEORÍA. La sal acumulada en el apoplasta permite: deshidratación y la pérdida de turgencia; la muerte de las células de las hojas y de los tejidos; la concentración de Na^+ puede alcanzar 500 mM.

Autores como (Shannon, Grieve, & Francois, 1994) mencionan que “la salinidad disminuye la absorción de nutrimentos por parte de la planta como K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y NO_3^- ”.

Toxicidad por iones. La toxicidad por Na^+ y Cl^- causa inhibición de crecimiento en vid, nueces, cítricos, aguacate, frijol y frutales caducifolios; se expresa como clorosis marginal y necrosis en las hojas maduras incluso con bajos niveles de NaCl .

Figura 76.

Necrosis foliar por salinidad del suelo.



Fuente: Sinc, 2008.

Factores que afectan la disolución de las sales. (1) EFECTO DE LA SAL O DE LA FUERZA IÓNICA. La adición de una sal inerte (NaCl) puede incrementar la solubilidad de un compuesto iónico (CaSO_4). (2) EL INCREMENTO DE LA FUERZA IÓNICA AFECTA EL PH EFECTO DEL ION COMÚN. Una sal es menos soluble si alguno de los constituyentes iónicos ya está presente en la solución.

Recuperación de suelos halomórficos La recuperación de un suelo con exceso de sales (ACUMULACIÓN DE SAL EN EL HORIZONTE SUPERFICIAL) se consigue utilizando materia orgánica, pues el lavado no cambia el pH; El uso de materia orgánica favorece el drenaje del suelo; una de cuidar el cultivo cuando el suelo el que se ha establecido desarrolló una acumulación salina, es lavando con agua corriente las raíces superficiales de la planta.

SUELOS SÓDICOS O DE ÁLCALI

Los **suelos de álcali** o **sódicos** contienen más del 15% de Na intercambiable y un $\text{pH} > 8.5$ (en comparación con la mayor parte de los suelos agrícolas normales que normalmente tienen menos del 1% de sodio intercambiable). El sodio adsorbido favorece la formación de grandes agregados en el suelo.

Las características más importantes de los suelos sódicos son:

1. MALAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CAPA ARABLE. El exceso de Na^+ no permite que las partículas se unan fácilmente. Como resultado el suelo es disperso, poco friable, muy duro, con manchas de aspecto aceitoso si están húmedos (si es arcilloso) y presenta serias dificultades, seco o húmedo, durante el laboreo; son comunes una pobre germinación y crecimiento de las plántulas.

Figura 77.

Suelo sódico.



Fuente: Aimetta, 2018.

2. SUPERFICIE DE COLORES OSCUROS O CLAROS. Muchos coloides del suelo pueden flotar sobre el agua y acumularse cuando el líquido se evapora, entonces, la superficie del suelo adquiere una coloración oscura ("ÁLCALI NEGRO"), cuando las partículas son, principalmente, humus, y más clara ("ÁLCALI BLANCO") cuando las

partículas dispersa son arcillas y arenas; las sales se observan como una capa cuando la superficie se seca.

3. GRANDES POROS DEL SUELO. Permiten la penetración del agua y pueden taponarse cuando se dispersa la arcilla y el humus, y, el subsuelo puede secarse a pesar de que el agua se puede encontrar, abundantemente, sobre la superficie; las plantas sufren un fuerte estrés.

Figura 78.

Textura del suelo sódico.



Fuente: Econadzor, 2019.

4. LOCALIZACIÓN. Se encuentran a menudo en partes bajas y planas de valles o cuencas desecadas, o de inundación temporal y se forman luego de muchos años. Figuran un problema especial de manejo. El efecto de la sodicidad de los suelos afecta la mayor parte de las plantas. Los suelos de álcali tienen muchas características en común con los suelos salinos, por esta razón, a menudo, suelen confundirse. Sin embargo, sus diferencias pueden y deben identificarse para recurrir a la solución más adecuada de sus problemas respectivos.

La saturación de Na^+ tiene lugar cuando el suelo entra en contacto con soluciones que presentan un alto valor de la relación de la concentración de los iones Na^+ con respecto a los cationes divalentes. Tal condición se presenta bajo un proceso de concentración de la solución del suelo que es por un proceso de SALINIZACIÓN. La

sodificación puede acelerarse si una parte considerable de los aniones del sistema consiste en sulfatos, ya que la solubilidad del CaSO_4 es limitada, mientras que la del Na_2SO_4 es muy alta. Este efecto indirecto de los aniones en la sodificación se manifiesta con más severidad si el agua para riego tiene cantidades enormes de carbonatos. Estos, reconocidos por sus altos valores de pH en agua, tienen que ser carbonatos y/o bicarbonatos de iones alcalinos (usualmente Na^+), ya que la solubilidad de los CaCO_3 y MgCO_3 es muy baja a estos valores de pH.

Los suelos sódicos tienden a exhibir propiedades físicas muy desfavorables, especialmente a bajos niveles electrolíticos de la solución del suelo. Si el contenido de arcillas es alto el suelo muestra propiedades de expansión y contracción excesivas al humectarse o secarse, respectivamente, mientras que en suelos francos y arenosos la estabilidad de la estructura del suelo es fuertemente reducida. Las propiedades de aireación y drenaje de estos suelos son insatisfactorias y, puesto que la recuperación y rehabilitación de los suelos salinos y sódicos implica el uso de procedimientos de lavado o lixiviación, lo cual favorece la presencia de dificultades al tratar de mejorar químicamente estos suelos sin dañar sus condiciones físicas.

Cómo provocan alcalinidad las sales.



Recuperación de suelos sódicos:

Para recuperar suelos en estado de sodicidad se implementan diversas técnicas, a continuación se mencionan: (1) El uso de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ con calcio soluble), pues el Ca^{2+} , sustituye el Na^+ del suelo y evita que el Na^+ y el Cl^- se transporten al follaje. (2) Lavado del suelo (elimina el Na^+ sustituido por el Ca^{2+} soluble). (3) Aplicaciones de MO. (4) Mejoramiento del drenaje.

ACIDEZ DEL SUELO

La acidez del suelo mide la concentración de H^+ . En los suelos los H^+ están en la solución, pero también en el complejo de cambio, o sea hay dos tipos de acidez, ACTIVA O REAL (en solución) y DE CAMBIO O DE RESERVA (para los adsorbidos). Ambas están en equilibrio dinámico. Si se eliminan H^+ de la solución se liberan otros tantos H^+

adsorbidos. Como consecuencia el suelo muestra una fuerte resistencia a cualquier modificación de su pH, está fuertemente tamponado.

Los factores que hacen que el suelo tenga un determinado valor de pH son diversos, fundamentalmente: (1) NATURALEZA DEL MATERIAL ORIGINAL. Según que la roca sea de reacción ácida o básica. (2) FACTOR BIÓTICO. Los residuos de la actividad orgánica son de naturaleza ácida. (3) PRECIPITACIONES. Tienden a acidificar al suelo y desaturarlo al intercambiar los H^+ del agua de lluvia por los Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ de los cambiadores. (4) COMPLEJO ADSORBENTE. Según que está saturado con cationes de reacción básica (Ca^{2+} , Mg^{2+}) o de reacción ácida (H^+ o Al^{3+}). También dependiendo de la naturaleza del cambiador variará la facilidad de liberar los iones adsorbidos.

Cuadro 33.

Principales factores y fuentes de acidez en los suelos.

<i>Fuentes de acidez en el suelo</i>	
<i>Fenómeno</i>	<i>Reacciones y Observaciones</i>
<i>Nitrificación</i>	$NH_4^+ + 2O_2 \Rightarrow NO_3^- + H_2O + 2H^+$
<i>Descomposición MO</i>	$R-COOH \Rightarrow R-COO^- + H^+$
<i>Respiración</i>	$CO_2 + H_2O \Rightarrow H_2CO_3 = H^+ + HCO_3^-$
<i>Lluvia ácida</i>	$SO_2 + OH \Rightarrow H_2SO_4 \Rightarrow SO_4^{2-} + 2H^+$ $NO_2 + OH \Rightarrow HNO_3 \Rightarrow NO_3^- + H^+$
<i>La absorción de Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^+ por plantas</i>	Quema de combustibles fósiles, lo que libera SO_2 y NO_x a la atmósfera.
<i>Lixiviación de cationes básicos</i>	Son fuente de OH^- al suelo, pero la planta los toma y los iones H^+ son liberados en la solución del suelo. $Ca^{2+} + 2H_2O \Rightarrow Ca(OH)_2 + 2H^+ \Rightarrow Ca^{2+} + 2OH^-$ El H^+ y Al^{3+} intercambiables. El Al^{3+} es más soluble con pH bajo. $Al^{3+} + H_2O \Rightarrow Al(OH)^{2+} + H^+$ $Al(OH)_2^+ + H_2O \Rightarrow Al(OH)_2^+ + H^+$ $Al(OH)_2^+ + H_2O \Rightarrow Al(OH)_3 + H^+$
<i>Fertilización</i>	$NH_4SO_4 \Rightarrow H_2SO_4$

Acidez del suelo y crecimiento de las plantas. La acidez del suelo es un tipo de estrés ambiental que limita el crecimiento de los cultivos. Estos suelos se encuentran dispersos por amplias zonas del mundo (casi 40% de las tierras agrícolas). La lluvia

ácida también acidifica de los suelos. El Al^{3+} se hace soluble en suelos con bajo pH y es el principal factor de toxicidad de plantas en suelos con pH muy bajo.

Suelos ácido-sulfatados. Cuando la pirita (FeS_2), en el subsuelo de los sedimentos en estuarios es expuesta al aire, se oxida y forma H_2SO_4 . Son muy ácidos (pH abajo de 3.0). De gran impacto en ingeniería civil, productividad agrícola y calidad del agua en los sistemas de los estuarios. Una variedad de minerales del suelo reacciona con el ácido y forman aluminio libre, tóxico a los cultivos y a la vida marina.

POTENCIAL DE OXIDACIÓN-REDUCCIÓN

LAS CONDICIONES DE OXIDACIÓN-REDUCCIÓN DEL SUELO SON DE GRAN IMPORTANCIA PARA PROCESOS DE METEORIZACIÓN, FORMACIÓN DE DIVERSOS SUELOS Y PROCESOS BIOLÓGICOS, TAMBIÉN ESTÁN RELACIONADAS CON LA DISPONIBILIDAD DE CIERTOS ELEMENTOS NUTRITIVOS. La formulación química de las reacciones de oxidación-reducción es la siguiente:



En el suelo existe un equilibrio entre los agentes oxidantes y reductores. La MO se encuentra reducida y tiende a oxidarse, es reductora, ya que al oxidarse tiene que reducir a otros materiales del suelo. Por el contrario, el O_2 es oxidante. Por otra parte, hay muchos elementos químicos que funcionan con valencias variables, pudiendo oxidarse o reducirse según el ambiente que predomine. En suelos normales el ambiente es aireado y por ello la tendencia general es oxidante. Los valores de pH y POTENCIAL REDOX (MEDIDAS EH) delimitan los campos de estabilidad de los materiales del suelo. Los compuestos de Fe y Mn son muy sensibles a cambios de pH y Eh.

Los procesos de oxidación reducción envuelven a elementos que pueden actuar con diferentes valencias y entre ellos tenemos: Fe, Mn, S, N. Algunos ejemplos de procesos de oxidación en el suelo son: (1) oxidación del Fe^{+2} de minerales primarios en Fe^{+3} formando óxidos e hidróxidos; (2) la transformación de Mn^{+2} en Mn^{+4} ; (3) la oxidación de S^- , por ejemplo, de pirita, en sulfatos; (4) la nitrificación o sea la transformación de NH_4 en nitritos y nitratos.

Por el contrario, muchos procesos suceden bajo condiciones reductoras como la desnitrificación, la desulfuración, la formación de compuestos Fe^{+2} y Mn^{+2} . En los suelos hidromorfos la saturación en agua tiende a provocar un ambiente reductor.

LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

¿Qué es la MO del suelo? La MO del suelo ha sido definida como la fracción orgánica del suelo constituida por residuos de origen animal o vegetal no descompuestos, sin embargo, para los laboratorios de análisis de suelos la MO incluye sólo aquellos materiales orgánicos que acompañan a las partículas del suelo cuando este es pasado por un tamiz de 2 mm. Restos descompuestos o en descomposición de plantas, animales y microorganismos.

Características de la MO. EL C ORGÁNICO es el principal componente de la MO del suelo. Consta de células de microorganismos, residuos de origen animal y vegetal en diferentes estados de descomposición, humus estable sintetizado de residuos y algunos compuestos inertes altamente carbonizados como carbón vegetal, carbón mineral y grafito. Presenta numerosos componentes como: azúcares simple, carbohidratos, y proteínas, de fácil descomposición, además de ligninas, grasas y ceras de alteración muy lenta. Los materiales resistentes permanecen en el suelo y ocasionan una coloración oscura al generar el humus, el cual continúa descomponiéndose a una velocidad menor.

Constituyentes orgánicos. Son un conjunto complejo de sustancias constituidas por restos vegetales y organismos que están sometidos a un constante proceso de transformación y síntesis. El contenido de MO del suelo depende del tipo de vegetación original, la textura del suelo, el drenaje del terreno, el tiempo de cultivo, los métodos de laboreo y el grado de erosión. El contenido de MO del suelo ha sido utilizado como un indicador de la productividad del suelo pues se relaciona directamente con la liberación de N y otros nutrimentos.

Restos de animales y plantas: materia muerta, mucha de la cual se descompone liberando nutrientes y alguna porción se incorpora al humus. Restos orgánicos frescos (tejidos vegetales y animales), productos excretados por los organismos, productos de descomposición y compuestos de síntesis. El concepto de MO del suelo se refiere a la fase muerta, pero en la práctica se incluyen también a los microorganismos vivos dada la imposibilidad de separarlos del resto de material orgánico transformado

Humus. PORCIÓN DE LA MO QUE PERMANECE DESPUÉS DE LA BASE INICIAL DE DESCOMPOSICIÓN. De color oscuro, amorfo, químicamente estable. Se define como MO transformada y alterada. Forma un conjunto muy complejo de compuestos orgánicos coloidales oscuros sometidos a

un constante proceso de transformación. Dentro de él se definen un grupo de sustancias húmicas. Es una mezcla de compuestos complejos y no se trata de un material simple. Estos compuestos son (a) materiales resistentes (b) compuestos sintetizados más tejido microbiano. Es una compleja y resistente mezcla de color pardo a pardo oscuro, arfa y con sustancias coloidales que han sido modificadas del tejido original o han sido sintetizadas por varios organismos del suelo.

Propiedades del humus: (1) ALTAMENTE COLOIDAL. (2) AMORFO [NO CRISTALINO]. (3).INTERCAMBIO DE CATIONES. CIC. 150-300 me/100 gr; Arcilla 8-100 me/100 gr. (4). ABSORCIÓN DE AGUA DE LA ATMÓSFERA SATURADA. 80-90%; Arcilla 15-20%

Importancia de la MO del suelo. La importancia de la MO en el suelo es suministrar nutrimentos (N, P, S, Cu, Zn, B, etc.), contribuir a incrementar la CIC, mejorar la estructura del suelo, adecuar las recomendaciones de N, S, Cal, pesticidas y todo tipo de abono orgánico. Los suelos con un adecuado contenido de MO (3 - 6%) pueden tener una mejor estructura y además una mejor resistencia a la compactación e incrementar la capacidad de retención de agua, y la CIC. Los niveles aprovechables de los nutrimentos son afectados por el proceso de descomposición de la MO. Esta transformación depende de la aireación y de la humedad, y crece al crecer la temperatura del suelo y con la labranza del terreno.

La MO del suelo almacena nutrimentos, principalmente N, que son aprovechados por los microorganismos que descomponen tales materiales orgánicos, liberando CO₂ y favoreciendo el retorno de dichos nutrimentos al suelo. La MO del suelo se desarrolla por combinación de C, O₂, N, S y otros nutrimentos. Además, retiene humedad para las plantas, pues, se sabe que, a cada unidad porcentual de MO pertenece un aumento de 1.5% en la capacidad de acopio de agua aprovechable por los vegetales. Aumentando la cantidad de MO, viva o muerta, favorece el proceso de infiltración, pues esta protege los agregados del suelo y evita su ruptura durante la caída de las gotas de lluvia, lo que puede provocar la obstrucción de los poros del suelo con el consecuente encharcamiento del terreno. Un terreno bajo cultivo continuo puede presentar una disminución paulatina de MO y una necesidad cada vez mayor de N.

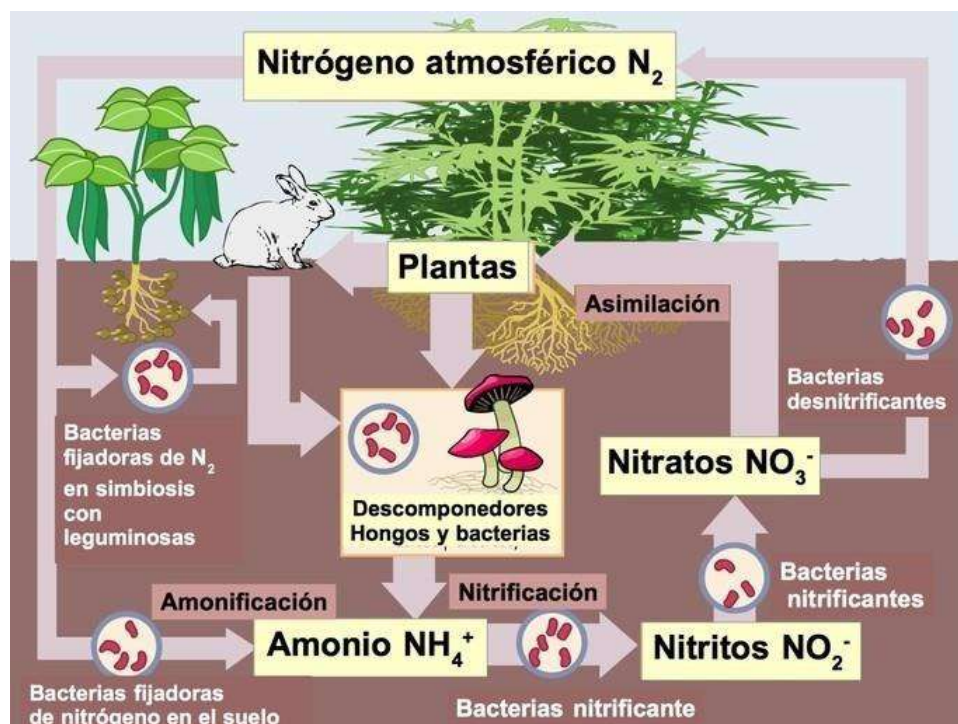
La MO del suelo hace al suelo más friable, menos viscoso y más fácil de trabajar; retiene el C de la atmósfera o de otras fuentes; reduce los efectos ambientales negativos de los pesticidas, metales pesados y otros contaminantes; disminuye,

también el endurecimiento en los horizontes superficiales reduce el encostramiento, aumenta la tasa de infiltración de agua, reduce el escurrimiento, y facilita la penetración de las raíces de las plantas.

Beneficios de la MO del suelo: (1) Proporciona nutrientes. (2) Incrementa la capacidad de intercambio catiónico o CIC. (3) Mejora la estructura del suelo. (4) Aumenta la infiltración de agua. (5) Mejora la capacidad de retención de agua en el suelo. (6) Promueve la capacidad amortiguadora del pH del suelo. (7) Evita el agotamiento de nutrientes. (8) Controla la excesiva acidez del suelo. (9) Modifica la capacidad de laboreo del suelo y lo hace más laborable. (10) Puede funcionar como una superficie de acolchado. (11) Controla la erosión. (12) Evita la proliferación de malezas. (13) Reduce evaporación y (14) Puede también proveer secuestrantes o “FORMADORES DE QUELATOS” que mejoran la adquisición de micronutrientes por las plantas.

Figura 79.

Ciclos biogeoquímicos del suelo.



Fuente: Zita, s.f.

Propiedades físicas. Confiere al suelo un color oscuro. Da lugar a una buena estructura (estable). Las sustancias húmicas tienen un poder aglomerante, las cuales se unen a la fracción mineral y dan buenos flóculos al suelo originando una estructura grumosa estable, de alta porosidad lo que aumenta la permeabilidad. Tiene gran

capacidad de retención de agua lo que facilita el crecimiento de las plantas, además los restos vegetales y animales depositados en la superficie del suelo lo protegen de la erosión hídrica y eólica. La temperatura del suelo es mayor debido a que los colores oscuros absorben más radiaciones que los claros. El humus tiene un poder aglomerante y da agregados. Protege al suelo de la contaminación. La MO adsorbe plaguicidas y otros contaminantes y evita que estos percolen hacia los acuíferos.

Figura 80.

Capa húmica del suelo.



Fuente: Universidad agrícola, s.f.

Propiedades químicas y fisicoquímicas. Las sustancias húmicas tienen propiedades coloidales, debido a su tamaño y carga (EL HUMUS FAVORECE UNA BUENA ESTRUCTURA DEL SUELO, RETIENEN AGUA, SE HINCHAN, CONTRAEN, FIJAN SOLUCIONES EN SUPERFICIE, DISPERSAN Y FLOCULAN E INFLUYE EN EL ESTADO DE DISPERSIÓN/FLOCULACIÓN DEL SUELO).

- i. **CIC.** El humus forma coloides que contribuyen a incrementar la CIC. Fija iones de la solución del suelo, los cuales quedan débilmente retenidos, están en posición de cambio y evita por tanto que se produzcan pérdidas de nutrientes en el suelo. La CIC es de 3 a 5 veces mayor a la de las arcillas, y por tanto una buena reserva de nutrientes.
- ii. **pH.** Produce compuestos orgánicos que tienden a acidificar el suelo. Es un agente de alteración por su carácter ácido. Descompone los minerales.

Propiedades biológicas. Contiene C, que es una fuente de energía para los microorganismos del suelo. Provee alimento para una diversa población de microorganismos benéficos y ayuda a evitar la dominancia de patógenos. Almacena nitrógeno, que es aprovechado por los microorganismos que descomponen tales materiales orgánicos, liberando CO_2 y favoreciendo el retorno de dichos nutrimentos al suelo. Es descompuesta por los microorganismos que la usan como alimento y estos la usan en combinación con el O_2 para formar CO_2 intercambiando este gas por O_2 . Este intercambio de gases se ve disminuido cuando el suelo está saturado con agua, lo que a su vez genera una baja en la descomposición de la MO.

Cantidad y distribución de M.O. del suelo. La cantidad total de componentes orgánicos en el suelo muy rara vez supera el 10%, pero, es muy importante en términos de la nutrición vegetal, pues debido a su enorme cantidad de área superficial, puede reaccionar con varios constituyentes del suelo y ejercer una gran influencia sobre las propiedades químicas y físicas del suelo, ya que estabilizan la estructura del suelo, reducen la compactación del terreno e impiden el encostramiento del terreno, mejoran su capacidad buffer y aumentan los sitios de intercambio de cationes. La MO proporciona nutrimentos además de mejorar, considerablemente, algunas propiedades físicas del suelo como la estructura. Se sabe que hasta un 90% del nitrógeno total del suelo está contenido en la MO y se puede considerar como una medida indirecta de la cantidad total de dicho elemento, al mismo tiempo que un indicador de la fertilidad del terreno. Altos niveles de MO en el suelo son recomendables, pues aparte de los beneficios referidos influye en la efectividad y las tasas de aplicación de muchos pesticidas en el suelo.

Se sabe que hasta un 90% del N_{total} del suelo está contenido en la MO y se puede considerar como una medida indirecta de la cantidad total de dicho elemento, al mismo tiempo que un indicador de la fertilidad del terreno. Altos niveles de MO en los suelos son recomendables, pues aparte de los beneficios referidos influye en la efectividad y las tasas de aplicación de muchos pesticidas en el suelo.

La cantidad de MO está controlada por un balance entre las adiciones de materiales de origen vegetal y animal y las pérdidas por descomposición. Ambos factores, a su vez son fuertemente dependientes de las actividades de manejo. Otros factores importantes de control son: la temperatura del aire y la fertilidad del suelo. La salinidad

y otros elementos químicos tóxicos pueden, igualmente, limitar la producción de biomasa vegetal. También pueden influir la intensidad de la luz solar, el contenido de CO₂ en la atmósfera y la humedad relativa.

Con base en un suelo seco, la MO del suelo puede llegar a promediar, aproximadamente, 3% de N, lo que simboliza 600 lb/acre (672.511 kg/ha) por cada unidad porcentual de MO. Una MO altamente descompuesta (humus) tiene un contenido de N más bajo. La proporción de C orgánico en la MO del suelo es muy variable de un suelo a otro y cualquier factor más o menos constante, es sólo una aproximación. Se sabe que los subsuelos tienen un factor más alto (2.5) que los suelos superficiales (1.8 a 2.0). La preferencia es reportar el C orgánico más que convertir éste a MO por medio del uso de un factor aproximado de corrección.

El contenido de MO del suelo depende del tipo de vegetación original, la textura del suelo, el drenaje del terreno, el tiempo de cultivo, los métodos de laboreo y el grado de erosión. El humus tiene un contenido de N más bajo. El valor de MO del suelo se ha usado como indicador de la productividad del suelo pues se relaciona rectamente con la liberación de N y otros nutrimentos. Los cultivos continuos reducen el nivel de MO del suelo, lo que obliga a realizar aplicaciones de N y otros nutrimentos.

El C orgánico es el principal componente de la MO del suelo. Consiste en células de microorganismos, residuos de origen animal y vegetal en diferentes estados de descomposición, humus estable sintetizado de residuos y algunos compuestos inertes altamente carbonizados como carbón vegetal, carbón mineral y grafito.

Los contenidos son muy variables. Valores usuales oscilan de 0.5 - 10%. Se concentra en el horizonte superficial y decrece gradualmente con la profundidad (a excepción de ciertos tipos de suelos, como podsoles, turbas y fluvisoles). En suelos de pradera el contenido en MO es mayor que en los de bosque y alcanza niveles más profundos.

En la cantidad y calidad de la MO intervienen numerosos factores: (1) Material orgánica original (cantidad, calidad, edad y tamaño de los restos); (2) Características del suelo (microorganismos, nutrientes, pH, aireación y minerales) y (3) Clima (humedad, temperatura y alternancias climáticas).

EVOLUCIÓN DE LOS CONSTITUYENTES ORGÁNICOS

La **humificación** ES EL PROCESO DE FORMACIÓN DEL HUMUS. LA TRANSFORMACIÓN PUEDE LLEGAR A LA DESTRUCCIÓN TOTAL DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS DANDO LUGAR A PRODUCTOS INORGÁNICOS SENCILLOS COMO CO_2 , NH_3 , H_2O , ETC., Y SE HABLA DEL PROCESO DE **mineralización**. LA HUMIFICACIÓN ES RESPONSABLE DE LA ACUMULACIÓN DE MO EN EL SUELO MIENTRAS QUE LA MINERALIZACIÓN CONDUCE A SU DESTRUCCIÓN. En la transformación de los restos orgánicos se pueden diferenciar tres etapas sucesivas.

- i. TRANSFORMACIÓN QUÍMICA INICIAL. Alteración que sufren los restos vegetales antes de caer al suelo. Las hojas son atacadas por los microorganismos, en el mismo árbol, y ocurren importantes transformaciones en su composición y estructura. Consiste en pérdida de sustancias orgánicas y elementos minerales P, N, K, Na.
- ii. ACUMULACIÓN Y DESTRUCCIÓN MECÁNICA. La hojarasca, ramas, tallos y raíces se acumulan sobre el suelo y se van destruyendo mecánicamente por la acción de los animales que reducen su tamaño, lo mezclan con la fracción mineral y lo preparan para la posterior etapa.
- iii. ALTERACIÓN QUÍMICA. Se produce una intensa transformación de la MO y su mezcla e infiltración en el suelo. Los restos orgánicos pierden rápidamente su estructura celular y se alteran a un material arfo que va adquiriendo un color cada vez más negro, con una constitución y composición distintas de los originales. Poco a poco los restos transformados se van desintegrando, difuminándose en el suelo y se integran totalmente con la fracción mineral.

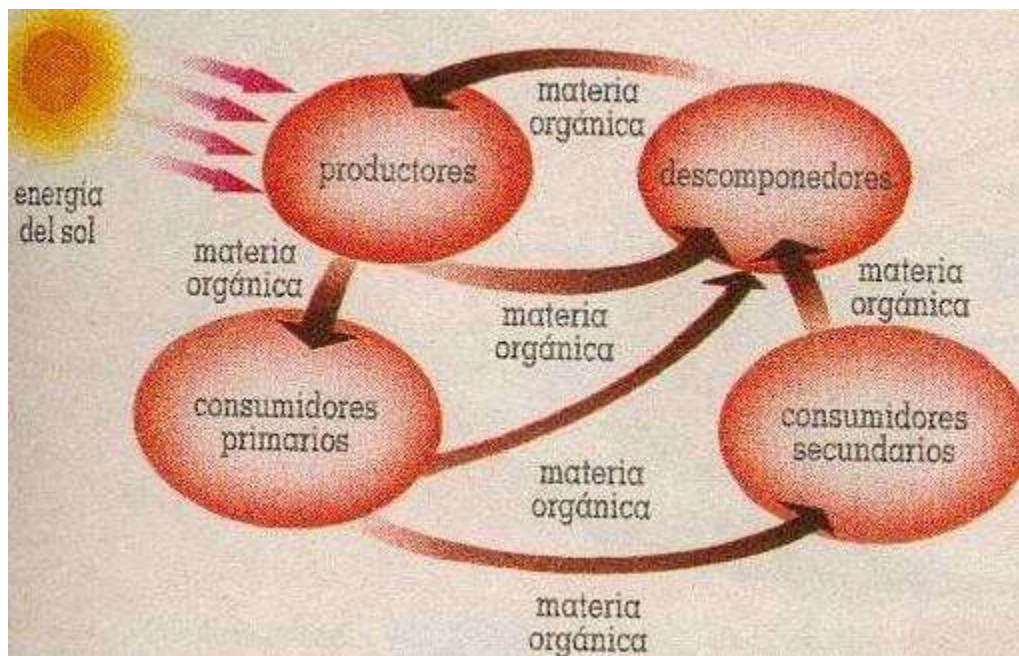
El papel microbiano es decisivo para el desarrollo de estos procesos. Los microorganismos necesitan del C como fuente de energía (oxidán el C y lo devuelven a la atmósfera como CO_2) y el N para incorporarlo a su protoplasma y ambos los toman de los restos vegetales. El C en los restos vegetales es muy abundante (50 - 58%). El N es elemento minoritario, por él entran en competencia las raíces de las plantas y los microorganismos, por lo que puede ser un factor limitante.

Los restos orgánicos se transforman muy rápido comparados con la fracción mineral, por ello la velocidad de formación del HA es mayor que la del HB. La velocidad de descomposición depende del tipo de resto vegetal aportado y del medio. El fin de todos los compuestos orgánicos del suelo es su mineralización y su destrucción. Pero muchos compuestos son muy estables para permanecer en cantidades suficientes en

los suelos (su descomposición se compensa con los aportes). Los compuestos húmicos pueden tener una vida media de cientos a miles de años.

Figura 81.

Ciclo de la materia orgánica.



Fuente: Ministerio de educación, s.f.

La MO está constituida de numerosos componentes tales como: AZÚCARES SIMPLES, CARBOHIDRATOS, Y PROTEÍNAS, todos ellos de **fácil descomposición**, además de LIGNINAS, GRASAS Y CERAS de **alteración muy lenta**. Los materiales resistentes permanecen en el suelo y ocasionan una coloración oscura al generar el humus, el cual continúa descomponiéndose a una velocidad menor.

LA **HUMIFICACIÓN** se desarrolla en tres fases:

1. **DEGRADACIÓN DE LA MOLÉCULA.** Las macromoléculas de los restos orgánicos (celulosa, almidón, pectina, lignina, proteínas, glucosa, grasas, ceras, etc.) se fragmentan a formas sencillas y cortas. Los polímeros se transforman en monómeros (despolimerización enzimática o humificación directa).
2. **OXIDACIÓN DE LOS COMPUESTOS AROMÁTICOS.** Hay formación de quinonas.
3. **CONDENSACIÓN, POLIMERIZACIÓN Y FIJACIÓN DE N.** Se forman aminoácidos y péptidos, para originar ácidos húmicos. En esta fase los compuestos orgánicos sencillos formados en la etapa anterior se reorganizan, conservando sus

estructuras orgánicas para dar nuevos polímeros más estables (polimerización biológica o humificación indirecta). Es imprescindible la actuación de las bacterias. Puede haber factores limitantes (ausencia de agua, baja temperatura, acidez, carencia de N, encharcamiento permanente, etc.

Sustancias húmicas. Grupos heterogéneos de composición indeterminada clasificados en base a su comportamiento frente a determinados reactivos (según sean solubles o precipiten). El humus al tratarlo con una serie de reactivos extractantes se separa en una serie de fracciones. A cada fracción extraída se le da un nombre. Mediante los reactivos alcalinos (NaOH), se separan las HUMINAS (que son insolubles) de los ÁCIDOS FÚLVICOS Y HÚMICOS, que son solubles. Estos últimos se separan mediante tratamiento ácido (HCl); los ÁCIDOS FÚLVICOS SON SOLUBLES EN HCL mientras que LOS HÚMICOS SON INSOLUBLES.

Ácidos fúlvicos. Compuestos sólidos o semisólidos, amorfos, amarillentos, de naturaleza coloidal, fácilmente dispersables en agua y no precipitables por los ácidos, susceptibles en cambio de experimentar floculación en determinadas condiciones de pH y concentración de las soluciones de cationes no alcalinos.

Autores como (Climent, et al., 1990), mencionan que “los ácidos fúlvicos tienen un efecto positivo sobre muchas funciones de la planta, a nivel de células y órganos”.

Ácidos húmicos. Se presentan como sólidos amorfos de colores marrón oscuro, insolubles en agua y en casi todos los disolventes no polares, pero muy dispersables en soluciones acuosas de los hidróxidos y sales básicas de los metales alcalinos, constituyendo un hidrosol que puede experimentar floculación mediante el tratamiento de los ácidos o los demás cationes. Su molécula parece estar constituida por un núcleo de naturalezas aromáticas condensadas, y de una región cortical con mayor predominio de radicales alifáticos.

Es posible relacionar el “efecto estimulante de los ácidos húmicos y los fulvoácidos en la formación de raíces al acelerar la diferenciación del punto de crecimiento” (Julca, *et al.*, 2006).

Huminas. Los compuestos húmicos no extraíbles con reactivos alcalinos constituyen un grupo de sustancias relativamente diferentes entre sí, cuyo origen puede tener lugar mediante la vía de herencia o la de neoformación.

Tipos de humus. Desde un punto de vista global (evolución, morfología, propiedades, unión a la fracción mineral) el material orgánico se clasifica en tres tipos básicos de humus: (1) MOR. MO muy poco transformada. (2) MODER. Mayor transformación de la MO (Fúlvicos y precursores) y (3) MULL. MO evolucionada (ácidos húmicos, coloración del horizonte muy oscura).

Complejos organominerales. Es notable la facilidad con la que la MO tiende a unirse con la fracción mineral, en particular con cationes, arcillas y óxidos de Fe y Al, formando complejos organominerales cuyas características se relacionan con la mayor parte de las propiedades físicas y fisicoquímicas de los suelos.

Adición de MO al suelo. El contenido de MO del suelo puede ser incrementado por adiciones de composta, residuos de cosecha, estiércoles, abonos verdes, etc. Es importante que la fuente de MO esté libre de plagas, patógenos y semillas de malezas, y que, además, sea baja en sales solubles.

Riesgos de la adición de MO. Se sabe que una sola fuente de nutrientes es insuficiente para suplir las necesidades del cultivo durante los períodos de alta demanda. Es difícil predecir la velocidad y el tiempo de liberación de los nutrientes. Hay un tipo de “LIBERACIÓN LENTA DEL FERTILIZANTE” Puede contener sales (estiércol), acidez (compostas), metales pesados y patógenos (lodos residuales), o compuestos alelopáticos (algunas compostas)

Materiales y desechos orgánicos:

1. ESTIÉRCOL. Promedio (25% C, 3% N, 0.8% P, 2.5% K) en base a peso seco. La composición de nutrientes es baja, por lo que se agrega en ton/ha. No todos los nutrientes se liberan en el primer año (quizá 50 a 80%). Es una buena fuente de K. La concentración de sales puede ser alta. Conviene comprobar los valores de Na^+ .
2. COMPOSTA. El material vegetal que ha sido apilado y sometido a una descomposición parcial microbiana. El grado de composteo puede variar. Usado como una fuente de nutrientes y acondicionador del suelo. Inicialmente tiene muy alto contenidos de C (> 40%), lo que puede provocar inmovilización de N y P del suelo, pero también proporciona un mejoramiento de las características físicas de la capa arable del suelo. La composición de

nutrimentos es baja, por lo cual se agrega en ton/hectárea. No todos los nutrientes se liberan en el primer año, quizá de 50 a 80%. Requiere humedad, calor, aireación, nutrientes adecuados.

3. LODOS RESIDUALES O BIOSÓLIDOS. Similar en propiedades al estiércol. En una buena enmienda para el suelo para cultivos no comestibles (cultivos textiles, pastos, ornamentales, forestales, etc.) y para mejoramiento de "tierras disturbadas". Con relación a los patógenos y a los metales pesados si en usado en cultivos alimenticios, especialmente, sobre todo a largo plazo. El composteo puede eliminar muchos de los patógenos de riesgo. Al igual que el estiércol, la composición nutrimental es variable (4% N, 2% P y 0.4% K). No todos los nutrientes son liberados en el primer año.
4. RESIDUOS DE LOS PROCESOS AGROINDUSTRIALES (residuos de vinatería, de la industria de la caña de azúcar, de las empresas jugueras, de la industria linera, etc.). Pueden ser buenas fuentes de nutrientes o buenos acondicionadores del suelo, dependiendo de la relación C/N del material. Relativamente pocos riesgos, pero la transportación limita su uso a ciertos tipos de producción.

Determinación de la MO del suelo. Como el C orgánico es el principal componente de la M.O. del suelo, el valor del C es una determinación indirecta de la MO. Los valores de C orgánico son multiplicados por el "FACTOR DE VAN BEMMELEN" de 1.724 para calcular la MO. La mayoría de las rutinas de determinación son indirectas; miden el C del suelo y a partir de este valor estiman el contenido de MO. Las determinaciones de MO. están basadas en dos métodos fundamentales:

1. Pérdida de peso o remoción del material orgánico de la fracción mineral (oxidación con H_2O_2 , ignición o ignición después de la descomposición de silicatos con HF).
2. Determinación de algunos constituyentes que se encuentran en un porcentaje constante en la MO el suelo como N y C.

Las tres principales técnicas para determinar el contenido de MO. en los suelos se indican a continuación:

(1) MÉTODO DE WALKLEY-BLACK que supone que un 77% de C es oxidado a través de la técnica empleada y que la MO. del suelo contiene 58% de C.

(2) DETERMINACIÓN COLORIMÉTRICA DE LOS IONES DE Cr^{3+} PRODUCIDOS.

(3) PÉRDIDA DE PESO POR IGNICIÓN CON Cr_2O_7 .

Usos de los residuos de cosechas. Alimento para animales, Pesebres, industria del almacenamiento de alimentos, fibra, material de construcción, biogas, mejoramiento del suelo.

En parcticas agrícolas como la labranza cero se aprovechan las propiedades de los residuos de la anterior cosecha para evitar la erosión del suelo, además de aprovechar su capacidad para devolver los nutrientes al suelo en forma de materia orgánica,

Figura 82.

Labranza cero



Fuente: Traxco, 2013.

¿A dónde va la MO? Erosión, viento, agua, respiración (CO_2 , descomposición) CO_2 , Retorno como productos de almacenamiento.

¿Puede ser modificado? Selección de cultivos, especies, rotación o secuencia de cultivos, uso del cultivo (grano, forraje, pastoreo).

RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO

Una importante propiedad de los residuos orgánicos que influyen la inmediata disponibilidad del N es la relación C/N. La adición de un abono orgánico puede proveer C que puede servir como fuente de energía a los microorganismos del suelo. El residuo no sólo incrementará la actividad microbiana sino también el N que necesitan los microorganismos. Los microbios usan el C para fabricar nuevas células y el N para sintetizar proteínas.

Cuando la MO se descompone, una porción de su N es liberada y es disponible para las plantas (MINERALIZACIÓN). La relación C/N da un indicio de la disponibilidad del N en el material de la cubierta y su ritmo de descomposición. La MO puede contener hasta el 95% del N total del suelo y los microorganismos pueden llegar a utilizar altas cantidades de este elemento para sus actividades vitales. Se sabe que los microbios requieren de un átomo de N por cada 25 átomos de C, lo que significa una relación C/N de 25:1. Así, si la MO tiene una alta relación C/N, los microorganismos necesitan más N del que existe en los componentes orgánicos del terreno y se ven en la necesidad de tomar el elemento, directamente del suelo. Los microorganismos son más eficientes que los cultivos en obtener N del suelo.

Si no existe suficiente cantidad del elemento para ambos protagonistas, sólo los microorganismos podrán desarrollarse. Así, si se aplica al suelo MO con un alto valor de C/N en un período muy cercano a la siembra del cultivo, se requerirá un suministro adicional de N para satisfacer las necesidades microbianas y de las plantas cultivadas. Por otra parte, materiales orgánicos con una relación C/N menor de 25:1 no representan problemas y, en algunos casos, podrán aportar N para uso del cultivo. Si el residuo orgánico tiene una relación C/N menor que 20:1 (alto contenido de N), entonces los microorganismos obtendrán el N adecuado para sus necesidades y convertirán el exceso de N orgánico en amonio (NH_4^+). Esta conversión es llamada MINERALIZACIÓN y es sintetizada en la siguiente ecuación:



El amonio es una forma de N que las plantas pueden absorber (el N orgánico no puede ser utilizado por las plantas).

La pérdida de N aprovechable para las plantas es llamada INMOVILIZACIÓN y se representa a través de la siguiente ecuación:



La INMOVILIZACIÓN puede impedir el aprovechamiento de NO_3^- y NH_4^+ durante varios meses. Después de este tiempo, el N puede liberarse por mineralización del N orgánico encontrado en los tejidos de los residuos orgánicos. Debido a que se precisa una cantidad adicional de N para una población microbiana en expansión, la adición de materiales con alta relación C/N puede ocasionar una deficiencia temporal de N.

Si el material orgánico tiene una relación C/N mayor de 20:1 (bajo contenido de N), entonces los microorganismos que aumentan su actividad debido a la adición de C no obtendrán suficiente N del material orgánico. Los residuos vegetales leñosos y fibrosos son altos en su relación C/N si se comparan con sus derivados (humus). Si se acumula MO, el contenido de N asimilable por la planta será bajo. Mucho del C se pierde por formación de CO_2 en los procesos de fermentación de la MO, éste pasa a la atmósfera o queda diluido en el agua del suelo; en condiciones favorables, se fija el N atmosférico; con estos mecanismos se obtiene una relación C/N óptima que en los suelos cultivables alcanza un cociente de 10 a 12; en el subsuelo las relaciones son menores porque existen pocos residuos en descomposición.

La transformación gradual de los residuos orgánicos en MO estable (humus) permite el establecimiento de una relación C/N consistente. Otros factores que pueden estar implicados en bajar los valores de la relación C/N incluyen la fijación química de NH_4^+ o aminas por medio de ligninas.

En general las relaciones C/N son elevadas en las cubiertas forestales y disminuyen a medida que avanza la descomposición. En el trópico es común encontrar valores bajos debido a que la actividad microbiana es alta por las elevadas temperaturas. Algunos valores muy bajos de C/N en el trópico, se deben a que el N se encuentra en forma interlaminar (en minerales), es decir, el amonio está atrapado entre dichas laminillas. Los suelos con grandes cantidades de ilitas o vermiculitas pueden "FIJAR" o atrapar altas cantidades de N comparados con los suelos en los que abundan las esmécticas o caolinitas. Puesto que el C orgánico de muchos suelos disminuye con la profundidad, mientras que el nivel de N "FIJADO" permanece constante o aumenta, la

relación C/N se reduce. El potencial para "FIJAR" N que presentan muchos terrenos tiene importancia en la fertilidad de los suelos.

Una relación C/N alta, indica, que los residuos orgánicos no son descompuestos eficientemente. Así, suelos con relación de 15 a 25 y con regular contenido de M.O. en la superficie, indican poca asimilación de la MO por los suelos. Relaciones de 25 a 40 o mayores nos indican que la MO no está siendo transformada. Si la hojarasca es alcalina las condiciones del suelo son buenas porque hay mayor actividad microbiana. Si las relaciones C/N son de 12 a 18 se dice que la MO y el humus están maduros. Si los valores son altos se señala que la MO está cruda, es decir que los productos son todavía restos poco alterados. Solamente después de que el contenido de C de ciertos materiales orgánicos reduce a una relación inferior a 20/1 puede quedar disponible gran cantidad de N para las plantas superiores.

Los residuos orgánicos con una relación C/N de 20:1 o menores tienen N suficiente para suministrar N necesario a los microorganismos responsables de la descomposición de dichos materiales. Los residuos vegetales con una relación C/N de 20:1 a 30:1 suministran N suficiente para la descomposición, pero no lo suficiente para ser utilizado por las plantas. Materiales orgánicos con una relación C/N mayor de 30:1 se descomponen lentamente porque carecen de N suficiente para la reproducción y la acción microbiana, por lo cual se requiere el suministro de N mineral adicional en forma de fertilizante nitrogenado.

En los suelos superficiales y en las capas superiores de sedimentos lacustres y marinos se ubica en los límites de 10 a 12. En la mayor parte de los suelos, la relación C/N disminuye con la profundidad, en la capa superficial, alcanza valores de 5. Los suelos no cultivados tienen valores de relación C/N más altos que los suelos agrícolas. La relación C/N de suelos vírgenes formados bajo pastizales es más baja que la de los suelos que se han desarrollado bajo vegetación forestal; igualmente, se puede indicar que los valores de C/N en las capas de humus de los suelo forestales es más alta que en el suelo mineral. Variaciones en la relación C/N pueden servir de indicador de la cantidad de N inorgánico de un suelo.

Figura 83.

Relación Carbono- Nitrógeno de distintos materiales.

Relaciones C:N de distintos materiales	
Material	C/N
Biomasa microbiana	8:1
Materia orgánica	10:1
Trébol blanco (joven)	12:1
Centeno verde	36:1
Paja de cereales	70:1
Restos de maíz	80:1
Restos de soja	25:1

Fuente: Universidad Nacional de Mar del plata, 2014.

IMPORTANCIA Y SIGNIFICANCIA DE LA BIODIVERSIDAD DEL SUELO

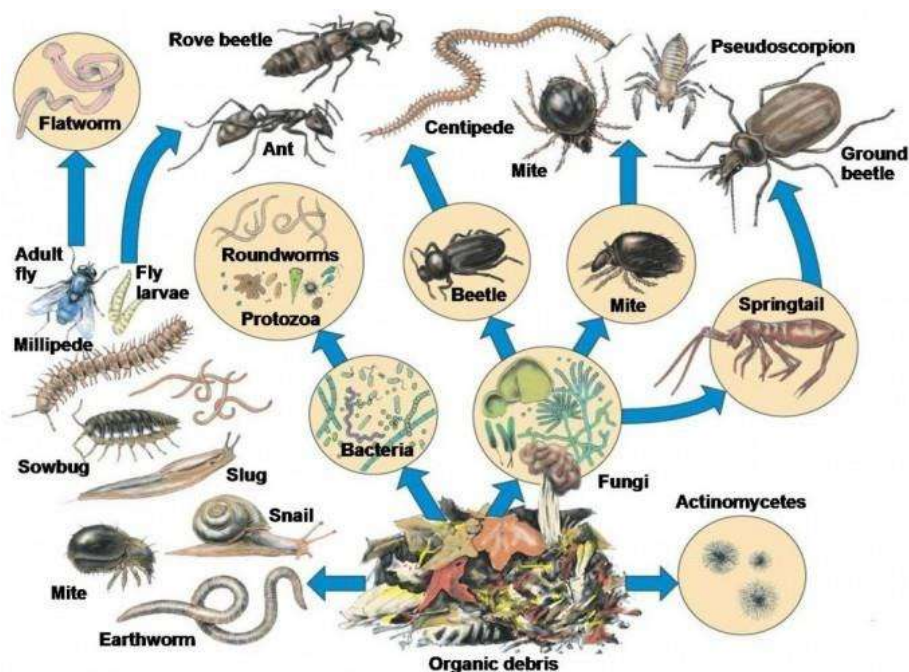
En el suelo de los ecosistemas poco intervenidos y de los agroecosistemas, existe una vasta maquinaria bioquímica que tiene un papel fundamental en el ciclo de la materia y en el flujo de energía. Esta maquinaria está integrada por miles de colonias y poblaciones de entidades biológicas que van desde los organismos procarióticos hasta una megafauna, cuya intervención en la descomposición o degradación de la materia es fundamental, ya que sirven de intermediario entre los organismos autótrofos y heterótrofos superiores. No obstante, en el suelo también existen microorganismos autotróficos fotosintéticos y quimiosintéticos. Además de intervenir en la descomposición y reciclaje de la materia orgánica, los organismos del suelo también juegan un importante papel en los ciclos de la materia inorgánica, al ser actores indispensables en los ciclos biogeoquímicos. Las cadenas y redes alimenticias están compuestas por organismos **AUTÓTROFOS** o **PRODUCTORES**, que, en su mayor parte, son las plantas que producen sus propios alimentos por el proceso de la

fotosíntesis;“ los parásitos son obligados a descomponer a vegetales superiores o de los que han desarrollado una simbiosis obligada con determinadas plantas, como las micorrizas” (Julca, *et al.*, 2006) . La biomasa fijada por los organismos productores también es aprovechada por los **HETERÓTROFOS** o **CONSUMIDORES**, que a su vez pueden ser, primarios, secundarios, terciarios, según sea su nivel de participación en la fijación de biomasa. Al morir los organismos productores y consumidores, su materia es gestionada por los organismos **DESINTEGRADORES** o **DESCOMPONEDORES** que devuelven los materiales elementales para ser aprovechados nuevamente por las sucesivas generaciones de organismos. El suelo es el reactor donde se llevan a cabo las reacciones enzimáticas de descomposición de la materia y donde se regenera su fertilidad, siempre y cuando se mantenga la presencia de los organismos.

¡Existen billones en el suelo! Un puñado de suelo contiene más microorganismos que el número total de habitantes de la población mundial (> 6 billones o $> 1 \times 10^{12}$). Muchos organismos, pero con una masa total muy pequeña. Algunos causan detrimento: bacterias y hongos patógenos y nematodos parásitos. Sin embargo, mucha de la actividad de los microorganismos del suelo es benéfica, por lo cual se recomienda promover dicha actividad en el suelo.

Figura 84.

Organismos del suelo.



Fuente: Wix, 2019.

Se dice con insistencia que el suelo es un cuerpo vivo debido a la presencia de los organismos que se han adaptado a este sistema, y cuando la vida del suelo llega a agotarse o, por efecto de las actividades humanas, la vida desaparece, el suelo pierde todas sus propiedades productivas, y éste deja de cumplir su rol ecológico. Los actuales Sistemas de producción agrícola, que privilegian la obtención de altos rendimientos y poca atención le conceden al mantenimiento de la vida del suelo, son exagerados e irresponsables consumidores de fertilizantes de síntesis y sustancias químicas variadas que a corto plazo aniquilan a los organismos del suelo y lo contaminan a grados que los propios alimentos que se producen dejan de ser fuentes de satisfactores alimenticios seguros. La vida del suelo está sustentada por la presencia de una flora y una fauna, es decir, por una microflora integrada por bacterias, hongos y algas. También nos encontramos con una gran variedad de animales, que en su mayoría son artrópodos, los cuales han sido agrupados en microfauna, mesofauna y macrofauna.

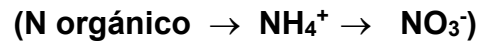
Descomposición de residuos de plantas y animales. Liberación de nutrientes y elementos inorgánicos los cuales alimentan a la planta y causan intemperismo mineral. Síntesis de nuevos compuestos orgánicos. Formación de humus para incrementar el intercambio de cationes y mejorar la estructura. Fijación de nitrógeno

Clasificación de los organismos del suelo por Reino. REINO PROTISTA (BACTERIAS; incluye ACTINOMICETOS y ALGAS CIANOFCÉAS o CIANOBACTERIAS, estas últimas sólo relevantes en suelos inundados o muy húmedos). REINO MONERA (PROTOZOARIOS Y ALGAS). REINO FUNGI (HONGOS). REINO PLANTAE (PLANTAS). REINO ANIMALIA (ANIMALES).

BACTERIAS. Las bacterias son microorganismos procariotas, es decir, sin núcleo definido ni orgánulos. Estos organismos se clasifican de muy variadas maneras. Las hay, GRAM POSITIVAS Y GRAM NEGATIVAS, AEROBIAS Y ANAEROBIAS, O AUTOTRÓFICAS Y HETEROTRÓFICAS.

REINO PROTISTA (BACTERIAS). Las bacterias intervienen de una manera especial en las funciones del suelo: decomponedoras, fijadores de nitrógeno, nitrificantes, oxidadoras de azufre y un pequeño número de especies son detrimentales (patógenas).

1. **Bacterias descomponedoras.** Numerosas especies de bacterias descomponen la materia orgánica del suelo. Secretan enzimas extracelulares.
2. **Bacterias nitrificantes.** CONVIERTEN EL AMONIO EN NITRATO ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$). Después de aplicar fertilizantes amoniacales como sulfato de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, etc. Estado final de descomposición ocurre así:



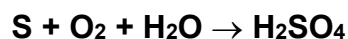
Bacterias que usan compuestos de nitrógeno como fuente de energía:

a. **Nitrosomas.** OXIDAN EL AMONIO A NITRITO: $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$

b. **Nitrobacter.** OXIDAN NITRITO A NITRATO: $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$

Poca o nula actividad con pH por debajo de 6.0. Poca o nula actividad a 65°F

3. **Bacterias autotróficas oxidadoras de azufre (*Thiobacillus*).** utilizan como sustratos a compuestos AZUFRADOS COMO, EL ÁCIDO SULFÚDRICO (H_2S), AL AZUFRE ELEMENTAL (S^0) y AL TIOSULFATO ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) PARA TRANSFORMARLOS EN SULFATO (SO_4^{2-}). OXIDAN EL AZUFRE DEL SUELO (S^0) A SULFATO (SO_4^{2-}). Se aplica azufre al suelo como acidificante que requiere de esta oxidación.



3. Por su parte, las **bacterias autotróficas oxidantes del hierro** UTILIZAN AL HIERRO FERROSO (Fe^{2+}) y LO TRANSFORMAN A HIERRO FÉRRICO (Fe^{3+}).

Las **bacterias autotróficas** obtienen su energía a partir de sustratos minerales y el Carbono del CO_2 de la atmósfera del suelo, mientras que las bacterias heterotróficas obtienen su energía de los materiales orgánicos de los productores u organismos autótrofos vivos o muertos. La gran mayoría de las **bacterias heterotróficas** son **organismos saprófitos**, es decir, que su alimento es, preponderantemente, la materia orgánica en descomposición y participan en su degradación, y solo unas cuantas especies de estas bacterias son FITOPATÓGENAS, lo que significa que viven de tejidos de plantas vivas y les causan enfermedades.

En condiciones anaeróbicas, ciertas especies de bacterias se especializan en la **desnitrificación**, o sea, LA CONVERSIÓN DE NO_3^- A FORMAS AMONIACALES (NH_3 y NH_4^+).

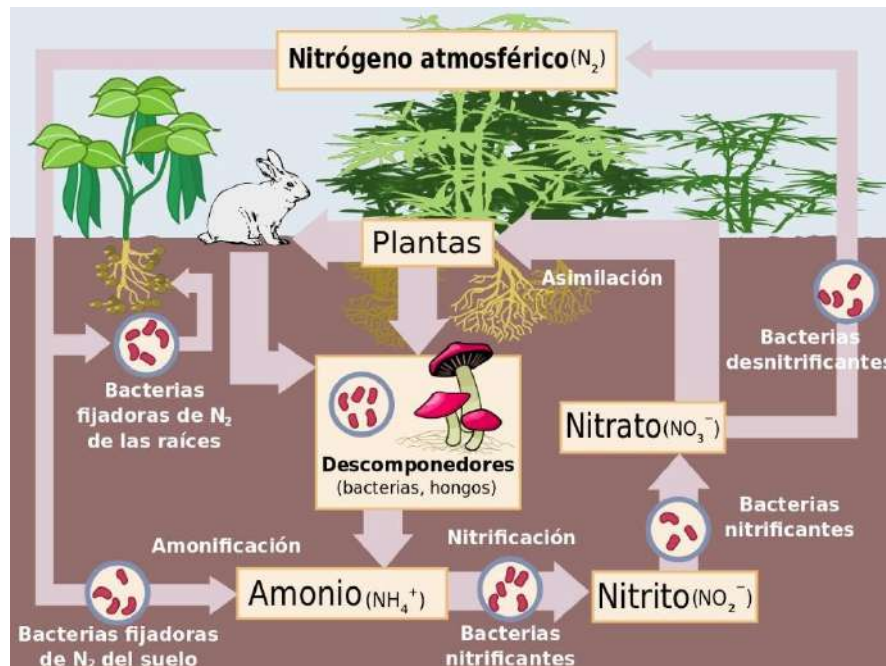
FIJACIÓN BIOLÓGICA DE N₂. Cerca de 79% de nuestra atmósfera es nitrógeno. Las plantas y los animales no pueden usar el N₂ como nitrógeno celular. Sólo los procariontes pueden fijar N₂. Existen bacterias heterotróficas llamadas fijadoras de nitrógeno que son capaces de asimilar el nitrógeno atmosférico (N₂) e incorporarlo al suelo a formas asimilables por las plantas y otros organismos. Existen BACTERIAS HETEROTRÓFICAS FIJADORAS DE NITRÓGENO LIBRES Y SIMBIÓTICAS; LAS SIMBIÓTICAS MÁS CONOCIDAS SON LAS DEL GÉNERO RHIZOBIUM PORQUE SON CAPACES DE TENER UNA RELACIÓN DE SIMBIOSIS CON LAS RAÍCES DE PLANTAS DE LA FAMILIA DE LAS LEGUMINOSAS. Esta relación simbiótica consiste en que las bacterias colonizan las raíces de plantas leguminosas formando nódulos donde estos microorganismos encuentran albergue y sustancias nutritivas, pero pagando su alquiler proporcionando nitrógeno a las plantas. Esta relación es benéfica tanto para las plantas como para las bacterias; sin duda una forma de cooperación natural tan sorprendente como efectiva. Las bacterias autotróficas generalmente oxidan sustratos inorgánicos específicos de nitrógeno, azufre o hierro para obtener su energía y son capaces de captar el CO₂ atmosférico, descomponerlo y aprovechar su carbono para incorporarlo a sustancias orgánicas. Las más estudiadas son las bacterias autotróficas nitrificantes, las cuales participan en la OXIDACIÓN DE COMPUESTOS COMO EL AMONÍACO (NH₃⁺) Y SU FORMA IÓNICA, EL AMONIO (NH₄⁺) PARA CONVERTIRLOS A FORMAS ASIMILABLES COMO LOS NITRATOS (NO₃⁻). Esta transformación requiere de una serie de reacciones enzimáticas donde participan de forma concertada varias especies de estas bacterias. REQUIERE NITROGENASA (COMPLEJO ENZIMÁTICO ANAERÓBICO). REQUIERE ATP COMO FUENTE ENERGÉTICA. PRODUCEN UNA FORMA DE N QUE ES FÁCILMENTE INCORPORADO POR LAS PLANTAS.

En condiciones anaeróbicas, ciertas especies de bacterias se especializan en la **desnitrificación**, o sea, LA CONVERSIÓN DE NO₃⁻ A FORMAS AMONIACALES (NH₃ y NH₄⁺).



Figura 85.

Ciclo de fijación del nitrógeno.



Fuente: Ferreyra, 2016.

Bacterias fijadoras de nitrógeno (*Rhizobium*). LAS BACTERIAS SIMBIÓTICAS ASOCIADAS CON RAÍCES DE LEGUMINOSAS (alfalfa, frijol, soya, chícharo), FIJAN NITRÓGENO ATMOSFÉRICO (N_2) Y ASÍ, ESAS PLANTAS REQUIEREN MUCHO MENOS FERTILIZANTE NITROGENADO.

1. **Fijación de nitrógeno en nódulos de la raíz.** Asociación mutualista de la planta y las bacterias. La planta forma un nódulo en forma de turmo en las raíces de las plantas leguminosas. Al interior del nódulo los bacteroides convierten N_2 en NH_3 . Permiten un mayor control sobre el N_2 por la planta y el bacteroide.

Figura 86.

Raíces con bacterias fijadoras de nitrógeno.



Fuente: Portales, 2016.

- 2. Pasos en la formación de los nódulos de la raíz.** Las bacterias de vida libre se mueven hacia la raíz por medio de la quimiotaxis. *Rhizobium* convierte el triptofano en ácido indolacético, produce exoenzimas que reblandecen la pared celular y permiten que la bacteria penetre en el pelo radicular. La penetración induce al núcleo del pelo radicular a codificar para un tubo de infección, y de esa manera conducir al rhizobio al interior de la raíz. El tubo de infección estimula la formación de un nódulo. La transición de *Rhizobium* al estado de bacteroide (no tiene gran crecimiento fuera del hospedero). La leghemoglobina conduce O₂ al interior del nódulo. El control de la distribución de O₂ es vital porque el sistema nitrogenasa debe permanecer reducido. La función he es codificada por el *Rhizobium*. La función globina es codificada por la planta

Relación simbiótica entre pastos y *Azospirillum*/*Azotobacter*. FIJACIÓN DE N₂ POR BACTERIAS DE VIDA LIBRE: *Azospirillum* (MICROAERÓFILO) Y *Azotobacter* (AEROBIO). Ambos usan los exudados de la raíz como fuente de energía y carbono celular. Pueden fijar más de 40 kg N₂ hectárea/año (8.6×10^{26} moléculas de N₂).

Bacterias filamentosas (actinomicetos-*Frankia*). Son microorganismos unicelulares. Son transicionales entre las bacterias y los hongos. Efecto del pH del suelo (sensibles a suelos ácidos, sin actividad con un pH abajo de 5.0, óptima actividad entre 6.0-7.5). CONSUMIDORES HETEROTRÓFICOS, DESCOMPONEN LA MO Y EL HUMUS Y LIBERAN NUTRIENTES, ESPECIALMENTE NITRÓGENO; FORMAN NH₃. El género ***Frankia***, el cual se ASOCIA SIMBIÓTICAMENTE con ***Casuarina***, ***Alnus*** y otras ESPECIES FORESTALES, FIJA N₂.

Cuadro 33.

Principales organismos fijadores de N₂ atmosférico.

<i>Endosimbionte</i>	<i>Hospedero</i>
<i>Rhizobium leguminosarum</i>	<i>Vicia</i> spp. (veza), <i>Pisum</i> (chícharo), frijol (<i>Phaseolus</i> spp.)
<i>Rhizobium trifolii</i>	<i>Trifolium</i> spp. (trébol)
<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	<i>Glycine</i> spp. (soya), <i>Parasponia</i> spp.
<i>Sinorhizobium meliloti</i>	<i>Medicago</i> spp. (alfalfa)
<i>Azorhizobium</i> spp.	<i>Sesbania</i> spp. (en raíces y tallos)
<i>Mesorhizobium</i> spp.	<i>Lotus</i> spp.
<i>Azotobacter</i> spp., <i>Azospirillum</i> spp.	Gramíneas (en raíz y follajes)
<i>Frankia</i> spp. (actinomiceto)	<i>Alnus</i> spp. (aile), <i>Casuarina</i> spp.
<i>Nostoc</i> spp. (cianobacteria)	<i>Gunnera</i> spp.
Otras cianobacterias (exosimbióticas)	Diatomeas, hepáticas, helechos, Cícadadas, líquenes.

RIZOBACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL (PGPR).

Recientemente se han estudiado un grupo de géneros y especies de bacterias que se han aislado de la rizosfera de suelos de selvas y bosques que se ha descubierto que favorecen el crecimiento vegetal debido a que al interactuar con las raíces de las plantas: (1) PRODUCEN HORMONAS VEGETALES PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL. (2) SOLUBILIZAN LOS FOSFATOS INORGÁNICOS Y LOS HACEN MÁS ASIMILABLES. (3) AUMENTAN LA DISPONIBILIDAD DE FE. (4) PRODUCEN ANTIBIÓTICOS Y

SUSTANCIAS QUE INDUCEN RESISTENCIA A AGENTES PATÓGENOS. Estas especies de bacterias cada vez más se están utilizando en la agricultura moderna como activadores del suelo, mejoradores de la fertilidad y biopesticidas.

Bacillus thuringiensis (Bt). Esta especie de bacteria se ha utilizado ampliamente en la agricultura ya que naturalmente produce una proteína que sirve como toxina contra insectos de los órdenes LEPIDÓPTERA, COLEÓPTERA y DÍPTERA, que a su vez son plagas agrícolas que producen enormes daños a los cultivos a nivel mundial. Al principio se logró aislar la toxina y producirla para la formulación de bioinsecticida inocuos a ser humano y amigables con el ambiente. Hace pocos años, se logró transferir los genes que codifican la producción de la toxina de la bacteria a los mismos cultivos, así surgieron los cultivos Bt, que son organismos genéticamente modificados (OGM).

REINO MONERA (ALGAS). Plantas diminutas fotosintéticas que se pueden encontrar en la superficie de los suelos, aunque en muy baja proporción. Las algas verde azules o cianofíceas son muy importantes en los suelos húmedos. Fijan nitrógeno en los arrozales anegados. Llevan oxígeno al agua. En el ecosistema del suelo, las algas son los microorganismos autótrofos que habitan en los microporos del suelo y en las películas de agua que los recubren de suelos de bosque y selva. Son abundantes en medios acuáticos, sin embargo, las podemos encontrar en climas áridos y semiáridos en asociación con cianobacterias, hongos filamentosos y levaduras formando costras criptobióticas. Las algas del suelo se clasifican en: ALGAS VERDES, ALGAS VERDE-DORADO, ALGAS ROJAS y DIATOMEAS. Al aprovechar la sílice del medio que las rodea, algunos géneros de algas forman exoesqueletos, y son llamadas DIATOMEAS. En los ecosistemas terrestres, las diatomeas se producen principalmente en suelos neutros a ligeramente alcalinos, donde sus poblaciones pueden alcanzar importantes densidades.

REINO FUNGI. Los hongos son muy importantes en la descomposición de la materia orgánica. Las hifas secretan enzimas extracelulares para digerir la materia muerta. Organismos heterotróficos. Pueden tolerar un amplio rango de pH. Son abundantes en suelo ácidos donde las bacterias y los actinomicetos ofrecen sólo una muy limitada competencia. ACTIVIDADES DE LOS HONGOS: descomposición de residuos orgánicos, hongos patógenos que viven en el suelo y formación de micorrizas.

Los hongos son organismos pertenecientes al reino *FUNGI* que es un taxón muy amplio y diversificado, que va desde los hongos setas hasta un amplio espectro de microorganismos eucariotes que habitan dentro del suelo. Los hongos del suelo se caracterizan por su capacidad de degradar los compuestos más complejos de la materia orgánica, como la celulosa y la lignina. Con su amplio y poderoso arsenal de enzimas, son los microorganismos casi especializados en estos compuestos (algunas bacterias también pueden degradar la celulosa), iniciando la descomposición de los residuos de cosecha con una alta relación C:N, por ejemplo, y liberando materiales más simples de digerir para la acción de levaduras y bacterias y así completar el trabajo de mineralización.

LAS MICORRIZAS. Las micorrizas son hongos simbióticos con las raíces de plantas en suelos de bosques y selvas. A diferencia de las bacterias fijadoras de nitrógeno que forman nódulos, las micorrizas inoculan y penetran las raíces absorbentes y su micelio sale de éstas formando una suerte de extensiones radiculares que poseen una gran capacidad para la absorción de agua y la absorción selectiva de nutrientes como el N, P, K, Cu, Fe y Zn. Se trata de hongos simbióticos con las plantas, forman una “RAÍZ FUNGOSA”. SON ASOCIACIONES MUTUALÍSTICAS ENTRE HONGOS Y LAS RAÍCES DE LAS PLANTAS. Las plantas se benefician, especialmente en suelos de baja fertilidad. Mejoran la absorción de agua, P y Zn. Son muy importantes en plantas nativas. Los hongos llegan a estar, totalmente, integrados dentro de la estructura de la raíz. Ambos participantes se benefician. No se trata de una enfermedad

- a) **Ectomicorrizas.** El hongo forma una capa externa sobre la raíz y lo extiende hacia los espacios intercelulares (NO PENETRA LAS CÉLULAS INDIVIDUALES). Aproximadamente 40 μ de gruesas. La asociación con las raíces puede alcanzar hasta un 40% del peso seco del hongo. Se encuentran en la mayor parte de los árboles de los bosques templados. Los beneficios al hongo incluyen: acceso inmediato a los exudados de las plantas, beneficio directo de la actividad fotosintética de los árboles. Los beneficios al árbol incluyen: resistencia a la sequía, resistencia a los patógenos, aumento en la asimilación de nutrientes (PO_4 y K^+), incremento en la tolerancia a los cambios de pH y aumento en el crecimiento de la raíz. Las ectomicorrizas rodean una raíz y penetran en las células circundantes (reemplazan la lamela media entre las células). Los exudados de la raíz estimulan a los hongos. El

hongo puede ayudar en la absorción de nutrientes y agua; incrementan la resistencia radicular contra adversidades ambientales.

- b) **Endomicorrizas.** El micelio del hongo penetra entre las células y al interior de ellas. Se localiza en rododendros, laureles y orquídeas. El hongo participante *NO FIJA NITRÓGENO*, pero parece que incrementa la fijación de nitrógeno de otros microorganismos y a asimilación de este elemento por la planta. Las orquídeas son polinizadas durante la noche y algunos hongos micorrícicos son bioluminescentes (¿PUEDEN EJERCER UNA ATRACCIÓN SOBRE LOS INSECTOS?). La secuencia de rRNA de los hongos endomicorrícicos indica que la evolución de las plantas y de estos hongos tiene un origen muy semejante en el tiempo, lo anterior puede ser un indicador de una coevolución muy antigua.
- c) **Endomicorrizas Vesículo-Arbusculares (VA).** La más común de todas las asociaciones micorrícicas. Presentan una extensa red de micelio que se extiende hacia el suelo que rodea los pelos absorbentes de las (forma vesículas y estructuras arborescentes). El 90% de las plantas superiores, presentan estas asociaciones.

Figura 87.

Micorrizas para el crecimiento de raíces.



Fuente: Symborg, s.f.

LOS HONGOS ENTOPATÓGENOS. Ciertas especies de hongos originan sustancias que controlan poblaciones de plagas de nematodos o insectos de los cultivos y se han formulado en productos comerciales de seguros y ecológicos.

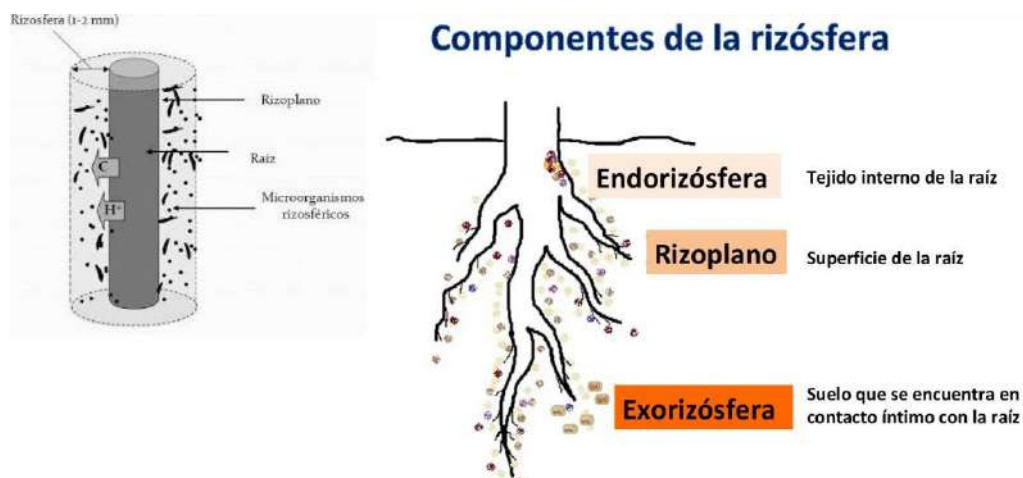
REINO PLANTAE. El sistema de raíces puede ser 30 a 50% del total de la masa vegetal. Es muy variable entre las especies. Al obtener una cosecha gran parte de las raíces quedan en el suelo. Las raíces vivas secretan: aminoácidos, proteínas, azúcares y polisacáridos (sirven como fuente de alimentos para los microorganismos). Los polisacáridos promuevan la formación de agregados en el suelo. LAS RAÍCES VIVAS TAMBIÉN SECRETAN: (1) ÁCIDOS ORGÁNICOS. Pueden ayudar a precipitar el aluminio soluble en los suelos ácidos y de esa manera el Al puede inhibir el crecimiento de las raíces. (2) SUSTANCIAS DE SEÑALIZACIÓN BIOQUÍMICA. Sirven para atraer Rhizobios para la fijación de N_2 u hongos micorrícicos para la adquisición de P y Zn.

CATEGORÍAS E IMPORTANCIA BIOLÓGICA DE LA RAÍZ

1. **Rizoplano.** La superficie de la raíz de la planta, con su gran superficie de exposición ($> 6 \text{ m}^2$ en promedio para una planta de trigo). Sólo 4-10% del rizoplano está en contacto directo con los microorganismos del suelo. Es una zona donde la actividad microbiana es intensa. El **rizoplano**, a su vez, está constituido por la superficie de la raíz de la planta. Se les llama microorganismos benéficos a los que favorecen el desarrollo de la planta con la que interactúan, lo que se refleja en su crecimiento, productividad y sanidad.
2. **Rizosfera.** El área del suelo influenciada directamente por las raíces de las plantas (extremadamente variable). El suelo que permanece después de sacudir las raíces. En la rizosfera hay abundancia de bacilos Gram - y Gram + y baja cantidad de cocos. Refleja la influencia de los exudados de las raíces de las plantas y la selección de organismos con altas tasas de crecimiento. Si bien todo el suelo puede estar colonizado por la flora y la fauna, existe una zona en las proximidades de las raíces de las plantas donde se encuentra una mayor densidad poblacional. Esta zona se denomina la rizosfera, la cual es un verdadero nicho ecológico donde hay un ambiente único y funcional debido a las complejas relaciones bióticas que solo aquí se dan, por lo que la vida en el suelo es el resultado de todo un trabajo de equipo perfectamente organizado.
3. **Rizobarrera.** Algunas plantas excretan un material de aspecto mucoso que actúa como agente cementante de los granos de arena alrededor de las raíces de las plantas. La mayor parte se presentan en suelos secos.

Figura 88.

Componentes de la rizósfera.



Fuente: Orozco, et al., 2019.

4. **Exudados de las raíces.** Aminoácidos (proteínas), cetoácidos (ciclo de ATC), vitaminas (cofactores enzima) y azúcares (carbono y energía). Las raíces son rodeadas por microorganismos activos que producen más exudados que las raíces que crecen en suelos esterilizados y tienen una gran interacción con la comunidad microbiana.
5. **Producción de hormonas de crecimiento.** La planta suministra exudados para los microorganismos, y éstos proporcionan hormonas de crecimiento para las plantas. Cuando la planta desarrolla cierta cantidad de exudados estos regulan paulatinamente la producción de hormonas de crecimiento. *Arthrobacter*, *Pseudonas*, *Agrobacterium*, viven sobre exudados de plantas y producen hormonas de crecimiento.

OTRAS INTERACCIONES BENÉFICAS DE LA RAÍCES. Las bacterias pueden producir sustancias que inhiben el crecimiento de las plantas competidoras, producen ácidos que disuelven la apatita [fluorofosfato de Ca - $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$] liberando P, agentes quelatantes que incrementan la solubilidad del Fe y del Mn. Se tiende a pensar que todas las bacterias son enemigos de las plantas, sin embargo, la mayor parte de las ocasiones esto no es verdad. En la mayor parte de los casos las plantas derivan un beneficio de una sana comunidad microbiana y participan en el mantenimiento de la comunidad.

REINO ANIMALIA LOS ANIMALES DEL SUELO (FAUNA DEL SUELO)

GRANDES ANIMALES EXCAVADORES (topos, perros de las praderas, conejos, tuzas y otros roedores). Mezclan y airean los suelos, también destruyen la vegetación. LOMBRICES DE TIERRA. Inician la descomposición de los restos vegetales y animales. Ingieren suelo y lo excretan como agregados estables en agua. ARTRÓPODOS (INSECTOS, ÁCAROS) Y GASTERÓPODOS (CARACOLES). NEMATODOS. Los predadores son benéficos. Se alimentan de hongos y bacterias del suelo. Los nematodos parásitos de las plantas dañan las raíces de los vegetales (“NEMATODO AGALLANTE”, “NEMATODO DORADO”) y representan problemas en muchos cultivos comerciales como fresa, maíz, soya, papa, jitomate, durazno, plátano, etc.

Los animales del suelo se pueden dividir en: MICROFAUNA, MESOFAUNA, MACROFAUNA Y MEGAFaUNA. En nuestro caso solo revisares los ejemplos más importantes de las primeras tres categorías, dejando de lado a la megafauna, ya que, aunque pueden vivir en el suelo, su papel en este sistema puede limitarse a la aportación de sus restos cuando mueren y varias especies de roedores representan plagas que atacan los cultivos.

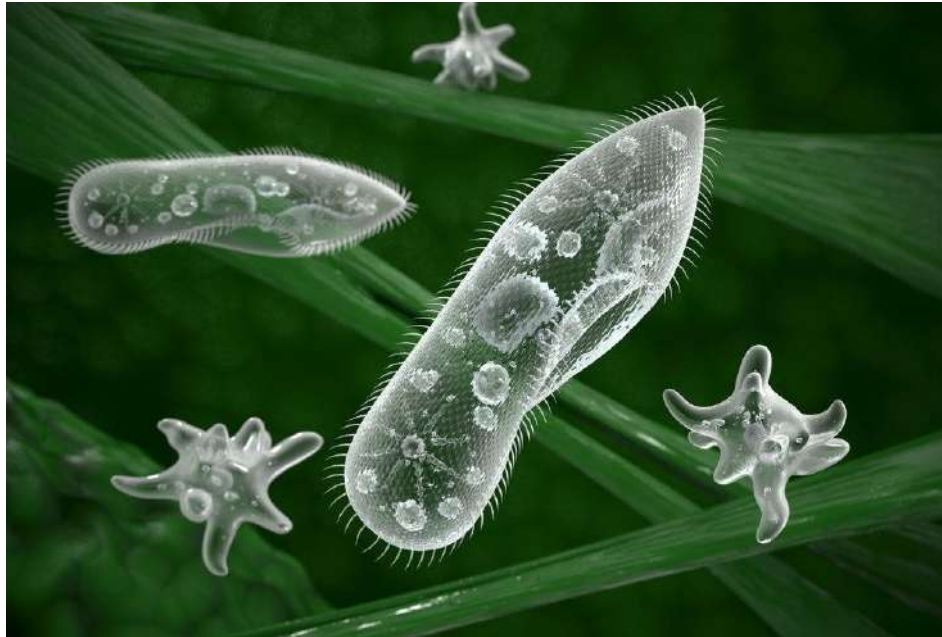
MICROFAUNA EDÁFICA

Los animales más estudiados pertenecientes a la microfauna del suelo son los PROTOZOOS O PROTOZOARIOS, ROTÍFEROS Y TARDÍGRADOS. Generalmente son animales microscópicos eucariotas que se alimentan de materiales orgánicos simples en descomposición, bacterias hongos y algas

1. **Protozoarios.** Los protozoos pertenecen a dos Phylum: *Sarcomastigophora* y *Ciliophora*. Se consideran cuatro grupos ecológicos: los FLAGELADOS, AMEBAS DESNUDAS, TESTÁCEOS y CILIADOS. Se reproducen asexualmente por fisión, o por singamia o fusión de dos células, o por medio sexual por la unión de núcleos haploides de dos individuos.

Figura 89.

Protozoos.

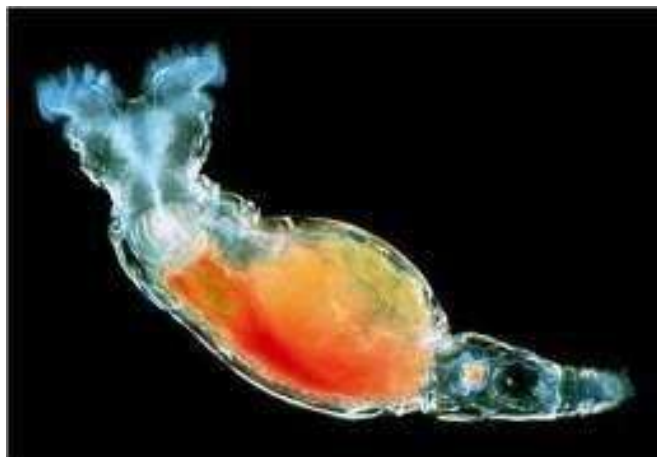


Fuente: Instituto europeo de química, física y biología, 2021.

2. **Rotíferos.** Los rotíferos se encuentran en la materia orgánica como la hojarasca en suelos de climas templado y frío. Al igual que los nematodos y tardígrados pueden adoptar un estado resistente desecado (anhidrobiosis) en cualquier etapa de su vida en respuesta al estrés ambiental. Cuando desaparece el estrés, se rehidratan y se activan nuevamente. Se alimentan de algas unicelulares y bacterias.

Figura 90.

Rotíferos.



Fuente: Coppedge, 2021.

3. **Tardígrados.** Los tardígrados del suelo pueden vivir en condiciones extremas, por lo que se consideran organismos extremófilos, y forman parte de las cadenas y redes tróficas del suelo al alimentarse de algas, bacterias, hongos, rotíferos, nematodos y otros invertebrados.

Figura 91.

Tardígrados.



Fuente: Carmena, 2019.

MESOFAUNA. La mesofauna del suelo está constituida principalmente por colémbolos, nematodos y enquitreidos, que son animales invertebrados de mayor tamaño que los que constituyen la microfauna.

1. **Colémbolos.** Los colémbolos los podemos encontrar en cualquier tipo de suelo. Un metro cuadrado de suelo forestal puede contener cientos de miles de individuos que representan a miles de especies. Se llegan a alimentar de nematodos, pero sobre todo de individuos de la microfauna, pero a su vez, son alimento de arañas, escarabajos, hormigas y ciempiés; puenteando así una conexión trófica entre la microfauna y la macrofauna.
2. **Nematodos.** Son organismos multicelulares que se encuentran en cualquier ecosistema. Se ha estimado que cuatro de cada cinco animales en el suelo, son nematodos. De manera similar a los protozoarios, rotíferos y tardígrados, los nematodos viven en las películas de agua o espacios ocupados por el agua en los suelos. La forma de su cuerpo es cilíndrica y estrecha en los

extremos y tienen un sistema digestivo complejo que consiste en un estoma o estil, faringe (o esófago), intestino y recto. Los nematodos tienen una amplia gama de hábitos alimenticios, desde los que se alimentan de bacterias y hongos, los que son fitófagos (parásitos de plantas), hasta depredadores de otros animales y omnívoros.

3. **Enquitreidos.** Los enquitreidos son organismos oligoquetos de la familia Enchytraeidae. Es un grupo de pequeños gusanos sin pigmentar (blancos) y consta de unas 600 especies en 28 géneros. Especies de 19 de estos géneros se encuentran en el suelo, el resto se desarrollan en otros hábitats. Es frecuente encontrarlos en suelos de bosques húmedos de climas templados ricos en materia orgánica, pero también han sido encontrados en regiones semiáridas y tropicales. Los enquitreidos son típicamente de 10 a 20 mm de longitud y son anatómicamente similares a las lombrices de tierra, a excepción de la miniaturización. Estos animales pueden ingerir partículas minerales y orgánicas del suelo, aunque se ha observado que se alimentan de materiales vegetales finamente divididos a menudo enriquecidos con colonias de bacterias o hifas de hongos, los que representan su dieta principal. Los tejidos microbianos son probablemente la fracción más fácilmente asimilable ya que los enquitreidos carecen de las enzimas intestinales para digerir materia orgánica más recalcitrante.

Figura 92.

Enquitreidos.



Fuente: Fonseca, 2015.

MACROFAUNA EDÁFICA

La macrofauna del suelo está constituida de poblaciones de muchas especies de animales cuyos cuerpos van desde unos 10 mm a 15 cm. Esta categoría se compone de arañas, miriápodos, ciempiés, milpiés, cigarras, etapas larvales de escarabajos, las lombrices de tierra, las hormigas y las termitas. Los últimos tres grupos de animales parecen tener mayor presencia y actividad en el suelo.

1. **Lombrices de tierra.** Las lombrices de tierra son los animales de la macrofauna que mayor influencia tienen en la dinámica del suelo. La importancia de las lombrices de tierra radica en su influencia en la formación de agregados y agregados, y por lo tanto en la estructura del suelo, y en su participación en la descomposición de la materia orgánica. Las lombrices se consideran indispensables agentes formadores del suelo y en la descomposición y distribución de la materia orgánica. Las lombrices de tierra se clasifican en el Phylum Annelida y en la Clase Oligochaeta. Las especies de las Familias Lumbricidae y Megascolecidae son ecológicamente las más importantes en América del Norte, Europa, Australia y Asia. Algunas de estas especies han sido introducidas a todo el mundo por la acción humana y ahora dominan la fauna de lombrices en muchas zonas templadas. Estos animales son considerados co los ingenieros ecosistémicos por su papel en la transformación de la materia orgánica en materiales húmicos y sustancias estabilizadoras de la estructura del suelo.
2. **Hormigas.** Las hormigas son artrópodos de la Familia Formicidae que se distribuyen ampliamente en los ecosistemas árticos, tropicales y desérticos. Alrededor de un tercio de la biomasa animal de la selva amazónica está compuesta por hormigas y termitas, donde cada hectárea puede contener más de 8 millones de hormigas y 1 millón de termitas. Además, las hormigas tienen un gran impacto en los ecosistemas, ya que son los principales depredadores de pequeños invertebrados. En las zonas desérticas, donde la densidad de lombrices de tierra es baja, las hormigas mueven grandes cantidades de suelo con un nivel de agregación importante.
3. **Termitas.** Junto con las lombrices de tierra y las hormigas, las termitas son el tercer grupo de invertebrados que encontramos en el suelo. Si bien las termitas se distribuyen principalmente en las regiones tropicales, también

podrían estar presentes en zonas templadas. Las termitas de familias primitivas como, Kalotermitidae, poseen una flora intestinal abundante en protozoarios, lo que les permite digerir la celulosa. Los miembros de la familia Termitidae no tienen simbiosis protozoarios, pero poseen en su intestino una formidable variedad de bacterias y hongos. Existen tres grupos de especies de termitas de acuerdo con sus hábitos alimenticios: las que se alimentan de la madera, las que se alimentan de humus y las que cultivan hongos. Estas últimas carecen de simbiosis en sus intestinos y dependen del hongo cultivado para su nutrición. Algunos géneros de termitas tienen, en su flora intestinal, bacterias fijadoras de nitrógeno en cantidades del orden de 0.7 a 21 g de N al día por gramo de peso fresco.

Condiciones favorables para la actividad microbiana. (1) Encalado del suelo pH < 6. (2) Reducir la fumigación o esterilización del suelo (a veces puede ser usado, también, para eliminar malezas). (3) Mantener un alto nivel de materia orgánica en el suelo. (4) Humedad del suelo (cerca a capacidad de campo). (5) Buena aireación. (6) pH cercano a la neutralidad. (7) Alto contenido de nutrientes. (7) Temperatura del suelo cercana a 30° C (86° F). (8) Evitar condiciones adversas del suelo (acidez, salinidad, etc.).

Beneficios de las interacciones planta/microorganismos. Los microorganismos actúan también realizando muchas funciones benéficas en los suelos de tal forma que actualmente hay intención para manejar los suelos incrementando la actividad y la diversidad microbiana. Pocas veces es factible inocular el suelo con microorganismos benéficos, excepción hecha para *Rhizobium* o micorrizas. Cuando se exportan plantas nativas, a veces se incluye suelo nativo (con organismos benéficos). Las interacciones involucran las raíces de las plantas.

LABRANZA DEL SUELO

IMPORTANCIA DE LA LABRANZA DEL SUELO. La existencia del hombre se basa en la satisfacción de necesidades biológicas para su permanencia y reproducción. Ello lo ha obligado a la búsqueda continua de esos satisfactores y por consecuencia al enfrentamiento del hombre con la naturaleza. Durante el desarrollo de la humanidad, la relación productiva entre sociedad y naturaleza se ha basado en una serie de conocimientos generados y acumulados en el proceso de la práctica productiva

(conocimiento empírico) que ha dado como resultado una técnica de producción característica; otros mecanismos para generar conocimientos, basados en el desarrollo de la actividad intelectual de los hombres, pero ligados y dependientes de la realidad existente, se han denominado genéricamente ciencias.

La técnica de producción agrícola está constituida por varios componentes que se pueden ver actuando durante el proceso de trabajo. Estos componentes y sus características se mencionan a continuación:

- a) PRÁCTICAS AGRÍCOLAS, en donde se incluye el conjunto de actividades que realiza el productor con la finalidad de proporcionar a las plantas y/o animales las mejores condiciones para el desarrollo y producción;
- b) LOS MEDIOS DE TRABAJO, comprendido por el conjunto de instrumentos de trabajo de la agricultura, en donde se distingue a los instrumentos y máquinas agrícolas, además al conjunto de instalaciones e infraestructura en general;
- c) LOS OBJETOS DE TRABAJO en los que incide la acción del hombre, entre ellos se incluyen a plantas y animales, así como el suelo en el momento de la preparación;
- d) LA ORGANIZACIÓN DEL HOMBRE durante el proceso de trabajo se refiere a la organización técnica del proceso y cómo el productor organiza sus recursos naturales y humanos, esto se puede observar a nivel de ciclo agrícola y en cada práctica en específico;
- e) EL CONOCIMIENTO, la decisión sobre los elementos disponibles para producir y sus diferentes combinaciones. Este conjunto de conocimientos que el productor maneja, generalmente fueron aprendidos en la práctica, pudiendo haberse generado de manera empírica o bien científicamente.

La labranza del suelo es una parte integral del proceso de producción agrícola; en la actualidad MANEJO DE SUELOS para la agricultura es un concepto más adecuado para denominar a este conjunto de prácticas agrícolas; cuyo finalidad es crear condiciones edafológicas favorables para el establecimiento y crecimiento de las plantas cultivadas, a partir de favorecer una buena germinación de las semillas y una adecuada emergencia de las plántulas, así como su posterior crecimiento de raíces, tallos y hojas; lo cual repercutirá en una buena producción de cosechas. La labranza

se ha desarrollado tradicionalmente por dos razones: (1) rever las malezas y (2) dar un ambiente adecuado en el suelo para que las semillas puedan germinar y las plántulas puedan desarrollarse y donde las raíces obtengan los nutrimentos, agua y aire necesarios para su crecimiento.

Las decisiones sobre las prácticas de labranza por aplicar a un suelo deberán considerar una serie de factores ya que el agricultor intenta enfrentar varios sistemas y recursos a un grupo de variables que incluyen propiedades del suelo, clima, malezas, plagas y enfermedades. Se desea lograr un control máximo del ambiente del cultivo que favorezca su capacidad máxima para producir.

Para lograr lo anterior el agricultor cuenta con medios de trabajo que incluyen la quema, el uso de los instrumentos de labranza, desde el azadón hasta implementos tirados por potentes tractores, y una amplia gama de agroquímicos que le permiten, lograr una superficie limpia de plantas no cultivadas. Esta situación no implica que se haya logrado un control sobre los factores de la producción y todo lo que el agricultor ha alcanzado es un balance favorable que no deja de ser precario y temporal.

Actualmente se cuenta con información que menciona que “el laboreo del suelo con los implementos tradicionales (arado de discos o de vertederas), es una práctica que la investigación está demostrando como posible causa de erosión, compactación, pérdida de humedad y aumento en los costos de producción cuando se usa con exceso” (Navarro, *et al.*, 2000).

TIPOS DE LABRANZA O LABOREO DEL SUELO

El suelo se puede visualizar como un sistema en el cual sus fases componentes: sólida, líquida y gaseosa, se arreglan de manera diferentes. Estos arreglos de agregados y poros se conocen como estructura del suelo. Si la estructura natural de un suelo permitiera un crecimiento adecuado de las raíces del cultivo, de tal manera que pudiera satisfacer los requerimientos de agua, nutrientes y oxígeno del cultivo, para la producción de un cultivo dado solamente sería necesario un nivel de labranza que asegurara el cubrimiento con suelo de la semilla y un contacto adecuado suelo-semilla para que esta pueda absorber la humedad y germinar.

Si las condiciones anteriores existieran no habría razón para laborear el suelo. De hecho, en su ambiente natural las plantas pueden sobrevivir en sistemas ecológicos balanceados (con competencia) sin interferencia humana. La introducción de una planta específica en el sistema disturba invariablemente el balance existente y se hace necesario laborear el suelo aún en los sistemas más antiguos de siembra (roza-tumba-quema). Si se pretende producir un solo tipo de planta, entonces todas las demás se consideran malezas y tienen que ser erradicadas (debido a su competencia por agua, O₂, luz y nutrientes).

Lo antes expresado debería mostrar claramente que muchos de los objetivos de la labranza son “AUTOINDUCIDOS” ya que el exceso de laboreo puede deteriorar la estructura del suelo, debido a que acelera la oxidación de la materia orgánica y produce daños mecánicos a los agregados, incluyendo la compactación y el rompimiento de estos. Como consecuencia de estos daños se interfiere con el movimiento del aire y del agua, y se expone además a la superficie del suelo, a la erosión hídrica y eólica. Cuando han ocurrido daños graves a la estructura del suelo se hace necesario realizar laboreos más profundos y subsoleos a fin de aminorar los efectos negativos del laboreo, entrando así a un círculo vicioso: más laboreo, más destrucción de la estructura, más necesidad de movimientos fuertes del suelo.

Por lo que respecta a la estructura del suelo, se puede en teoría, predecir el efecto de la labranza con cualquier implemento si se describe adecuadamente el suelo y sus parámetros de comportamiento. Esto permitiría una descripción de la estructura del suelo en términos de porosidad, homogeneidad estructural y resistencia (estabilidad). Al describir las relaciones entre estructura del suelo y crecimiento de los cultivos, es necesario considerar aquellos flujos que la estructura del suelo modifica o determina como son la aireación, humedad, temperatura y resistencia mecánica. Se deben establecer las relaciones entre estos dos grupos de parámetros si se pretende entender la conexión entre labranza y crecimiento del cultivo.

La labranza afloja el suelo cercano al implemento reduciendo notablemente la densidad aparente e incrementando la porosidad, resultando en mayores tasas de infiltración y aireación. El subsiguiente tráfico y fenómenos naturales como la lluvia, viento e insolación tienden a recompactar el suelo hasta cierto equilibrio, según la historia y tipo de suelo. El agricultor conoce a través de su experiencia, cuál será el

efecto de la estructura del suelo (como resultado de la labranza) en el crecimiento y desarrollo del cultivo.

SISTEMAS TRADICIONALES DE LABRANZA EN MÉXICO

La labranza o laboreo es cualquier operación que remueve, invierte o manipula el suelo y que tiende a alterar su densidad, estructura y resistencia. Todas las labores de labranza tienen como objetivo principal proporcionar las condiciones físicas óptimas del suelo para que las semillas germinen adecuadamente y las plantas alcancen su máximo potencial de desarrollo y rendimiento. La historia de la labranza en México señala que en la época prehispánica los sistemas de labranza utilizados se basaban en un conocimiento empírico adaptado de manera notable a la preservación del recurso suelo. Algunos ejemplos de estos sistemas en ambientes contrastantes ilustrarán al respecto.

Los SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA PREHISPÁNICOS DE MÉXICO eran muy variados y, por lo general se basaban en los recursos e insumos internos del agroecosistema. El conjunto de técnicas inventadas y desarrolladas por los nativos mexicanos se sustentaban en la conservación de la vegetación, del suelo y del agua. De esta manera, los sistemas de labranza se integraban perfectamente en los procesos de producción constituyendo verdaderas proezas tecnológicas agrícolas.

Los sistemas de producción agrícola prehispánicos de México eran muy variados y por lo general se basaban en los recursos e insumos internos del agroecosistema. El conjunto de técnicas inventadas y desarrolladas por los nativos mexicanos se sustentaban en la conservación de la vegetación, del suelo y del agua. De esta manera, los sistemas de labranza se integraban perfectamente en los procesos de producción constituyendo verdaderas proezas tecnológicas agrícolas.

LAS CHINAMPAS

La chinampa, del náhuatl chinampan, que significa "EN LA CERCA DE CAÑAS", es un método mesoamericano de agricultura y expansión territorial empleado por los mexicas para ampliar el territorio en la superficie de lagos y lagunas del Valle de México. No obstante, se cree que es una técnica iniciada en la época de los toltecas, aunque su máximo desarrollo se consiguió en el siglo XVI. Hacia 1519, este método de cultivo ocupaba casi todo el lago Xochimilco, y su combinación con otras técnicas como la

irrigación por canales y la construcción de bancales, permitió sustentar una población muy densa.

De origen prehispánico, LA CHINAMPA ES UNA TECNOLOGÍA AGROHIDROLÓGICA SUSTENTABLE DESARROLLADA EN ZONAS LACUSTRES Y PALUSTRES DE MESOAMÉRICA. Es un sistema artificial de tierras de cultivo que se construye en humedal y se caracteriza por de explotación agrícola intensiva en equilibrio con el ecosistema que lo soporta.

Las chinampas son “PARCELAS FLOTANTES” dentro de canales y lagos de agua dulce del Centro de México. Como una derivación de la tecnología de asentamiento humano sobre el agua, los antiguos mexicanos no solo construyeron una enorme metrópoli sobre las aguas de un conjunto de lagos, sino que también desarrollaron una agricultura de tipo lacustre muy variada y productiva que suministraba alimentos a una densa población en conjunción con los recursos acuáticos y la aportación de otras regiones del imperio. Una verdadera maravilla que garantizó la supervivencia de un gran núcleo social. De la misma manera que fueron recuperando materiales sólidos para la construcción de la ciudad, también de forma gradual se recuperaron materiales de limo y materia orgánica del fondo del lago para formar bancales y laborearlos cuidadosamente a fin de sembrarlos y cosechar cultivos de MAÍZ, FRÍJOL, CALABAZA, AMARANTO, HUAUZONTLE, JITOMATE, CHILE, CHÍA Y DALIA.

Se reconoce en el sistema de chinampas un gran potencial de la sabiduría ancestral de los habitantes de la zona, lo cual se refleja en las formas de organización de trabajo, las prácticas agrícolas de producción y la relación de éstas con sus costumbres religiosas. Además se considera que las chinampas dan muestra de la complejidad de relaciones que trae implícita las prácticas agrícolas para aprovechar el agua, suelo, los residuos orgánicos y, con ello introducir policultivos de especies endémicas en un todo, para constituirse en una viabilidad de desarrollo local y en un espacio natural que permite mitigar los efectos de contaminación de inundación en la zona sur de la Ciudad de México, ya que el sistema de las chinampas en Xochimilco representa un ejemplo de biodiversidad endémica, agrícola y de patrimonio natural y cultural. Sin embargo, corre el riesgo de desaparecer debido a la presión urbana. Por ello, se precisa analizar los componentes de las chinampas tradicionales en Xochimilco. Las chinampas son el ejemplo emblemático de un sistema de producción ingenioso y de particular creatividad práctica, que da cuenta del alto desarrollo tecnológico-agrícola

alcanzado en la época precolombina y, en la actualidad representa un modelo de producción sustentable.

La chinampa es un sistema artificial de cultivo que se construye en zonas en las que el agua es el principal recurso natural presente en el medio, esta superficie acuífera es llamada humedal. Se construyen con el fin de cultivar plantas, verduras y hortalizas para el autoconsumo y mercado local. Este sistema de cultivo se coloca en zonas poco profundas de lagos, no depende del riego artificial o de agua de lluvia, pues por su localización siempre dispone de irrigación. Existen dos tipos de chinampas, la de tierra adentro, que se sitúa en las orillas y es regada mediante canales y la de laguna, que se construye sobre el agua.

El primer paso en la construcción de una chinampa es localizar un lugar con poca profundidad a las orillas de la superficie acuífera, una vez asignado el espacio se rodea con estacas de ahuejote, un árbol típico de los humedales, cuya característica principal es soportar el exceso de agua.

El segundo paso es unir estas estacas con carrizo para formar un cerco. Se coloca en el fondo de éste residuos de plantas acuáticas para formar una base que se deja secar, aproximadamente, 15 días. Posteriormente, con una pala con un mango suficientemente largo para llegar al fondo del lago se extrae lodo para llenar el cerco que forma la chinampa. Debe quedar cincuenta centímetros por encima del nivel del agua, nuevamente se deja secar la superficie y estará lista para la siembra. Entre las hortalizas que se producen bajo este sistema podemos encontrar ESPINACAS, ACELGAS, RÁBANOS, PEREJIL, CILANTRO, COLIFLOR, APIO, HIERBABUENA, COLINABO, CEBOLLÍN, ROMERO, LECHUGA Y VERDOLAGA, entre otras.

Es importante mencionar que las estacas de ahuejote usadas para la construcción, con el paso del tiempo, se convierten en árboles cuyas raíces mantienen con firmeza la tierra de la chinampa, además de proveer sombra para las hortalizas. La tierra extraída del fondo del lago está enriquecida de nutrientes, por lo que ambos elementos son esenciales para este sistema de cultivo.

Posiblemente, el atractivo principal de las chinampas es la extraordinaria fertilidad del suelo que, combinada con la abundancia de agua y la mano de obra del agricultor, se convirtió en un sistema de producción intensivo sin igual en el mundo.

Con la urbanización de la Ciudad de México, la chinampería se fue perdiendo, con excepción de Xochimilco que aún practica esta tradición. En la actualidad en Xochimilco, las chinampas están en riesgo por distintos factores, como la contaminación del agua, el exceso de salinidad en ella y la pérdida de humedad en el suelo; aquí es donde radica el gran problema para las chinampas ya que dependen totalmente del agua, la cual está dañada. Esto hace que los vegetales ya no sean aptos para el consumo humano, ya que las aguas tienen agentes potencialmente tóxicos tanto para los vegetales como para el suelo y todo esto vuelve a los cultivos más vulnerables a plagas y bacterias.

Actualmente en esta área existen en 1,800 hectáreas, se sabe que cada día la zona chinampera se va reduciendo por cambio a uso urbano, pero que además de la superficie aún productiva sólo en el 47.7% se aplica el sistema chinampero, mientras que en el 12.5% se han instalado invernaderos, el 9.4% se encuentra inundada, el 16% cuenta con pastizales y en el 14.4% se produce maíz.

El cambio de giro en el uso de las tierras se debe en gran medida a que ya no es negocio para los chinamperos. Ni el desarrollo de la urbanización en el Distrito Federal ni la estructura económica del país favorecen la permanencia de las actividades agrícolas en Xochimilco. Las familias de agricultores simplemente han tenido que dedicarse a otra cosa ya sea porque la agricultura no deja un margen de ganancia suficiente o porque no cuenta con apoyos suficientes.

Figura 93.

Chinampas.



Fuente: Madrid, s.f.

ROZA-TUMBA-QUEMA

La ROZA-TUMBA-QUEMA (RTQ) es un sistema de producción agrícola adaptado a las condiciones tropicales. Se desarrolló para cultivar las espesas selvas que en su momento representaban un reto de grandes dimensiones. Cuando Cristóbal Colón realizó sus primeros viajes al Nuevo Mundo, se encontró en las Islas del Caribe con territorios selváticos con habitantes naturales en condiciones de cazadores-recolectores. Mientras que, en territorio mexicano en esa misma época, ya había un imperio muy civilizado con una tecnología agrícola desarrollado, ciudades imponentes y una sociedad muy organizada con arquitectos, astrónomos, matemáticos, artistas y tecnólogos.

Este sistema de labranza es practicado en muchas zonas tropicales del país y en especial en Yucatán; se basa en el cultivo durante uno o dos años consecutivos de áreas desmontadas y quemadas que se dejaban, posteriormente, en BARBECHO (DESCANSO) durante 16 a 25 años para reponer la fertilidad del suelo a través de la regeneración de la vegetación espontánea.

La quema establece las condiciones óptimas para la siembra de la milpa por medio del palo sembrador, y los deshierbes efectuados manualmente mediante el chapeo, que consiste en el corte de retoños, hierbas y rebrotes dejando la materia orgánica sobre el suelo, mantenián al cultivo libre de malezas. Este sistema dejaba el suelo desnudo por breve período y por lo tanto minimizaba los efectos erosivos de las intensas lluvias regionales. En la actualidad este sistema agrícola empieza a situarse en los límites críticos de su productividad, debido principalmente al continuo uso del suelo sin un período adecuado de descanso que le permita restablecer su fertilidad.

ROZA-TUMBA-QUEMA UTILIZANDO LA ROTACIÓN CON CIERTAS ESPECIES DE LEGUMINOSAS. Este sistema se presenta en comunidades del estado de Tabasco, Chiapas y Veracruz. En el caso del estado de Tabasco se reporta la rotación maíz-nescafé (*Stizolobium* spp.) bajo un sistema de humedad residual que se practica en suelos que no permanecen inundados por períodos largos de tiempo. El ciclo comienza con el restablecimiento del nescafé –planta de crecimiento muy rápido- sobre las cañas de maíz de la cosecha anterior la cual en menos de dos meses cubre totalmente el terreno eliminando la competencia de malezas. El suelo permanece así por espacio de siete a ocho meses hasta que en noviembre-diciembre, después de haber fructificado, el nescafé es chapeado para sembrar maíz y calabaza; la asociación crece sin problemas, hasta que empiezan a germinar las semillas del nescafé, el cual es controlado fácilmente con machete, finalmente se le deja crecer una vez que la cosecha está asegurada. Después de la cosecha (marzo-abril), el nescafé trepa sobre el rastrojo de maíz y vuelve a cubrir completamente el terreno permaneciendo así, hasta el momento de ser chapeado para la nueva siembra. Al comparar este sistema con los monocultivos, se puede apreciar que con inversiones menores hasta en un 40%, se obtiene hasta 180% más de grano. Esto se debe a que en las rotaciones no es necesario preparar el suelo (arar y rastrear), utilizar herbicidas y fertilizantes, ni mucha mano de obra para chapeos.

SISTEMAS DE LABRANZA UTILIZADOS POR LOS HUAVES EN LA REGIÓN DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC, OAXACA. En esta región de nuestro país se presentan vientos hasta de 86 Km por hora durante los meses de noviembre y febrero. Existe además una evaporación alta durante los meses de marzo y mayo y los suelos varían desde texturas arenosas hasta arcillosas que originan, debido a posiciones topográficas, diferencias altas en el drenaje de estos. De acuerdo con estas características se pueden diferenciar tres SISTEMAS DE

LABRANZA HUAVES: (a) Si la susceptibilidad a la erosión eólica es alta los suelos no se roturan y solamente se rastrean o rayan sembrándose con coa. (b) Si la susceptibilidad a la erosión eólica es baja pero los suelos tienen mal drenaje, estos se barbechan y rastrean varias veces.

En todos los casos se trata de laborear el suelo al mínimo sobre todo si se sembró en el ciclo anterior; lo que muestra cómo los antiguos moradores de estas tierras adaptaron sus sistemas de labranza a las condiciones ambientales regionales tratando siempre de preservar el recurso suelo.

Con la llegada de los españoles se introdujeron métodos de cultivo europeos que se basaban en el sistema romano de labranza, el cual consistía en el uso del arado egipcio y rastras pesadas (ramas) seguido del uso de mazos para romper los terrones grandes. El objetivo de este tratamiento era la destrucción de las malezas y la preparación de la cama de la semilla. La crudeza con que se araba para la destrucción de las malezas provocaba un trabajo posterior excesivo para pulverizar los terrones.

Más tarde, los europeos introdujeron el arado de vertedera, la siembra en hileras y las cultivadoras que produjeron un control más eficiente de las malezas mediante la labranza frecuente del área entre surcos, lo que se tradujo en un incremento substancial en los rendimientos. Además, el uso de animales de tiro permitía el aumento de las áreas roturadas. La adopción de estos sistemas aunado a la introducción de los tractores se tradujo en un incremento en la preparación de los suelos que ha propiciado una grave erosión del suelo por el agua y por el viento.

Figura 94.

Roza-tumba-quema.



Fuente: Gobierno de Oaxaca estado libre y soberano, s.f.

SISTEMAS DE LABRANZA CONVENCIONALES

La mecanización del campo mexicano data de las primeras décadas del siglo XX, se aceleró y se expandió durante la “REVOLUCIÓN VERDE”. La creación de los Distritos de riego en el Noroeste de México, con sus grandes valles y sus cultivos extensivos, motivó a las demás regiones agrícolas a la utilización de maquinaria. La corriente agronómica del uso de las llamadas variedades mejoradas “MILAGRO”, muy rendidoras en condiciones de riego; pero acompañadas de una inusual, y cada vez más creciente, incorporación de insumos como fertilizantes de síntesis y agroquímicos variados; no hizo más que fomentar, en no pocos casos, el uso indiscriminado de implementos agrícolas que expusieron al suelo a procesos de degradación como la contaminación y erosión. Los sistemas de labranza convencional tienen su origen en este proceso de modernización de la agricultura mexicana. Estos sistemas de labranza disturbán el suelo, generalmente por inversión, mediante implementos como los arados en los primeros 25 a 30 cm, seguido de operaciones secundarias para preparar una adecuada “CAMA DE SIEMBRA”. El resultado de esta labranza es una superficie del suelo finamente dividida, con volumen y uniforme.

Se refiere a las operaciones combinadas de labranza primaria y secundaria que normalmente se desarrollan en la preparación de la cama de siembra para un área y cultivo dado, En la labranza convencional el suelo se rompe con una serie de implementos primarios diseñados para producir fragmentos de agregados y terrones de diversos tamaños. Esta preparación del suelo se completa con operaciones de labranza secundaria para pulverizar y homogeneizar la superficie del suelo, formando la cama de la semilla.

El procedimiento general consiste en disturbar el suelo (generalmente por inversión) mediante el arado por lo menos en los primeros 25 cm, seguidos de operaciones secundarias para preparar la cama de semillas (discos, picos). En este sistema de labranza se produce una superficie del suelo finamente dividida, desnuda y uniforme.

CAMA DE SIEMBRA. Es aquella capa de suelo que ha sido laboreada para producir una condición que promueva la germinación, la emergencia y el crecimiento de plántulas.

1. **LABRANZA PRIMARIA.** Es aquella que remueve y mulle el suelo para reducir la compactación, y para enterrar o mezclar materiales vegetales y fertilizantes en la capa labrada. La labranza primaria es más agresiva y profunda y permite una mayor rugosidad superficial en comparación con la labranza secundaria. Algunos implementos utilizados en la labranza primaria son: arado de vertedera, arado de cinceles, arado de discos, subsoleador y rastra de discos.
2. **LIMPIA DE TERRENO INMEDIATAMENTE DESPUÉS DE LA COSECHA.** Se desmenuzan los residuos con la finalidad de evitar que sean hospederos de plagas y enfermedades. Esta operación puede efectuarse con la desvaradora o desmenuzadora, con la rastra o con las rejas de los bordedadores (destronque).
3. **LABRANZA PRIMARIA.** Son prácticas que facilitan la infiltración y “cosecha” del agua de lluvia y evitan el crecimiento de la “SOCA” de sorgo y de la maleza; incluye la rotura con arado, subsuelo, subsuelo-bordeo, destronque-bordeo, bordeo en contorno o bordeo con diquers (pileteo).
 - a) **ROTURA:** Para romper la capa superficial del suelo a una profundidad de 20 a 30 cm; incrementar la infiltración cosecha de agua de lluvia, incorporar

residuos de la cosecha anterior y de malas hierbas. Además, al voltear el suelo se exponen huevecillos, larvas, pupas de plagas y algunas estructuras en reposo de hongos, que son destruidos en la superficie por aves, por efectos climáticos como el sol y otros factores bióticos con lo que se ejerce un control adicional de plagas y enfermedades; al mismo tiempo, se exponen semillas de maleza con diferentes niveles de viabilidad, lo cual contribuye a disminuir o retardar la infestación del terreno agrícola.

- b) **SUBSOLEO:** Se realiza en suelos profundos y compactos que tienen tres o más años en cultivo, con esta labor se rompen las capas impermeables del subsuelo, originadas generalmente por el uso excesivo de rastra y arado, aumenta la infiltración y favorece el acopio de humedad en el suelo.

Figura 95.

Maquinaria empleada para el subsoleo.



Fuente: Del Carmen, *et al.*, 2017.

- c) **SUBSUELO-BORDEO:** Se utiliza en suelos arcillosos para romper las capas compactas y favorecer la infiltración y cosecha de agua de lluvia en el suelo. También se recomienda en suelos arenosos con problemas de erosión eólica, pues esta práctica forma la corrugación del terreno y mantiene una buena cantidad de residuos de cosecha sobre la superficie del suelo.

- d) **DESTRONQUE-BORDEO:** Se lleva a cabo en suelos arenosos con problemas de erosión eólica, pues esta práctica forma la corrugación del terreno y mantiene una buena cantidad de residuos de cosecha sobre la superficie del suelo.
- e) **BORDEO EN CONTORNO:** Se utiliza en suelos desnivelados con pendientes mayores de 2%, para evitar pérdidas de suelo por erosión hídrica y aumentar el almacenamiento de la humedad en el suelo.
- f) **BORDEO CON DIQUES:** En suelos desnivelados con pendientes mayores de 2%. Consiste en levantar bordos transversales dentro de los surcos (contras o pequeñas represas con separaciones de 1.30 a 1.60 m una de otra) llamados diques, que permiten que el agua de lluvia quede contenida en éstos hasta que sea absorbida por el suelo, evitando que el agua corra sobre la superficie y se pierda. Estas labores se realizan inmediatamente después de la limpia del terreno y antes que se inicie el periodo de lluvias de septiembre y octubre.

4. **LABRANZA SECUNDARIA.** Remueve el suelo a una profundidad menor que la labranza primaria, proporciona pulverización adicional y nivelación y elimina malezas. La preparación definitiva de la cama de siembra es la operación final de la labranza secundaria. Incluye las operaciones de refinamiento y nivelación en la preparación de la cama de siembra, se desarrolla con distintos tipos de rastras de discos, rastras de dientes, rodillos desterronadores, barras escardadoras o cultivadores de cinceles. Los implementos para labores secundarias:

(1) Rastra de discos o de picos. (2) Niveladoras, (3) cultivadoras, azadones rotatorios y rototiler.

5. **OPERACIONES DE LABRANZA DE POSTSIEMBRA.** Es lo que se conoce como labranza de cultivo y corresponde a una labranza superficial de postsiembra cuyo propósito fundamental es ayudar al cultivo mediante el aflojamiento del suelo y/o erradicación mecánica de malezas y residuos de cosecha. En este tipo de labranza se emplean (1) las cultivadoras de hileras, (2) azadones rotatorios y (3) rototilers.

6. LABRANZA DE OPERACIONES DE CULTIVO

La labranza se ha asociado con el control de malezas, aunque los nuevos herbicidas, aún cuando son caros, son efectivos para combatir las malezas, pues en la actualidad existe maquinaria para siembra directa, la cual puede colocar las semillas de muchos cultivos dentro del suelo no disturbado.

- 1) **ESCARDA.** Labor que consiste en arrancar y sacar las malas hierbas de los sembrados. Consiste en limpiar el terreno de malas hierbas. La escarda se realiza con unos discos elásticos de distinta dureza y diámetro, en función del tipo de cultivo, que trabajan a escasos centímetros de las plantas en el mismo surco, batiendo la tierra y arrancando las malas hierbas en sus primeros estadios. La escarda en maíz se realiza 50 días después de la siembra para arrimar suelo a la planta y que la sostenga y también para conservar la humedad del suelo.
- 2) **APORQUE.** El aporque es una técnica agrícola que consiste en acumular tierra en la base del tronco o tallo de una planta como el apio, tomate, coliflor y brócoli, entre otras, con el fin de que queden protegidas; incluso ayuda a facilitar el riego e impide el exceso de humedad. Esta labor tiene como objetivo principal resguardar la planta del frío y, en el caso de algunas hortalizas, para que se conserven tiernas y produzcan tallos blancos; sin embargo, hay otras que no lo necesitan, como los rabanitos, perejil y cebolla. Para llevar a cabo esta práctica, el cultivo debe tener cierta altura. Por ejemplo, en el caso de la papa, el aporcado se realiza antes que la planta supere los 15 cm de altura, con el objeto de evitar que los estolones se conviertan en tallos. Así, se incrementará el número de raíces por planta. El proceso de aporque se puede realizar de manera manual, semimecánica, mecánica o con tracción animal; esto siempre dependerá del crecimiento y tipo de cultivo. Esencialmente se lleva a cabo en dos periodos: al momento de la plantación o después de que la planta emerja (entre 10 y 20 cm de altura). ALGUNOS DE LOS BENEFICIOS DEL APORCADO SON LOS SIGUIENTES: (1) OXIGENA EL SUELO. (2) IMPIDE QUEMA POR HELADA O SOL. (3) EVITA LA CONTAMINACIÓN POR ENFERMEDADES. (3) FAVORECE EL DESARROLLO DE LAS RAÍCES EN EL SUELO. (4) FACILITA EL ABONAMIENTO DE LAS PLANTAS. (5). FAVORECE EL CRECIMIENTO VERTICAL DE LAS PLANTAS. (6) PERMITE LA ELIMINACIÓN DE GUSANOS DE TIERRA Y DE MALEZAS.

Figura 96.

Aporcado del cultivo.



Fuente: Cooperativa Agroindustrial de Misiones, s.f.

LABRANZA DE POSTCOSECHA. Es aquella que ocurre después de la cosecha del cultivo y antes de la labranza primaria (labranza preliminar) con la finalidad de incorporar o colocar los residuos en la superficie del suelo, conservar la humedad, controlar malezas y/o plagas del suelo. LOS IMPLEMENTOS UTILIZADOS CON FRECUENCIA SON (1) LAS CHAPONEADORAS, (2) LAS RASTRAS, (3) LOS AZADONES ROTATORIOS Y (4) LAS CULTIVADORAS.

VENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE LABRANZA CONVENCIONALES. Ciertamente hay aspectos positivos de estos sistemas de labranza, generalmente, cuando se realizan de manera técnica y bien efectuada: (1) Cuando se alcanza su objetivo principal se obtiene una capa de suelo (25-30 cm), suelta y uniforme en su estructura que favorece el buen desempeño de semillas, plántulas y plantas. (2) Se combaten las malezas y algunas plagas del suelo con un alto grado de eficiencia. (3) Se mezclan con el suelo restos de cosecha y abonos, uniformizando la capa arable.

DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE LABRANZA CONVENCIONALES. El uso intensivo de maquinaria que caracteriza a la labranza convencional (1) ocasiona un progresivo deterioro del recurso suelo (daños a la estructura natural del suelo, erosión, formación del piso de arado, compactación del suelo con una formación de pisos de arado, menor capacidad

de retención de agua, desarrollo favorable de malezas, destrucción de la vida del suelo, entre otras); (2) Provocan la disminución de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo; (4) aumenta el banco de semillas de malezas y favorece su aparición en cada ciclo de cultivo cada vez más intensa; (5) destruyen la vida del suelo al alterar el contenido de humedad y el flujo de aire dentro del suelo; (6) incrementan los costos de producción del cultivo; (7) abaten constantemente el abatimiento de la productividad de los terrenos agrícolas.

SISTEMAS DE LABRANZA NO CONVENCIONALES.

Estos sistemas de labranza se originan con la intención de evitar todos los inconvenientes de la labranza convencional. El enfoque incluye una serie de consideraciones técnicas como, realizar operaciones de laboreo con un detallado conocimiento de las características del suelo; que los suelos diferentes requieren de un manejo diferenciado y el mantenimiento en óptimas condiciones y la conservación del suelo.

1. LABRANZA MÍNIMA O REDUCIDA.

ESTE SISTEMA SE CARACTERIZA POR LA MANIPULACIÓN MÍNIMA NECESARIA DEL SUELO Y QUE SE REDUCEN LOS PASOS DE MAQUINARIA SOBRE EL TERRENO. Las operaciones de labranza primaria (de los sistemas convencionales) se modifican y se realizan procedimientos especiales de siembra de tal manera que se reduzcan o eliminen las operaciones de la labranza secundaria. Se toman en cuenta las características del suelo. Los suelos arenosos o de textura franca solo requieren para su preparación de un paso de rastra antes de la siembra, ya que casi no presentan riesgos de compactación. Por otro lado, si se utiliza un implemento que al mismo tiempo realice la preparación del suelo y la siembra; el ahorro en tiempo, esfuerzo y dinero es importante.

En este tipo de labranza se incluyen varios sistemas, cuyos objetivos son: la reducción de la cantidad de energía y de trabajo, reducción de los costos de producción, conservación de la humedad del suelo, reducción de la erosión, reducción de los costos de maquinaria y equipo. Los más importantes son:

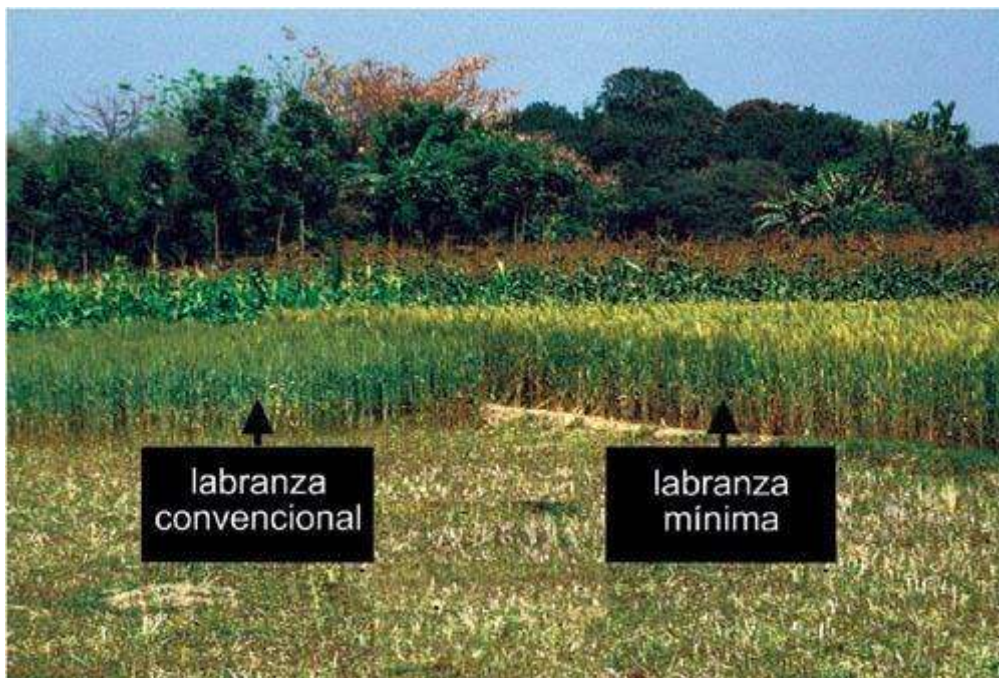
Comprende la manipulación necesaria para la producción de cultivos o para reunir los requerimientos mínimos de labranza bajo determinadas condiciones de suelo; algunos procedimientos de este tipo de labranza son los siguientes: arada y siembra en una

operación, siembra con arado de cincel, siembra sobre cobertura de rastrojo, siembra en fajas trabajadas, arada y siembra en dos operaciones; en muchas operaciones de labranza mínima, las sembradoras van montadas o remolcadas por cultivadores, arados de cincel o subsoladores, para reducir el número de operaciones. La reducción del número de operaciones en el cultivo ahorra combustible, disminuye el trabajo, generalmente permite siembra temprana, puede disminuir la inversión de equipo y reduce la compactación del suelo. Algunas desventajas de los sistemas de labranza mínima son: la erosión se reduce, pero todavía existe, forma piso de arado, puede ocasionar encostramiento, aumenta la escorrentía disminuyendo la velocidad de infiltración del agua, es necesario equipo especial.

VENTAJAS DE LA LABRANZA MÍNIMA. La reducción del número de operaciones de preparación del terreno: (1) ahorra combustible, (2) disminuye el trabajo, (3) permite la siembra temprana, (4) puede disminuir la inversión en equipo y (5) reduce la compactación del suelo.

Figura 97.

Beneficios de la labranza mínima en el cultivo de trigo.



Fuente: Rawson & Gómez, 2021.

DESVENTAJAS DE LA LABRANZA MÍNIMA. Aunque este sistema de labranza nos brinda una serie de ventajas, también podrían persistir algunas desventajas como: (1) La erosión

se reduce, pero aún persiste y de todas maneras se forman pisos de arado. (2) Puede ocasionar encostramientos. (3) Favorece el aumento de la escorrentía y disminuye la infiltración del agua en el suelo. (4) Es necesario un equipo especial.

2. LABRANZA DE CONSERVACIÓN

ES UN SISTEMA DE LABRANZA EN EL CUAL LOS RESIDUOS DE COSECHA SON RETENIDOS EN O CERCA DE LA SUPERFICIE Y/O LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL DEL SUELO SE MANTIENE, CON EL OBJETO DE CONTROLAR LA EROSIÓN Y LOGRAR BUENAS RELACIONES SUELO-AGUA. Es una secuencia de operaciones que reducen la pérdida del suelo y agua y optimizan el aprovechamiento de la energía en comparación con el sistema convencional, mediante el uso principalmente de un mantillo o cubierta de residuos vegetales. Sin embargo, para propósitos de evaluación y operativos, esa definición ha sido modificada para especificar precisamente la cantidad de cubierta de residuos en la superficie, definiéndose en un 30%, ya que con esta cantidad se logra aproximadamente una reducción del 50% de la erosión del suelo (hídrica o eólica) en relación con un suelo sin cubierta de residuos en la superficie. La labranza mínima que consiste en un menor número de pasos de maquinaria puede ser de conservación si contempla una cantidad suficiente de residuos. Asimismo, la labranza cero que no contempla más que la labor de siembra en forma manual o mecanizada podrá ser de conservación si cuenta también con el suficiente mantillo en la superficie,

En los SISTEMAS DE LABRANZA DE CONSERVACIÓN y en especial la LABRANZA CERO, el suelo se prepara al mínimo solo para enterrar la semilla, los residuos vegetales no se incorporan y quedan sobre la superficie, cubriendo el suelo como un mantillo. Debido a que no hay labranza, el suelo preserva su estructura nativa, sea buena o mala para el crecimiento de un cultivo en particular, El espacio poroso y su continuidad se mantienen intactos. Los residuos vegetales cubren el suelo disminuyendo la insolación, el impacto de la lluvia, la evaporación, y el encostramiento.

REQUISITOS PARA LA LABRANZA DE CONSERVACIÓN: (1) Eliminación de compactaciones (piso de arado y rastra con un subsuelo). (2) Corrección del pH (suelos ácidos adición de cal, alcalinos con yeso). (3) Eliminación de malezas perennes (zacate grama o zacate Johnson). (4) Presencia de rastrojo en por lo menos un 30% de la superficie (2.0 ton/ha como mínimo). (5) Uso y manejo de herbicidas (no por el hecho de no ver el suelo implica que se tenga que usar mayor cantidad de herbicidas). (6) Fertilización balanceada (N-P-K).

3. LABRANZA CERO O NO-LABRANZA

PROCEDIMIENTO MEDIANTE EL CUAL, LA SIEMBRA SE HACE DIRECTA Y ESENCIALMENTE EN CAMAS DE SIEMBRA NO PREPARADAS. La semilla se siembra con equipo especial en un suelo no laboreado en el que se ha matado la vegetación existente con herbicida. Las máquinas usadas en cero labranza rompen la maleza superficial y labran una franja angosta de tierra a través de cuchillas circulares ajustables. Las sembradoras generalmente tienen discos roturadores y ruedas apisonadoras para apretar una cantidad limitada de tierra alrededor de la semilla. Entre sus ventajas se mencionan las siguientes: menores costos de producción, mayor retención de humedad del suelo, menor escurrimiento de agua de lluvia, menor erosión por viento y agua, menor compactación por maquinaria, posibilidad de utilizarse en terrenos inclinados, mejora físicamente al suelo, garantiza una buena germinación de semillas. Sus principales desventajas son: se requiere equipo especial, incrementa la dependencia del uso de químicos, requiere del conocimiento de manejo de herbicidas, no es útil en suelos de inundación frecuente.

Consiste en eliminar prácticamente todas las operaciones o labores de preparación del terreno. La siembra se hace en un terreno en el que solo se remueve una cantidad muy pequeña de suelo, suficiente para depositar las semillas. Este tipo de siembra se puede efectuar manualmente o con sembradoras especiales. Las máquinas sembradoras usadas en ero labranza rompen los residuos de la cosecha anterior y labran una línea o franja angosta de suelo por medio de cuchillas circulares ajustables en forma de discos roturadores y tienen ruedas apisonadoras para apretar una cantidad limitada de suelo sobre las semillas. No se realizan labores de cultivo.

VENTAJAS DE LA CERO LABRANZA. A continuación, mencionares algunas ventajas importantes de este sistema: (1) Menores costos de producción. (2) Menor compactación del suelo por efecto del paso de la maquinaria. (3) Posibilidad de utilizarse en terrenos con pendiente. (4) La siembra se puede hacer inmediatamente después de la cosecha.

DESVENTAJAS DE LA LABRANZA CERO. Es recomendable poner atención a algunos inconvenientes de este sistema: (1) Se requiere de implementos especiales y caros. (2) Mayor incidencia de malezas. (3) Utilización de herbicidas ya que no se realizan escardas mecánicas.

4. SISTEMA DE SIEMBRA DIRECTA

UNA COMBINACIÓN DE LOS PRINCIPIOS TÉCNICOS DE LA LABRANZA DE CONSERVACIÓN Y LA CERO LABRANZA, RESULTA EN UN SISTEMA PRÁCTICO Y EFICIENTE DENOMINADO, SIEMBRA DIRECTA. Toma de la labranza de conservación la práctica de cubrir al suelo con materia orgánica o residuos de cosecha, pero ahora en toda la superficie del terreno; y de la cero labranza el procedimiento de solo marcar una fina línea de siembra. Los beneficios adicionales de este sistema son: (1) Se garantiza un mínimo movimiento del suelo. (2) Aumenta la infiltración del agua en el suelo. (4) Se reduce la aparición de malezas. (5) Se mantiene una temperatura estable del suelo. (6) Se conservan los rastrojos sobre su superficie. (7) Se reducen sustancialmente los riesgos de erosión.

Figura 98.

Siembra directa sobre residuos de la cosecha anterior.



Fuente: Sistema de observación de la tierra, 2021.

Referencias.

- AgrocultivosTV. (s.f.). Densidad aparente, porosidad y capacidad de retención de agua (propiedades físicas del suelo).
- AGRONLINE. (2020). *AGRONLINE. Diario digital del sector agrícola y ganadero*.
Obtenido de La ausencia de labranza permite reducir la pérdida de carbono:
<https://www.agronline.pe/noticias/11900/>
- Agrovoz. (6 de Junio de 2017). Según datos del Inta, suelos compactados limitan hasta 28 por ciento el rinde de los cultivos. Las estrategias agronómicas que se pueden seguir para evitar este problema. *La Voz*.
- Aimetta, M. (5 de Diciembre de 2018). *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*.
Obtenido de Suelos sódicos y salinos: efectos sobre el cultivo de soja y alternativas de manejo: <https://inta.gob.ar/documentos/suelos-sodicos-y-salinos-efectos-sobre-el-cultivo-de-soja-y-alternativas-de-manejo>
- Arabuko. (s.f.). *Arabuko*. Recuperado el 10 de Enero de 2022, de Cómo preparar la tierra para sembrar.
- Ascensión, F. (2 de Febrero de 2018). *ilp*. Obtenido de El deber de abstención del socio en las votaciones: <https://www.ilpabogados.com/deber-abstencion-del-socio/>
- Asociación pasión por volar. (6 de Febrero de 2013). *Asociación pasión por volar: divulgación aeronáutica para todos*. Obtenido de El vuelo de crucero Capt. 2: <https://www.pasionporvolar.com/el-vuelo-de-crucero-capt-2/>
- Atlas geomundo. (19 de Enero de 2017). *La tierra y el mundo*. Obtenido de Elementos del clima: <http://atlasgeomundo.blogspot.com/>
- Aulafacil. (s.f.). *Aulafacil*. Obtenido de Estructura de una molécula de agua: <https://www.aulafacil.com/cursos/medio-ambiente/el-agua-una-maravilla-de-la-naturaleza/estructura-de-una-molecula-de-agua-l36471>
- Blanco, P., & Garro, L. (2008). *Formación de suelo*. Obtenido de Perfil de suelo: <https://sites.google.com/site/formaciondesuelo/perfil-de-suelo>
- Blogg. (10 de Junio de 2012). Los Suelos. Obtenido de Los Suelos.
- Briceño, G. (2018). *Euston96*. Obtenido de Meteorización: <https://www.euston96.com/meteorizacion/>
- Cárdenas, G. (8 de Septiembre de 2019). *Abouthaus*. Obtenido de Prueba de sedimentación de tu terreno: <https://about-haus.com/prueba-de-sedimentacion/>
- Carmena, E. (28 de Agosto de 2019). *Xataka*. Obtenido de Hemos llevado miles de tardígrados a la Luna, pero el gran debate ahora es si han conseguido sobrevivir:

- <https://www.xataka.com/espacio/hemos-llevado-miles-tardigrados-a-luna-gran-debate-ahora-han-conseguido-sobrevivir>
- Carranza, M. (2010). *Método integral para conseguir técnicamente la estabilización óptima de la Tierra*. Cataluña: Fundación Politécnica de Cataluña.
- Catalán, G. (8 de Noviembre de 2016). *Agropal*. Obtenido de El pH del suelo en la agricultura: <http://www.agropal.com/es/el-ph-del-suelo/>
- Cerdá, A. (11 de Diciembre de 2002). *Métode*. Obtenido de Tierras marginales, abandono del campo y erosión: <https://metode.es/revistas-metode/monograficos/tierras-marginales-abandono-del-campo-y-erosion.html>
- Climent, M., Aragón, P., Abad, M., & Roselló, M. (1990). *Utilización del compost de residuos sólidos urbanos como enmienda orgánica en agricultura*. Tenerife: Congreso Internacional de Química de la ANQUE 1.
- Cooperativa Agroindustrial de Misiones. (s.f.). *CTM*. Recuperado el 7 de Enero de 2022, de Aporque: <https://ctmweb.com.ar/aporque/>
- Coppedge, D. (14 de Junio de 2021). *Creation evolution*. Obtenido de Rotifer: <https://crev.info/2021/06/rotifer-mocks-old-age-credulity/>
- De las Salas, G. (1987). *Suelos y ecosistemas forestales: con énfasis en América tropical*. Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Del Carmen, E., Espinosa, M., Belmonte, F., & Rivera, P. (2017). *Evaluación, protección y conservación de suelos agropecuarios del Norte de Tamaulipas (México)*. México: Universidad de Murcia.
- Díaz, F. (3 de Mayo de 2019). *InfoAgro*. Obtenido de Calculo de humedad del suelo por tacto y apariencia: <https://infoagronomo.net/calculo-humedad-del-suelo-por-tacto-y-apariencia/>
- Dorronsoro, C. (s.f.). *INTRODUCCIÓN A LA EDAFOLOGÍA*. Recuperado el 3 de Enero de 2022, de Constituyentes del suelo: <http://www.edafologia.net/introeda/tema02/prop.htm>
- Econadzor. (29 de Marzo de 2019). Obtenido de Como determinar la acidez del suelo en su propio sitio: <https://ecoohotnadzor31.ru/es/kak-opredelit-kislotnost-pochvy-samostoyatelno-na-svoem-uchastke-kislaya.html>
- Educación permanente. (s.f). *Geodinámica externa: El sustrato de la vida: el suelo*. Recuperado el 3 de Enero de 2022, de Formación del suelo: https://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/biologiageologia/tema11/2_formacin_del_suelo.html

- Eurogrow. (8 de Junio de 2021). *Eurogrow*. Obtenido de Como bajar el PH del agua:
<https://eurogrow.es/blog/como-bajar-el-ph-del-agua-n340>
- Fernández, A. (6 de Abril de 2015). *Consumer*. Obtenido de Geotermia: energía barata y ecológica en los hogares: <https://www.consumer.es/medio-ambiente/geotermia-energia-barata-y-ecologica-en-los-hogares.html>
- Ferreya, F. (2016). *Slideplayer*. Obtenido de El ciclo del nitrógeno:
<https://slideplayer.es/slide/5406323/>
- Fertilab. (29 de Agosto de 2016). *Fertilab*. Obtenido de Interpretacion de resultados de textura y humedad del suelo:
<https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/INTERPRETACION%20DE%20RESULTADOS%20DE%20TEXTURA%20Y%20HUMEDAD%20DEL%20SUELO.pdf>
- Fonseca, P. (2015). *Armanax*. Obtenido de Gusanos enquitreidos, alimento vivo:
<https://www.armanax.com/gusanos-enquitreidos-alimento-vivo.html>
- Frick, C., Farrell, E., & Germida, J. (1999). *Evaluación de la fitorremediación como técnica in situ para limpiar sitios contaminados con petróleo*. Canadá: Universidad de Saskatchewan.
- Gaitán, A., Galindo, P., Pedrera, A., & Pérez, L. (s.f.). *Agricultura ecológica*. Instituto de Investigación y formación agraria y pesquera .
- Gallardo, R., Torres, E., Carbonero, M., Villegas, M., Bell, A., Altuna, B., . . . Paredes, E. (2006). *Influencia del pH y la temperatura en la producción de las fitotoxinas producidas por la Pseudomonas aeruginosa PSS. Evaluación de su efectividad en el control de malezas*. Cuba.
- Geoaprendo. (4 de Septiembre de 2014). *Geoaprendo*. Obtenido de Intemperismo o meteorización: <https://www.geoaprendo.com/2014/09/intemperismo-o-meteorizacion.html>
- Glabiseu, L. (18 de Septiembre de 2009). ¿Qué es el suelo? Uruguay.
- Glenn, H. (2018). *Slideplayer*. Obtenido de Erosión y Deposición:
<https://slideplayer.com/slide/14419218/>
- Gobierno de Oaxaca estado libre y soberano. (s.f.).
<https://www.youtube.com/watch?v=ysOfqO0f6L8>. Oaxaca, México. Obtenido de Sistema de Roza, Tumba y Quema.
- Hernández, A., Ascanio, M., Bojorquéz, J., Morales, M., García, N., & García, J. (2006). *El suelo: Fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo*. México: Universidad Autónoma de Nayarit.

- Hernández, R., Saitz, S., Moncayo, J., & Corona, M. (Junio de 2014). *Portal académico CCH UNAM*. Obtenido de Biosfera:
<https://el.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/biologia2/unidad2/estructuraEcosistema/biosfera>
- Herogra. (14 de Abril de 2020). *Herogra*. Obtenido de La importancia del buen enraizamiento: <https://herograespeciales.com/la-importancia-del-buen-enraizamiento/>
- Herrera, J. (12 de Julio de 2009). Intemperismo, erosión y suelo. Estado de México, México. Instituto europeo de química, física y biología . (27 de Enero de 2021). *Instituto europeo de química, física y biología* . Obtenido de Protozoos: clasificación tradicional:
<https://ieqfb.com/protozoos-clasificacion-tradicional/>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2017). *Etapas de campo del levantamiento de suelos*. Colombia: Geogras.
- Instituto Hanna. (2021). Obtenido de Medidor dedicado para pH/ORP edge:
<https://hannainst.com.mx/productos/linea/laboratorio/medidor-dedicado-para-phorp-edge/>
- Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura. (5 de Diciembre de 2016). *Intagri*. Obtenido de La permeabilidad del suelo para el cultivo de frutales:
<https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-permeabilidad-del-suelo-para-el-cultivo-de-frutales>
- Juárez, A. (25 de Enero de 2018). *Portalfruticola.com*. Obtenido de La capacidad de campo de un suelo: técnicas para su medición:
<https://www.portalfruticola.com/noticias/2018/01/25/la-capacidad-de-campo-de-un-suelo-tecnicas-para-su-medicion/>
- Julca, A., Meneses, L., Blas, R., & Bello, A. (2006). *La materia orgánica: importancia y experiencias de su uso en la agricultura*. Chile: Idesia .
- Madrid, J. (s.f.). *MXCITY*. Recuperado el 5 de Enero de 2022, de ¿SON LAS CHINAMPAS UN EJEMPLO DE SUSTENTABILIDAD DEL FUTURO?:
<https://mxcity.mx/2016/06/las-chinampas-ejemplo-sustentabilidad-del/>
- Ministerio de educación de Perú. (2021). *Dirección de educación secundaria*. Obtenido de Diseñamos y elaboramos soluciones tecnológicas para el filtrado del agua:
<https://resources.aprendoencasa.pe/red/aec/regular/2021/66c1f659-be76-4818-bdab-ea7930c7c470/exp7-secundaria-3y4-exploramosyaprendemos-act07.pdf>
- Ministerio de educación. (s.f.). *Gobierno de España*. Recuperado el 3 de Enero de 2022, de Ciclos de la materia:

- http://recursos.cnice.mec.es/biosfera/alumno/2ESO/Energia_ecosistemas/contenidos5.htm
- Ministerio de turismo. (20 de Mayo de 2020). *Descubrir turismo*. Obtenido de Descubrir Datos: ¿Por qué es roja la tierra de Misiones?: <https://descubrirturismo.com/descubrir-datos-por-que-es-roja-la-tierra-de-misiones/>
- Moreno, H., & Ibáñez, S. (2020). *Horizontes del suelo: Nomenclatura y designación de los horizontes genéticos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Navarro, A., Figueroa, B., Ordaz Chaparro, V. M., & González, F. (2000). *Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol*. México: Tierra latinoamericana.
- Nicols, D. (3 de Agosto de 2018). *Summum*. Obtenido de Los secretos de la malaquita: https://www.abc.es/summum/estilo/relojes/abci-secretos-malaquita-piedra-fertilidad-201807311124_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F
- Núñez, P. (s.f.). *Ladrillera mecanizada*. Obtenido de El origen de la arcilla: <https://www.ladrillramecanizada.com/laravel85/blog/el-origen-de-la-arcilla>
- Orozco, C., Chávez, T., Pedraza, E., Vargas, E., Santoyo, G., & Salmerón, I. (2019). Bacterias benéficas para disminuir el uso de agroquímicos en la agricultura;. Michoacán, México.
- Palazzolo, F. (16 de Noviembre de 2020). *Revista Ciencias de la Tierra*. Obtenido de Rocas sedimentarias: un viaje al pasado: <https://revistacienciasdelatierra.com/geociencias/sedimentologia/rocas-sedimentarias-un-viaje-al-pasado/5270/>
- Pérez, A., Galvis, A., Bugarin, R., Hernández, T., Vázquez, M., & Rodríguez, A. (2017). *Capacidad de intercambio catiónico: descripción del método de la tiourea de plata*. México: Revista mexicana de ciencias agrícolas.
- Portales, C. (21 de Noviembre de 2016). *Portalfrutícola.com*. Obtenido de <https://www.portalfruticola.com/noticias/2016/11/21/simbiosis-raices-con-bacterias-fijadoras-de-nitrogeno/>
- Rawson, H., & Gómez, H. (2021). *Trigo regado: manejo del cultivo*. Roma: rganización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Obtenido de Labranza mínima y labranza cero.
- Ríos, R., & Goytia, H. (25 de Marzo de 2009). *Impacto Ambiental*. El Dorado: Saltos Kupperts. Obtenido de Impacto Ambiental.

- Ríos, Y. (2005). *IMPORTANCIA DE LAS LOMBRICES EN LA AGRICULTURA*. Barquisimeto: Universidad Centroccidental “Lisandro Alvarado”.
- Roberts, A. (3 de Julio de 2009). Obtenido de Creative commons: https://es.wikipedia.org/wiki/Sedimento_marino#/media/Archivo:Konkrecje_na_dnie_oceanu.JPG
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Montevideo: Universidad de la república.
- Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2005). *La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana*. Colombia: Cenicafé.
- Salazar, R. (2022). Obtenido de Tipos estructurados del suelo: http://www.edafologia.net/programas_suelos/practclas/horsol/comun/estruct.htm
- Sánchez, L. (18 de Septiembre de 2013). *Municipios*. Obtenido de Lluvias salvan cultivos de temporal en la Mixteca poblana: Campesinos: <https://municipiospuebla.mx/nota/2013-09-18/acatl%C3%A1n-de-osorio/lluvias-salvan-cultivos-de-temporal-en-la-mixteca-poblana>
- Sebastián, E. (25 de Marzo de 2018). Efectos de la inclinación de la tierra. Perú.
- Shannon, M., Grieve, L., & Francois, G. (1994). *Toda la planta: respuesta a la salinidad*. New York: Marcel Dekke.
- Siim, S. (1 de Enero de 2005). Arcilla cuaternaria en Estonia.
- Silva, A. (1998). *La materia orgánica del suelo*. Montevideo: Facultad de Agronomía.
- Sinc. (12 de Marzo de 2008). *Sinc*. Obtenido de ¿Qué tolerancia tienen los cítricos al estrés salino?: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Que-tolerancia-tienen-los-citricos-al-estres-salino>
- Sistema de observación de la tierra. (1 de Abril de 2021). *Sistema de observación de la tierra*. Obtenido de Método de siembra directa: ventajas y funcionamiento: <https://eos.com/es/blog/siembra-directa/>
- Sociedad Pública Ihobe. (25 de Junio de 2015). La ley de prevención y corrección de la contaminación del suelo posibilita un uso sostenible y preserva su capacidad para los servicios ecológicos, económicos y sociales. *Ihobe*.
- Solagro. (9 de Octubre de 2019). *Solagro*. Obtenido de El problema de salinidad en la agricultura peruana: <https://solagro.com.pe/blog/el-problema-de-salinidad-en-la-agricultura-peruana/>
- Soria, M. (2016). *¿Por qué son importantes los microorganismos del suelo para la agricultura?* Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.

- Symborg. (s.f.). *Group symborg*. Recuperado el 4 de Enero de 2022, de Micorrizas, el aliado imprescindible para la salud de la planta: <https://symborg.com/es/que-son-las-micorrizas/>
- Traxco. (13 de Marzo de 2013). *Traxco*. Obtenido de Siembra directa: <https://www.traxco.es/blog/labores-del-campo/siembra-directa>
- Universidad agrícola. (s.f.). *Universidad agrícola*. Recuperado el 3 de Enero de 2022, de La materia orgánica: su importancia en el suelo: <https://universidadagricola.com/la-materia-organica-su-importancia-en-el-suelo/>
- Universidad Nacional de Mar del plata. (2014). *Nitrógeno*. Buenos Aires: Universidad Nacional de Mar del plata.
- Universidad Politécnica de Cataluña. (s.f.). Procesos, formas y depósitos glaciales. Cataluña, España.
- Vásquez, E., & Zuñiga, D. (2008). *Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio*. Lima: Departamento Académico de Biología, Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Vázquez, A. (13 de Noviembre de 2015). *Axel Vázquez*. Obtenido de Reporte Infográfico del proceso de obra del sistema constructivo tradicional: <http://tecnormalizada2015axelvazquez.blogspot.com/2015/11/construccion-monte-novo.html>
- Wix. (1 de Octubre de 2019). *Wix*. Obtenido de Microorganismos del suelo y simbiosis con las plantas: <https://nicolasvlgd.wixsite.com/website/post/microorganismos-del-suelo-y-simbiosis-con-las-plantas>
- Yong, R., Warkentin, B., Phadungchewit, Y., & Galvez, R. (1990). *Capacidad amortiguadora y retención de plomo en algunas arcillas*.
- Zamora, C. (14 de Enero de 2018). Montañas. Concón, Chile.
- Zita, A. (s.f.). *Todamateria*. Obtenido de Ciclos biogeoquímicos: <https://www.todamateria.com/ciclos-biogeoquimicos/>