


A photograph of an avocado tree with several green, bumpy avocados hanging from the branches. The background is a soft-focus view of more leaves and branches. The entire image has a dark, semi-transparent overlay.

## CAPÍTULO IV

# Propiedades químicas del suelo en zonas productoras de aguacate



**L**as propiedades químicas del suelo están determinadas por la interacción de varios constituyentes que tiene lugar entre las partículas y la solución del suelo. Estos constituyentes son afectados por propiedades físicas, como la textura, que a su vez determina la proporción de arcillas, limos y arenas como indicador de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), entendida como la cantidad de cationes que pueden ser retenidos por un suelo en una condición de pH determinada y que pueden ser intercambiados por otros nutrientes disponibles en la solución del suelo. A su vez, características climáticas locales, como la precipitación, pueden afectar las propiedades químicas del suelo, como el pH, lo cual condiciona la disponibilidad de nutrientes, o la temperatura, que, en combinación con la humedad del suelo, dinamiza la actividad biológica para la descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS). Las interacciones químicas que ocurren en el suelo son muy complejas, pero comprender ciertos conceptos básicos ayudará a gestionar el manejo de la fertilidad del suelo de una manera más eficiente.

En el departamento del Cauca, los suelos son originados a partir de depósitos de cenizas volcánicas y rocas ígneas, característicos de suelos ándicos; el departamento, según la clasificación climática de Köppen y Geiger (Beck et al., 2018), se ubica dentro del paisaje de altiplanicie con clima templado húmedo. Estos suelos son profundos, bien drenados, con texturas de moderadamente gruesas a moderadamente finas, de fuerte a moderadamente ácidos, con alta saturación de aluminio y fertilidad natural baja-moderada (IGAC, 2009).

De acuerdo con estas características generales, a continuación se presenta información relevante sobre la CIC, la MO y el pH, con el fin de tener una mayor comprensión sobre los procesos en que intervienen, para orientar de forma más adecuada la toma de decisiones en los planes de manejo nutricionales de los cultivos de aguacate Hass.

## Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Como se mencionó, la química del suelo es la interacción de varios componentes químicos que tiene lugar entre las partículas y la solución del suelo (el agua retenida por el suelo). El tamaño de las partículas del suelo determina su textura y se relaciona estrechamente con las características químicas predominantes que puedan llegar a asegurar la disponibilidad de nutrientes para el desarrollo de los cultivos. En la tabla 3 se relacionan las clases texturales según el sistema de clasificación de suelos más conocido: el triángulo de textura del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1951, 2017).

**Tabla 3.** Clasificación textural de los suelos según el USDA

Nombres vulgares de los suelos (textura general)	Arenoso (%)	Limoso (%)	Arcilloso (%)	Clase textural
Suelos arenosos (textura gruesa)	86-100	0-14	0-10	Arenoso
	70-86	0-30	0-15	Arenoso Franco
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso
Suelos francos (textura mediana)	23-52	28-50	07-27	Franco
	20-50	74-88	0-27	Franco limoso
	0-20	88-100	0-12	Limoso

<b>Nombres vulgares de los suelos (textura general)</b>	<b>Arenoso (%)</b>	<b>Limoso (%)</b>	<b>Arcilloso (%)</b>	<b>Clase textural</b>
Suelos francos (textura moderadamente fina)	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso
	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso
	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso
Suelos arcillosos (textura fina)	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso
	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso
	0-45	0-40	40-100	Arcilloso

**Fuente:** FAO (s. f.).

De acuerdo con la clasificación textural general, los suelos pueden ser de textura gruesa, media y fina. Los de textura gruesa-moderadamente gruesa presentan más del 50% de arenas y menos del 20% de arcillas; los de textura media contienen menos del 27% de arcillas y menos del 52% de arena, y los de textura fina contienen más del 35% de arcillas y más del 20% de limos (tabla 4). Las partículas de arena son las más grandes, y varían de 2 mm a 0,05 mm de diámetro; las de limo son más pequeñas, pues oscilan entre 0,05 mm y 0,002 mm, y las de arcilla son menores de 0,002 mm (Abd-Elmabod et al., 2017). Las fracciones gruesas, gravas y arenas, compuestas principalmente por fragmentos de roca o minerales primarios, actúan como partículas individuales con un área superficial específica baja y relativamente no reactivas. En lo que respecta a las principales propiedades del suelo, la fracción arcillosa es la que controla la mayoría de sus propiedades. Las arcillas están formadas por minerales secundarios, llamados aluminosilicatos (cristalinos), con un área superficial altamente reactiva (Mandal UK, 2007). En la tabla 4 se relacionan las propiedades asociadas con el área superficial de distintos tamaños de partículas de suelos (King et al., 2003).

**Tabla 4.** Área superficial de distintos tamaños de partículas de suelos

Tipo de partícula	Diámetro (mm)	Partículas/g	Área superficial específica (cm <sup>2</sup> /g)
Arena muy gruesa	2,00–1,00	90	11
Arena gruesa	1,00–0,50	720	23
Arena media	0,50–0,25	5700	45
Arena fina	0,25–0,10	46000	91
Arena muy fina	0,10–0,05	722000	227
Limo	0,05–0,002	5776000	454
Arcilla	< 0,002	90260000000	8000000

Fuente: King et al. (2003).

Los suelos arcillosos retienen más nutrientes y agua que los suelos gruesos/arenosos debido a su mayor número de sitios de intercambio catiónico y, por ende, a su mayor capacidad de absorción de nutrientes. La materia orgánica (MO) también tiene sitios cargados negativamente que atraen y retienen partículas cargadas positivamente (cationes). Por lo tanto, los suelos arenosos dependen del contenido de MO para aumentar la CIC. Las moléculas de nutrientes cargadas positivamente, llamadas “cationes básicos” (calcio, magnesio, potasio y sodio) y “cationes ácidos” (hidrógeno y aluminio), son atraídas por las cargas negativas de las partículas del suelo, y a esto se le llama “adsorción”. La CIC es una medida de esa carga negativa y, por lo tanto, de la capacidad de los suelos para equilibrarse y retener elementos con carga positiva, es decir, cationes intercambiables; es por esto que el número de cargas negativas está determinado por el tipo y la cantidad de arcilla presente. La CIC es un criterio importante para mantener cantidades adecuadas de calcio (Ca<sup>2+</sup>), magnesio (Mg<sup>2+</sup>) y potasio (K<sup>+</sup>) disponibles para las plantas, y normalmente se expresa en unidades de carga por peso de suelo. Se utilizan dos conjuntos de unidades diferentes,

pero numéricamente equivalentes: meq/100 g (miliequivalentes de elemento por 100 gramos de suelo seco) o cmolc/kg (centimoles de carga por kilogramo de suelo seco) (Local Land Service, 2020). Para interpretar los resultados de la CIC, en la tabla 5 se relacionan los rangos referenciados por varios autores (Huggett, 2005; Moorberg & Crouse, 2017, CUCE, 2007) para diferentes tipos de arcillas y valores reportados para la MO y diferentes clases texturales del suelo.

**Tabla 5.** Capacidad de intercambio catiónico (CIC) para diferentes tipos de arcilla, materia orgánica (MO) y texturas del suelo

		meq/100 g
*Tipo de arcilla	Caolinita	3 – 18
	Haloisita	5 – 40
	Clorita	10 – 40
	illita	10 – 40
	Montmorillonita	60 – 150
	Vermiculita	100 – 215
Materia orgánica	MO	200 – 400
Textura del suelo	Arena	1 – 5
	Franco Arenoso	5 – 10
	Franco	5 – 15
	Franco Arcilloso	15 – 30
	Arcilloso	>30

\* CUCE (2007)

Fuente: Huggett (2005).

Los suelos de los municipios de Morales y El Tambo, en el departamento del Cauca, presentan propiedades de suelos ándicos, originados a partir de depósitos de cenizas volcánicas y rocas ígneas. De acuerdo con el IGAC (2009), estos suelos se clasifican como Typic Hapludands

dentro de las unidades cartográficas asociación Typic Hapludands-Humic Pachic Dystrudepts (AQA) y asociación Typic Hapludands-Typic Dystrudepts-Typic Paleudults (AQC).

Estos suelos presentan una textura franco-arenosa en todos sus horizontes, con el  $75,3\% \pm 1,9\%$  de arena, el  $18\% \pm 1,5\%$  de limo y el  $6,7\% \pm 0,3\%$  de arcilla. La CIC presenta valores de 5,6 meq/100 g, por lo cual se considera un suelo muy pobre para intercambiar nutrientes como calcio, magnesio, sodio y potasio, principalmente, característica que puede explicarse por la textura franco-arenosa de este tipo de suelos.

Los andisoles son un grupo de suelos derivados de ceniza volcánica que presentan densidad aparente  $\leq 0,9 \text{ g/cm}^3$ , retención de fosfatos  $\geq 85\%$ , y por la naturaleza de la fracción arcillosa amorfa y los complejos organominerales de aluminio y hierro, presentan alta superficie específica y abundantes sitios reactivos para la retención de fosfatos (Alcalá et al., 2009). El fósforo disponible, de alta demanda en la agricultura moderna, es muy bajo en los andisoles, ya que es fuertemente retenido por los materiales no cristalinos de aluminio y de hierro; de otra parte, el fósforo aplicado al suelo reacciona rápidamente con los citados materiales y termina formando componentes insolubles metal-fosforados. (Shoji et al., 2002). En los andisoles predominan las arcillas caolinita y esmectita, por lo general mal cristalizadas; sin embargo, la composición mineralógica como tal depende del grado evolutivo del andisol: esmectitas en etapa juvenil y caolinitas en estado maduro. Aunque no de forma frecuente, también se puede encontrar en la arcilla haloisitas, asociadas con climas en etapa de sequedad (Sánchez & Rubiano, 2015), De acuerdo con los rangos propuestos en la tabla 6, la caolinita y la haloisita son dos tipos de arcillas con menor CIC predominantes en los suelos del Cauca.

La MO presenta una CIC entre 200 y 400 meq/100 g (tabla 5), y en suelos de zonas productoras de aguacate del Cauca se presentan niveles altos de MO, con valores que alcanzan el 12%. Frente a la

baja CIC que se presenta en las arcillas del tipo caolinita y haloisita, la MO, al tener una alta CIC, puede contribuir a la disponibilidad de nutrientes, con diferencias en función del tipo de suelo. Por ejemplo, el nitrógeno, en los andisoles con altos contenidos de MO, se acumula en cantidades altas sobre el componente orgánico y es muy resistente a la descomposición microbial (mineralización); se ha encontrado que el porcentaje de nitrógeno mineralizable en suelos de cenizas volcánicas se reduce a la mitad en comparación con el que se encuentra en suelos no volcánicos con contenidos similares de MO (Shoji et al., 2002). En un estudio llevado a cabo en El Tambo (Cauca) (Bravo et al., 2016), se hizo un análisis cuantitativo de los alófanos presentes en estos suelos, y se encontró que los alófanos influyen negativamente en su nivel de fertilidad, lo cual se manifestó, principalmente, en una fuerte deficiencia de fósforo y boro, y en su fuerte acidez, con una alta retención aniónica, que predomina sobre la retención catiónica, provocando la fuerte deficiencia de bases de cambio. Por sus propiedades isoelectricas, el alófano puede adsorber cationes y aniones dependiendo del pH, que regula la ionización de sus grupos activos. A valores de pH superiores a 5,5, generan alta CIC, propiedad ventajosa para el suelo porque impide el lavado de nutrientes hacia horizontes más profundos, por lo que quedan disponibles para las plantas. En suelos ácidos, como la mayoría de los suelos del Cauca, se presenta alta retención de aniones como el fosfato, el sulfato, el molibdato y el borato, lo cual genera una fuerte deficiencia de estos nutrientes en los cultivos (Bravo et al., 2016).

## Contenido de materia orgánica (MO)

La materia orgánica del suelo (MO) está influida por procesos de descomposición tanto bióticos como abióticos. Los procesos abióticos se presentan por acción mecánica que actúa sobre la hojarasca, y los bióticos hacen referencia a descomponedores bacterianos y fúngicos. La MO se define como la suma de residuos vegetales y animales en diversas etapas de descomposición (Brady & Weil,

2008). Los tres depósitos principales de MO, según su tiempo de descomposición completa, son los siguientes: activos (1-2 años), lentos (15-100 años) y pasivos (500-5.000 años) (Brady & Weil, 2008; McCauley et al., 2009). Los microorganismos descomponen continuamente tanto la MO activa como la lenta, retornando a la solución del suelo gran cantidad de nutrientes esenciales ligados orgánicamente, como N y P, entre otros. La MO se comporta como una esponja, con la capacidad de absorber y retener hasta el 90 % de su peso en agua; además, hace que el suelo se aglutine y forme agregados de suelo, lo que mejora su estructura (Overstreet, 2009). La MO activa se compone principalmente de residuos frescos de plantas y animales, y se descompone con bastante rapidez. La MO lenta, que consiste principalmente en detritos (células y tejidos de material descompuesto), es parcialmente resistente a la descomposición microbiana, y permanece en el suelo más tiempo que la MO activa. A diferencia de las MO activa y lenta, la MO pasiva, o humus, no es biológicamente activa y corresponde al reservorio responsable de influir sobre las propiedades químicas y físicas del suelo (McCauley et al., 2009).

Temperaturas altas estimularían la mineralización del nitrógeno del suelo a partir de la MO, lo que en teoría conduciría a la liberación de más N inorgánico, pero este proceso, a su vez, está restringido por limitaciones en el contenido de agua del suelo. Es de destacar que un aumento de 5 °C en ecosistemas forestales conduce a una producción adicional de N inorgánico de hasta 80 kg/ha, equivalente a ocho veces los aportes atmosféricos de nitrógeno observados en bosques vírgenes. Aunque la temperatura y la humedad son factores importantes que determinan la mineralización del nitrógeno del suelo, la calidad y cantidad total de sustrato y la actividad microbiana también son importantes. La velocidad de descomposición de la MO depende de la temperatura, la humedad y otras condiciones del suelo que influyen en la actividad microbiana (Campbell et al., 1993, 2009; Gómez-Guerrero & Doane, 2018). En la tabla 6 se relacionan los contenidos de MO en relación con el clima.

**Tabla 6.** Interpretación del porcentaje de materia orgánica (MO) del suelo

Clima	Bajo	Medio	Alto
Frío	< 5	5-10	> 10
Templado	< 3	3 - 5	> 5
Cálido	< 2	2-3	> 3

Fuente: ICA (1992).

El pH del suelo es reconocido como un importante regulador de la actividad y población microbiana que actúa sobre la MO (Haynes, 1986, cap. 2; Paul & Clark, 1996). Las bacterias son más activas en un rango de pH entre 6 y 8; los actinomicetos, entre 7 y 7,5, y los hongos prefieren condiciones ácidas, con pH que alcanzan valores de 4 (Zapata, 2004). Las reducciones en la velocidad de descomposición de la MO debido a la inhibición de la actividad microbiana inducida por la acidez del suelo probablemente se limitan a los suelos que soportan concentraciones tóxicas de Al (o Mn) soluble (Adams & Martin, 1984). Biederbeck et al. (1996) demostraron que, incluso cuando el pH se redujo de 5,2 a 4,3 mediante el uso prolongado de fertilizantes nitrogenados, la acidez no redujo las poblaciones de hongos y bacterias en suelos arcilloso-calcáreos (marga).

En los municipios de estudio en el Cauca, se encontraron niveles altos de MO, del 12,4%, como posible indicador de la disponibilidad de nitrógeno, y a nivel de planta se registra en promedio un nivel adecuado del 2,7% de N foliar. También se confirman niveles bajos de Al, con valores de 0,11 cmol/kg, que no representan problemas de toxicidad.

## pH del suelo

El pH del suelo es un factor importante que afecta muchas reacciones químicas y biológicas, así como la disponibilidad de nutrientes para las plantas y la toxicidad de algunos elementos. Se define como el

logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno ( $H^+$ ); un suelo se considera ácido cuando el pH es inferior a 7, neutro con pH de 7 y alcalino con valores superiores a 7. La condición de acidez de un suelo está influida por el tipo de ion predominante para formar ácidos o bases. Los cationes formadores de ácido comunes (iones disueltos cargados positivamente) son hidrógeno ( $H^+$ ), aluminio ( $Al^{3+}$ ) y hierro ( $Fe^{2+}$  o  $Fe^{3+}$ ), mientras que los cationes formadores de base comunes incluyen el calcio ( $Ca^{2+}$ ), el magnesio ( $Mg^{2+}$ ), el potasio ( $K^+$ ) y el sodio ( $Na^+$ ) (McCauley et al., 2009). En la tabla 7 se presenta la clasificación del pH del suelo de acuerdo con el USDA (1993).

**Tabla 7.** Clasificación del pH del suelo

Valor	Clasificación
< 3,5	Ultra ácido
3,5 – 4,4	Extremadamente ácido
4,5 – 5,0	Muy fuertemente ácido
5,1 – 5,5	Fuertemente ácido
5,6 – 6,0	Moderadamente ácido
6,1 – 6,5	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
> 9,0	Muy fuertemente alcalino
	Vermiculita

**Fuente:** USDA (1993).

En Colombia, una alta proporción del aguacate se ha establecido en zonas productoras con tradición cafetera. Estas zonas presentan características como altas precipitaciones y baja evapotranspiración, con una consecuente lixiviación de cationes; suelos con predominancia de texturas francas a franco-arenosas, con rápido drenaje;

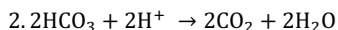
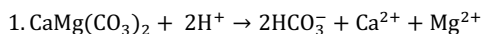
pH de moderado a fuertemente ácido, y material parental con predominancia de alófanas, con alta retención de aniones como el fosfato, el sulfato, el molibdato y el borato, lo cual genera una fuerte deficiencia de estos nutrientes en los cultivos (Bravo et al., 2016). El pH óptimo del suelo para el aguacate, como recomendación general, oscila entre 5 y 7 (Samson, 1986).

Cuando la lluvia cae sobre el suelo durante gran parte del año y es mayor que la evapotranspiración, provoca por lixiviación la salida del perfil del suelo de los iones más solubles, como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , y permanecen los iones que confieren acidez por hidrólisis y que corresponden a los cationes metálicos  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Mn}^{4+}$ . Esta es la causa por la que, a mayores precipitaciones, menor es el pH del suelo (Bolan & Hedley, 2003; Zapata, 2004). En un estudio llevado a cabo por Ortíz-Escobar et al. (2004) en veinte andisoles de la zona cafetera, se encontró que, aunque existen altos contenidos de Al intercambiable ( $\text{Al}^{3+} > 1,5 \text{ cmol/kg}$ ), estos no se encuentran dentro de niveles tóxicos. En las condiciones de Morales y El Tambo (Cauca), se encontraron niveles de concentración de aluminio de  $0,14 \pm 0,03$ , lo cual se clasifica dentro del rango de normalidad.

Además de los procesos naturales que actúan sobre la acidez del suelo, existen otros factores externos que también contribuyen a incrementarla, como la nutrición de las plantas, la descomposición de la  $\text{MO}$ , la fertilización y la contaminación química (lluvias ácidas). Por ejemplo, la absorción de nutrientes por las plantas trae consigo una transferencia de  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$  desde la raíz hacia la solución del suelo, y la oxidación de las formas reducidas de azufre y nitrógeno genera acidez al oxidarse y producir una gran cantidad de protones (Zapata, 2004).

El manejo de la acidez del suelo implica el desarrollo de técnicas que van desde la obtención de plantas con adaptación a condiciones ácidas hasta la orientación de prácticas como el uso de enmiendas (cal y yeso) que modifiquen la condición de acidez hacia la neutralidad, de forma que las plantas puedan tener disponibles todos





De acuerdo con Alfaro y Bernier (2008), los andisoles (suelos derivados de cenizas volcánicas) son suelos de carga variable, lo que, sumado a su alta capacidad tampón (resistencia al cambio de pH) y a su moderada CIC, hace muy complejo determinar un método común para el cálculo de los requerimientos de cal. Existen ecuaciones empíricas propuestas en la literatura para determinar los requerimientos de cal. La siguiente ecuación propuesta por Cochrane et al. (1980) contempla el porcentaje que representa la saturación de Al de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), para calcular la cantidad de cal por aplicar:

$$\text{Dosis de CaMgCO}_3/\text{ha} = 1,5 [\text{Al} - \text{RSA} (\text{Al} + \text{Ca} + \text{Mg})/100]$$

Donde,

Al, Ca y Mg = cmol/kg de suelo de aluminio, calcio y magnesio.

RSA = porcentaje requerido de saturación de Al en relación con la CICE.

CICE =  $\sum$ (Al, Ca, Mg, K, Na) en cmol/kg.

1,5 = un factor empírico que depende de las cantidades relativas de acidez del suelo intercambiable y no intercambiable.

El aluminio existe en los suelos en muchas formas minerales, incluidos óxidos hidratados, aluminosilicatos, sulfatos y fosfatos. En suelos ácidos se presenta una alta saturación de Al, y dado que su solubilidad depende en gran medida del pH, cuando un suelo ácido es encalado, el Al intercambiable y soluble se precipita en forma de especies de hidroxil-Al (Haynes & Mokolobate, 2001). Como alternativa para reducir los niveles de concentración de Al en el

suelo y su posible toxicidad, los productos de descomposición de la MO (ácidos húmicos y orgánicos) pueden formar complejos con Al.

La efectividad del material calcáreo utilizado depende de su velocidad de reacción con el suelo, que a su vez está determinada por la finura de sus partículas, el pH inicial del suelo, el grado en que se mezcla con el suelo y su naturaleza química; por ejemplo, los óxidos e hidróxidos reaccionan más rápidamente que los carbonatos. En la tabla 8 se relacionan los materiales comúnmente utilizados, así como su valor relativo de neutralización (Uchida & Hue, 2000).

**Tabla 8.** Materiales utilizados para el encalado

<b>Material</b>	<b>Nombre comercial</b>	<b>Valor relativo de neutralización</b>
Caliza calcítica	Carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	100
Cal viva	Óxido de calcio (CaO)	150-175
Cal hidratada	Hidróxido de calcio Ca(OH) <sub>2</sub>	120-135
Cal dolomita	Carbonato de calcio-magnesio	95-108

**Fuente:** Elaboración propia con base en Uchida y Hue (2000).

