



Nutrición del café

Consideraciones para el manejo de la fertilidad del suelo

Siavosh Sadeghian Khalajabadi



Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia

80 años de Ciencia
para la Caficultura colombiana



Nutrición del café

Consideraciones
para el manejo
de la fertilidad
del suelo

Siavosh Sadeghian
Khalajabadi



80 años de Ciencia
para la Caficultura
colombiana



**Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia**

Comité Nacional

Ministro de Hacienda y Crédito Público

José Manuel Restrepo Abondano

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural

Rodolfo Enrique Zea Navarro

Ministro de Comercio, Industria y Turismo

María Ximena Lombana Villalba

Director del Departamento Nacional de Planeación

Luis Alberto Rodríguez Ospino

Representante del Gobierno en Asuntos Cafeteros

Marcela Urueña Gómez

Período 1° enero/2019 - diciembre 31/2022

José Eliecer Sierra (Antioquia)

José Alirio Barreto (Boyacá)

Eugenio Vélez Uribe (Caldas)

Danilo Reinando Vivas (Cauca)

Juan Camilo Villazón (Cesar-Guajira)

Javier Bohórquez Bohórquez (Cundinamarca)

Ruber Bustos Ramírez (Huila)

Javier Mauricio Tovar (Magdalena)

Jesús Armando Benavides (Nariño)

Armando Amaya Álvarez (Norte de Santander)

Carlos Alberto Cardona (Quindío)

Luis Miguel Ramírez (Risaralda)

Héctor Santos Galvis (Santander)

Luis Javier Trujillo Buitrago (Tolima)

Camilo Restrepo Osorio (Valle)

Gerente General

Roberto Vélez Vallejo

Gerente Administrativo y Financiero

Juan Camilo Becerra Botero

Gerente Comercial

Juan Camilo Ramos

Gerente Técnico

Hernando Duque Orrego

Director Investigación Científica y Tecnológica

Álvaro León Gaitán Bustamante

Comité Editorial Cenicafé

Pablo Benavides M.

Ph.D. Ing. Agrónomo. Entomología, Cenicafé

Luis Fernando Salazar G.

Ph.D. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafé

Carmenza Esther Góngora B.

Ph.D. Microbióloga. Entomología, Cenicafé

José Ricardo Acuña Z.

Ph.D. Biólogo. Fisiología Vegetal, Cenicafé

Diana María Molina Vinasco

Ph.D. Bacterióloga. Mejoramiento Genético, Cenicafé

Secretaría Técnica Comité Editorial, revisión de textos y corrección de estilo

Sandra Milena Marín L.

Ing. Agrónoma, Esp. M.Sc.

Diseño

Carmenza Bacca R.

Diagramación

Óscar Jaime Loaiza E.

Fotografías

Archivo Cenicafé

Impresión

Empresa

© FNC - Cenicafé

2022

ISBN 978-958-8490-59-5

ISBN 978-958-8490-60-1 (En línea)

DOI 10.38141/cenbook-0017

Los trabajos suscritos por el personal técnico del Centro Nacional de Investigaciones de Café son parte de las investigaciones realizadas por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Sin embargo, tanto en este caso como en el de personas no pertenecientes a este Centro, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la Entidad.



Como citar:

Sadeghian Khalajabadi, S. (2022). *Nutrición del café. Consideraciones para el manejo de la fertilidad del suelo*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0017>



Índice

- 6 Presentación**
- 10 El suelo: propiedades y fertilidad**
El suelo
Constituyentes del suelo
Propiedades físicas del suelo
Propiedades químicas del suelo
Clasificación de suelo
Fertilidad del suelo
- 40 Nutrientes minerales: Extracción, partición y remoción**
Elementos esenciales para las plantas
Movimiento de iones del suelo hacia la raíz
Absorción de los nutrientes
Movilidad de los nutrientes en la planta
Funciones de los nutrientes en la planta
Extracción, partición y acumulación de los nutrientes en café
- 54 Manejo de la acidez del suelo**
Concepto de ácido y base
El origen de la acidez del suelo
Medición de la acidez
Relación entre el pH del suelo y los cationes intercambiables
Implicaciones de la acidez en el crecimiento del café
Manejo de la acidez del suelo
Calidad de las enmiendas
Humedad (H)
Poder de neutralización (PN)
Equivalente químico (EQ)
Eficiencia granulométrica (EG)
Equivalente químico (EQ)
Eficiencia granulométrica (EG)
Poder relativo de neutralización total (PRNT)

Efecto del encalado en las propiedades del suelo
Respuesta del café al encalado
Criterios para corregir la acidez
Consideraciones prácticas para el manejo de la acidez del suelo

82 Nitrógeno, fósforo y potasio

Nitrógeno
Materia orgánica: fuente de nitrógeno en el suelo
Dosis y fuentes de nitrógeno
Pérdidas de nitrógeno por volatilización y lixiviación
Fósforo
El fósforo en el suelo
Dosis y fuentes de fósforo
Potasio
Potasio en el suelo
Dosis y fuentes de potasio

102 Calcio, magnesio y azufre

Calcio
Calcio en el suelo
Dosis y fuentes de calcio
Magnesio
Magnesio en el suelo
Dosis y fuentes de magnesio
Azufre
Azufre en el suelo
Dosis y fuentes de azufre

114 Micronutrientes

Extracción de los micronutrientes
Concentración foliar de micronutrientes
Micronutrientes en los frutos
Micronutrientes en el suelo
Hierro (Fe)
Manganeso (Mn)
Boro (B)
Cobre (Cu)
Zinc (Zn)
Cloro (Cl)
Interpretación de los resultados de análisis de suelos
Producción de café en respuesta al suministro de micronutrientes

134

Evaluación de la fertilidad del suelo

El suelo como reserva de nutrientes
Análisis de suelos
 Muestreo del suelo
 Análisis químico de suelo
 Calibración de los resultados del análisis de suelos
Interpretación de los resultados del análisis de suelos
Recomendación de nutrientes

156

Estado nutricional de las plantas

Diagnóstico visual de deficiencias nutricionales
Relación entre movilidad de nutrientes y síntomas de deficiencia
Diagnóstico foliar
Muestreo
Interpretación de los resultados
Rangos críticos y relaciones de nutrientes

176

Manejo de nutrientes en sistemas de producción de café

Manejo de la nutrición en la etapa de almácigo
 Fertilizantes orgánicos
 Fósforo
 Nitrógeno, potasio y magnesio
 Manejo de la acidez
 Aplicación foliar de fertilizantes
 Micorrizas
Manejo de la nutrición en la etapa de establecimiento
Manejo de la nutrición en la etapa de crecimiento

Manejo de la nutrición en la etapa de producción

Densidad de plantas y fertilización
Sombrío y fertilización
Ajuste de la fertilización según densidad de plantas y sombrío
Manejo de la nutrición con base en el análisis de suelos
Alternativas generales de fertilización
Épocas de fertilización
Forma de aplicación

Manejo de la nutrición en cafetales renovados
Aplicación foliar de nutrientes
Aspectos económicos de la fertilización
Fertilización con abonos orgánicos

198

Fertilizantes

Definición de fertilizantes
Aprovechabilidad de los fertilizantes
Contenido nutricional de los fertilizantes
Grado de los fertilizantes
La fórmula de nutrientes de los fertilizantes
 Fertilizantes simples
 Fertilizantes compuestos
 Equivalente de acidez o basicidad residual
 Consideraciones acerca de algunos fertilizantes minerales
 Fertilizantes minerales para café
Fertilizantes orgánicos
Compatibilidad química de las mezclas
Consumo de fertilizantes en Colombia
Cálculo de mezclas de fertilizante

215

Literatura citada



Presentación



El suelo, el agua, la biodiversidad y el aire, son los recursos que históricamente los caficultores han preservado como parte de su tradición de producción amigable con el medio ambiente, en una tradición que hoy va de la mano con el requerimiento de incluir a la sostenibilidad como un valor agregado del Café de Colombia, que le suma a su gran calidad en taza, y al impacto social y económico en el país.

Con la Campaña para la Defensa y Restauración de Suelos, adelantada desde 1947 ante la amenaza de la erosión, la Federación Nacional de Cafeteros ya reconocía la importancia de estudiar este componente fundamental de la actividad agrícola, caracterizado por ser altamente fértil en las montañas de Colombia debido a los contenidos significativos de materia orgánica, pero también muy vulnerable por la ocurrencia constante de lluvias y la ubicación de la caficultura en las laderas, aspectos de la oferta climática y geográfica muy particulares de este país.

Posteriormente, el cambio de variedades de porte alto, como Típica y Borbón, por la variedad Caturra de menor altura, que al mismo tiempo permitió un aumento importante de las densidades de siembra, llegando hasta 10.000 plantas por hectárea, y con un manejo adecuado de la luminosidad que originó la caficultura a libre exposición solar, constituyeron la denominada tecnificación de la caficultura, con un salto en productividad que ubicó a Colombia como el segundo productor mundial de café después de Brasil por muchos años, pero que también obligó a ajustar la oferta nutricional de las plantas, incrementando la fertilidad del suelo mediante la aplicación de abonos minerales.

Esta “Revolución Verde” de la caficultura implicó adelantar estudios de caracterización de suelos de las zonas cafeteras, describiendo sus propiedades físicas y químicas, entendiendo la fisiología de la planta de café en cuanto a la extracción y distribución de los nutrientes asimilables, aprendiendo a manejar la acidez de los suelos como factor determinante para que la planta pueda tomar

eficazmente los elementos esenciales para su crecimiento y reproducción, y evaluando los desarrollos que la industria de fertilizantes ha ofrecido a lo largo del tiempo, para así generar recomendaciones que fueran biológicamente eficaces y económicamente justificables.

Como parte de la conmemoración de las ocho décadas en que los caficultores de Colombia le han encomendado a Cenicafé la generación y adaptación del conocimiento técnico para la toma de decisiones en sus sistemas productivos, el investigador Siavosh Sadeghian, PhD, Líder de la Disciplina de Suelos, ha condensado en la presente obra los resultados de años de trabajo de investigación científica en la nutrición de café y en manejo de la fertilidad del suelo, componentes que soportan la estrategia “Más Agronomía, Más Productividad, Más Calidad” de la Gerencia Técnica de la Federación. Esta información es fundamental para señalar el estado actual de avance en la práctica de fertilización, así como para que el Servicio de Extensión pueda hacer recomendaciones sólidas relacionadas con el insumo agrícola con más peso en la estructura de costos de producción, como es el abono, y con tanto efecto en la productividad de la finca y en los ingresos del caficultor.

Aunque el gran total del área sembrada en café en Colombia hoy consume solo una tercera parte del fertilizante que requiere técnicamente para alcanzar el óptimo biológico y económico por hectárea, la producción del grano también está sujeta a las tendencias mundiales que propenden por un uso racional de los abonos minerales por cuenta de la emisión de gases de efecto invernadero, que aumentan el riesgo del calentamiento global. Es por esto que corrientes

como la agricultura sostenible y la agricultura regenerativa, promueven una reducción en la aplicación de fertilizantes de síntesis y su combinación con los fertilizantes orgánicos, subproductos de la producción agrícola que la economía circular busca reutilizar mediante diferentes mecanismos. Adicionalmente, la demanda agrícola mundial por fósforo y potasio, y el valor de la energía requerida para fijar químicamente el nitrógeno atmosférico, ocasionan variaciones en los precios de la fertilización, que obligan al caficultor a tomar decisiones cada vez más precisas en cuanto a las cantidades y calidades de los abonos y enmiendas requeridos, de manera que sea más efectiva su relación costo/beneficio, y que en el largo plazo le permitan mantener o mejorar la fertilidad del suelo.

Es por esto que el conocimiento de la dinámica en el suelo de los minerales que definen la fertilidad, de las necesidades propias de la planta de café, y de las opciones de abonos adecuadas para las diferentes etapas del cultivo, se convierte en una herramienta indispensable para buscar la rentabilidad del negocio cafetero, así como para satisfacer las expectativas de los mercados en cuanto a producciones sostenibles y ambientalmente favorables. “Nutrición del café, consideraciones para el manejo de la fertilidad del suelo” ilustra de gran manera este conocimiento y conecta a productores, industria y consumidores en el campo científico que soporta la adopción tecnológica en la mejor caficultura del mundo.

Álvaro León Gaitán B.

Director Cenicafé

Julio de 2022

A photograph of a coffee plantation. A path covered in a thick layer of brown mulch (coffee husks) leads into the distance. On either side of the path are rows of coffee plants with dark green, glossy leaves. In the background, taller trees with light-colored trunks are visible through the canopy. A semi-transparent brown banner with white text is overlaid across the middle of the image.

El suelo: propiedades y fertilidad



El crecimiento y la producción de las especies cultivadas, entre ellas el café, depende directa o indirectamente de muchos de los atributos de la (planta especie/variedad), el suelo, el clima y el sistema de manejo (Tabla 1). Estos factores no actúan de manera independiente, más bien están interrelacionados; de allí la dificultad que a veces se presenta en reconocer el efecto de cada uno por separado. En ciertos casos, será posible incrementar la productividad del café mediante el manejo, pero en otros no, pues siempre existirán factores que no serán controlables o, por lo menos, no del todo, entre estos están los climáticos o algunas propiedades del suelo.

Uno de los aspectos determinantes en los sistemas de producción de café tiene que ver con la nutrición de las plantas, proceso fisiológico que se relaciona a su vez con las propiedades del suelo, las condiciones del clima y el manejo del cultivo. Cuando las raíces de las plantas encuentran un medio apto para su crecimiento, se extienden y toman desde la solución del suelo los elementos requeridos, produciendo cosechas abundantes y de buena calidad. Son ejemplo de ello los suelos profundos, con texturas francas y altos contenidos de materia orgánica, los cuales pueden almacenar y poner a la disposición de las plantas suficientes cantidades de agua. En contraste, ante condiciones limitativas de orden físico, químico y biológico, se ve afectado el desarrollo de las plantas y su productividad.

Por lo anterior, un plan acertado de nutrición debe iniciarse con la identificación de las propiedades del suelo que afectan el crecimiento de las raíces y la disponibilidad de los nutrientes para la planta, como son, encharcamiento, compactación y acidez. Parte de este ejercicio se logra mediante el análisis del suelo; sin embargo, esta herramienta por sí sola no es suficiente y debe complementarse con la revisión de las condiciones predominantes en el lote. Paralelo al manejo de las limitantes, será necesario proporcionar los nutrientes que demanda el cultivo, mediante la aplicación de fertilizantes.

Tabla 1.

Factores que afectan la producción potencial de los cultivos. Tomado de Havlin et al. (2017).

Factores climáticos	Factores del suelo	Factores del cultivo
Precipitación	Materia orgánica	Especie y variedad de cultivo
Cantidad	Textura	Calidad de la semilla
Distribución	Estructura	Época de la siembra
Temperatura del aire	Capacidad de intercambio catiónico	Densidad de siembra
Humedad relativa	pH y saturación de bases	Arreglo espacial de plantas
Luz	Pendiente y topografía	Evapotranspiración
Cantidad	Temperatura del suelo	Disponibilidad de agua
Intensidad	Factores de manejo del suelo	Nutrición
Duración	Labranza	Problemas fitosanitarios
Altitud/latitud	Drenaje	Insectos
Viento	Otros	Enfermedades
Velocidad	Profundidad efectiva (zona de raíces)	Arvenses
Distribución	Suministro de nutrientes	Eficiencia de cosecha
Concentración de CO ₂	Elementos tóxicos	Rotación de cultivos

El suelo

Definición y funciones

Existen diversas definiciones del suelo, según la disciplina que lo estudie. Desde la edafología, ciencia que trata la influencia de los suelos en los seres vivos, particularmente las plantas, el suelo es “el material mineral u orgánico no consolidado en la superficie inmediata de la Tierra que sirve como medio natural para el crecimiento de las plantas terrestres” (Soil Science Society of America [SSSA], 2008).

El concepto del suelo está estrechamente relacionado con la vida misma. Weil & Brady (2017) resumen en cinco aspectos las funciones del suelo en cualquier ecosistema:

- I. Soporte para el crecimiento de las plantas superiores. El suelo provee el medio para el crecimiento de las raíces y proporciona nutrientes a las plantas. Sus propiedades determinan de manera directa el tipo de vegetación e indirectamente la diversidad y el número de seres vivos, incluyendo a la gente, que la vegetación puede soportar.

- II. Las propiedades del suelo son los principales factores que, en últimas, determinan el destino del agua en el sistema hidrológico. La pérdida, utilización, contaminación y purificación del agua son afectados por el suelo.

- III. El suelo funciona como el sistema de reciclaje de la naturaleza. Los residuos y los restos muertos de las plantas y animales son asimilados en el suelo, aportando elementos disponibles para ser reutilizados por la próxima generación de la vida.

- IV. Los suelos proveen el hábitat para una gran cantidad de seres vivos, desde mamíferos pequeños, reptiles e insectos hasta microorganismos.

- V. El suelo juega un papel importante en los ecosistemas creados por el hombre, pues de este se obtienen los materiales para la construcción de edificios, caminos y puentes, entre otros.

El suelo, como recurso natural, es fundamental para la producción agrícola, pues gracias a sus propiedades, sirve de medio para el anclaje de las plantas y proporciona las condiciones

necesarias para su desarrollo. Se trata de un material poroso que permite la penetración de las raíces y el suministro de agua y nutrientes para las plantas.

Factores de formación

En la formación del suelo, como medio para el crecimiento de las plantas, intervienen cinco factores, conceptualizados por Jenny (1941), como son el **material parental**, el **clima**, los **organismos**, el **relieve** y el **tiempo**. Como consecuencia de la acción e interacción de estos factores se originan suelos, que difieren sustancialmente en su origen, apariencia, características y capacidad de producción.

El material parental es el factor con mayor influencia, pues su composición química y la constitución mineralógica condicionan la textura del suelo y la riqueza de nutrientes, acotados por los demás factores de formación. En la Tabla 2 se resumen los materiales que

dieron origen a los suelos de la zona cafetera de Colombia.

El relieve afecta, de manera indirecta, el transporte de materiales y la retención del agua y solutos. Algunos relieves disímiles se muestran en la Figura 1. El clima afecta la formación del suelo a través de la temperatura, la lluvia y el viento; por ejemplo, la temperatura determina la velocidad de las reacciones y el agua actúa como solvente y vehículo para el transporte de materiales a través del suelo y las plantas, además de contribuir a la desagregación cuando aumenta de tamaño al congelarse. Una muestra de la diversidad en el comportamiento de la lluvia, (cantidad y distribución) puede observarse en la Figura 2. Los organismos, representados por plantas, microorganismos, invertebrados, entre otros, aportan materia orgánica y revisten la superficie, además de aportar nutrientes y otros elementos químicos. El tiempo define la intensidad con la que actúan el clima y los organismos (Raij, 2011).

Tabla 2. Materiales parentales de las unidades cartográficas de suelos en la zona cafetera de Colombia (Gómez et al., 1991).

Unidad cartográfica de suelo	Material partental
Suroeste	Aglomerado
Tambillo	Andesita
Isnos	Andesita horbléndica
Titiribí	Andesita horbléndica feldespática
Siberia	Andesita ortosica
Chuscal	Anfibolita
La Mutis	Arenisca
Guadalupe	Arenisca
Cartagenita	Arenisca de grano fino
Mendarco	Arenisca y arcillolitas
Llana Fría, Llano de Palmas y Tarea	Areniscas
Miraflores	Areniscas de grano medio y ceniza volcánica
Chanchón	Areniscas ferruginosas
La Loma	Areniscas olivínicas
Guaduas y Venecia	Areniscas y arcillolitas
La Estrella	Areniscas y conglomerados
Sargento	Areniscas, arcillolitas y conglomerados
Doscientos, Mondomo y Mortiño	Basalto
Cincho	Calizas

Continúa...



...continuación

Unidad cartográfica de suelo	Material parental
Cajibío, Chinchiná, Doña Juana, El Peñol, El Rosario, Fondesa, Fresno, Libano, Malabar, Montenegro, Piendamó, Pubenza, Puracé, Quindío, San Agustín, Sandoná, Socorro, Sucre, Tambo y Timbío	Ceniza volcánica
Cantarranas	Chert
Vergel	Conglomerado
Salinas y Santa Cruz	Cuarzodiorita
Villapaz	Cuarzomonzonita
Seguengue	Cuerpos sedimentarios
Balboa y Dovio	Diabasa
Amagá	Diorita
Cascarero	Esquisto micáceo
Quiña y Tacueyó	Esquisto muscovítico
Cínera	Esquisto muscovítico - Gneiss biotítico
Génova	Esquisto serpentítico
Tablazo	Esquisto talcoso
Gualí, Pensilvania y Río Manso	Esquistos
Combeima	Filita
Paujil	Gneiss biotítico
El Recreo	Gneiss margoso
Garzón y La Victoria	Gneiss muscovítico
Junín y San Simón	Granito biotítico
La Espiga	Granito cuarcífero
Norte	Granito feldespático
Oriente	Granodiorita biotítica
Togüi	Limolitas
Rionegro	Limolitas y arcillolitas
Lengupá y Roperó	Lutitas
Villela	Lutitas calcáreas
La Laguna y Salgar	Pizarras
Colón	Sienita hornbléndica
Mayo	Toba andesítica
Saladoblanco	Toba volcánica

Perfil del suelo

Un corte vertical a través del suelo exhibe un patrón estratificado, el cual recibe el nombre de **perfil**, y cada uno de los estratos se denomina **horizonte** (Weil & Brady, 2017; California Plant Health Association, 2004). Los suelos bien desarrollados generalmente presentan un perfil particular con diferentes capas (Figura 3), la más superficial, llamada **horizonte A**, es más rica en materia orgánica, nutrientes y

organismos. Las plantas utilizan principalmente el suelo superficial como medio para crecer y obtener agua y nutrientes. En este horizonte, las partículas minerales más gruesas (arenas y limos) se transforman en arcillas y se originan otros constituyentes solubles, los cuales migran en profundidad, permaneciendo en este horizonte los materiales más resistentes a la meteorización y la materia orgánica. Por esta razón al horizonte A se le conoce como de máxima lixiviación o eluviación.

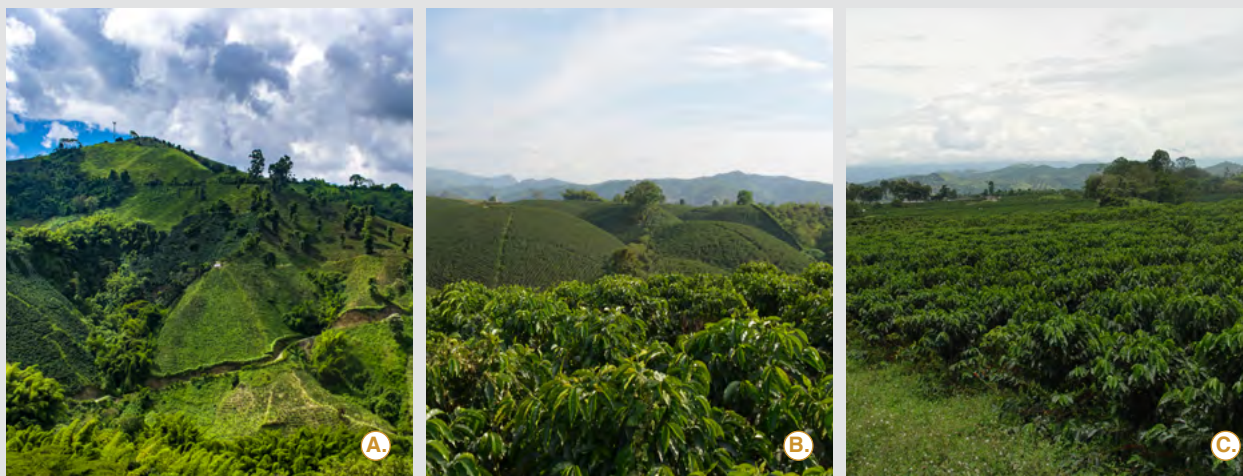


Figura 1. Muestras de la diversidad del relieve en la zona cafetera de Colombia. **A.** Relieve de montaña; **B.** Relieve de colina. **C.** Relieve de valle

La mayor parte de los materiales lavados del horizonte A se depositan en el **horizonte B** o subsuelo, al cual se le denomina horizonte de máxima acumulación o iluviación. La clase de materiales depositados en este horizonte le confiere características de color y apariencia distintivas en el perfil. Al conjunto de los horizontes A y B se le conoce como **solum**. Los cambios que tienen lugar con el transcurso del tiempo en los horizontes A y B contribuyen al desarrollo del suelo. Su composición difiere notablemente de aquella que dio origen al suelo.

Debajo del horizonte B se encuentra el **horizonte C**, que está constituido esencialmente de productos de descomposición de la roca o materiales transportados (ejemplo: cenizas volcánicas) sobre los que se formó el suelo. Este estrato es el menos afectado física, química y biológicamente.

Al conjunto de solum más el horizonte C se le conoce como **regolito**. La profundidad del perfil (desde la superficie del suelo hasta el material parental) determina el crecimiento de las plantas y, por consiguiente, la productividad de los cultivos. Por último,

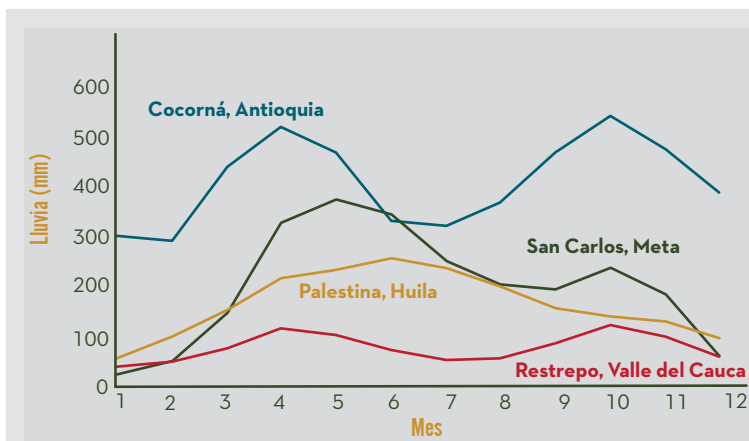


Figura 2. Cantidad y distribución de la lluvia en cuatro municipios de la zona cafetera de Colombia. Cantidad total lluvia por año: Cocorná 4.760 mm, San Carlos 2.685 mm, Palestina, 2.160 mm y Restrepo 1.090 mm. Información tomada de Agroclima. cenicafe.org (2020).

debajo del horizonte C yace la roca madre (R).

Algunas muestras de unidades de suelos representativos de la zona cafetera de Colombia se presentan en la Figura 4.

Constituyentes del suelo

El suelo se constituye mayoritariamente de aire, agua, minerales y materia orgánica. La proporción relativa de estos cuatro componentes determina sustancialmente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y, por lo tanto, su productividad. El conjunto de los anteriores componentes permite definir al suelo como un sistema integrado por tres fases: **líquida** (agua), **gaseosa** (aire) y **sólida** (minerales y materia orgánica), cuya proporción puede variar a través del tiempo, dependiendo del uso y las prácticas culturales.

Se considera que una condición óptima para el crecimiento de las plantas es aquella en la que el 45% del volumen del suelo está

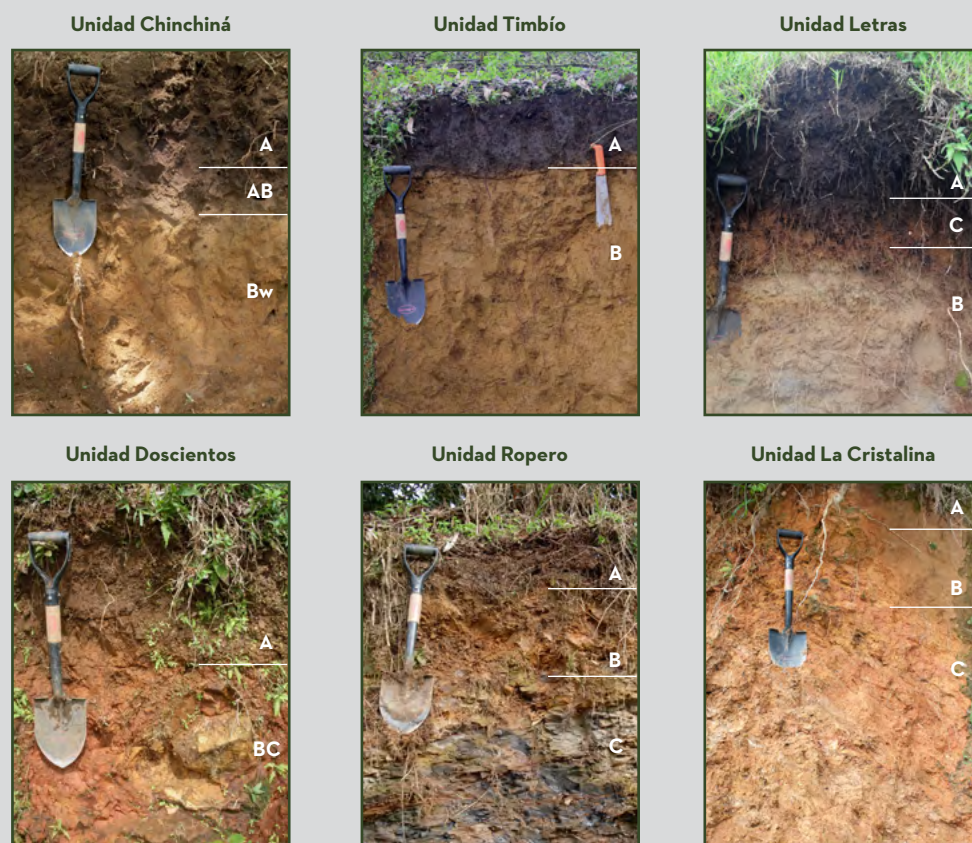


Figura 4.
Muestras de unidades cartográficas de suelos de la zona cafetera de Colombia. Suelos derivados de cenizas volcánicas: unidades Chinchiná, Timbío y Letras. Suelos originados a partir de roca ígnea: Doscientos, roca sedimentaria: Ropero y roca metamórfica: La Cristalina. Fotografías de Hernán González Osorio.

representado por los minerales, el 5% por la materia orgánica, 25% el aire y 25% el agua (Weil & Brady, 2017; Roy et al., 2006). La anterior distribución, expresada en masa, representa aproximadamente 80% de minerales, 2% de materia orgánica y 18% de agua.

En la mayoría de los casos, los suelos de la zona cafetera de Colombia distan de la anterior consideración, principalmente por los altos contenidos de la materia orgánica que los caracteriza y la diversidad de sus características físicas. Estos, por lo general, exhiben más volumen de poros para almacenar agua y menor volumen de sólidos (Tabla 3).

Minerales del suelo

La fracción mineral del suelo se compone de partículas de diferentes tamaños: rocas (diámetro mayor de 2 cm), gravas (diámetro entre 2 y 20 mm), arenas (diámetro entre 0,02 y 2 mm), limos (diámetro entre 0,002 y 0,02 mm) y arcillas (diámetro menor de 0,002 mm). Las rocas y las gravas se comportan como partículas independientes y, aunque su aporte de nutrientes es casi nulo, constituyen la reserva nutricional a largo plazo. En sitios donde son abundantes, su presencia puede ser negativa, pues reducen el **volumen efectivo** del suelo, lo cual afecta su potencial nutricional para las plantas. Para el análisis de la fertilidad del suelo se pasa la muestra

recolectada en el campo por un tamiz de 2 mm y se descartan estas partículas.

Las arenas y los limos se consideran minerales no alterados o **primarios**, pues conservan en buena medida la composición química y la estructura mineralógica del material que dio origen al suelo. Las arenas son básicamente fragmentos de cuarzo, feldespatos y micas provenientes de las rocas (Tabla 4); estas carecen de plasticidad y, debido a los grandes espacios entre sus partículas (macroporos), permiten el rápido paso del agua, razón por la cual, en los suelos donde predominan, el drenaje y la aireación son buenos. Las arenas presentan una fuente modesta de nutrientes y, por lo tanto, los suelos arenosos son poco fértiles. Los limos son partículas microscópicas de arenas; están constituidas básicamente por cuarzo y, en menor proporción, por feldespatos, micas y óxidos e hidróxidos de hierro. Debido a su adherencia a las arcillas, poseen plasticidad parcial, cohesión y propiedades adsorbentes, así como cierto grado de fertilidad.

Las arcillas son producto de la meteorización física, química y biológica de los minerales primarios y, en razón de ello, se conocen como minerales **secundarios**. Estos minerales, difieren sustancialmente de aquellos que los originaron, y pueden agruparse en tres grandes tipos: a) silicatos laminares, b) aluminosilicatos amorfos y c) óxidos de hierro y aluminio.

Tabla 3.

Composición volumétrica y contenido de materia orgánica de algunas unidades de suelo de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Cardona y Sadeghian (2005) y Salamanca y Sadeghian (2005).

Unidad cartográfica taxonómica	Clase	Volumen (%)			Peso de materia orgánica (%)
		Agua	Aire	Sólidos	
Chinchiná	Melanudands	51	18	31	10
Doscientos	Dystropept	44	19	38	7
Fondesa	Dystropept	43	14	43	6
Guadalupe	Dystropept	44	20	36	9
Montenegro	Fulvudands	40	24	36	6
San Simón	Europept	32	18	50	6
Suroeste	Dystropept	50	19	31	15
Timbío	Melanudands	47	27	26	22

Tabla 4.
Minerales primarios y secundarios comunes en los suelos. Tomado de Havlin et al. (2017).

Mineral		Clasificación	Fórmula química
Aumento de la intensidad de la meteorización ↓	Yeso	Primario	CaSO ₄ ·2H ₂ O
	Calcita	Primario	CaCO ₃
	Anfíboles	Primario	Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂
	Hornblenda	Primario	NaCa ₂ (Mg, Fe, Al) ₅ (SiAl) ₈ O ₂₂ (OH) ₂
	Olivino	Primario	(Mg, Fe) ₂ SiO ₄
	Mica (biotita)	Primario	K(Mg, Fe) ₃ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂
	Feldespato	Primario	(Ca, K, Na)Al ₂ Si ₂ O ₈
	Cuarzo	Primario	SiO ₂
	Mica (moscovita)	Primario	KAl(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂
	Clorita	Secundario	[Mg, Al(OH) ₆](Al, Mg) ₄ (Si, Al) ₈ O ₂₀ (OH) ₄
	Vermiculita	Secundario	(Al, Mg, Fe) ₄ (Si, Al) ₈ O ₂₀ (OH) ₄
	Esmeclita	Secundario	(Al, Fe, Mg) ₄ Si ₈ O ₂₀ (OH) ₂
	Caolinita	Secundario	Al ₄ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈
	Alófana, Imogolita	Secundario	Al ₂ O ₃ ·SiO ₂
	Gibbsite	Secundario	Al(OH) ₃
Hematita	Secundario	Fe ₂ O ₃	
Goetita	Secundario	FeOOH	

Nota: Los filosilicatos (minerales de arcilla en redes planas) se muestran en negrilla. Los minerales están listados de acuerdo al aumento de la intensidad de la meteorización, donde el yeso se presenta en suelos relativamente poco meteorizados y la gibbsite en suelos altamente meteorizados. Nótese cómo la proporción del contenido de cationes básicos (Ca, Mg, K, Na) disminuye a medida que la meteorización aumenta.

Solución del suelo

Las raíces de las plantas absorben los nutrientes que demandan para su crecimiento casi exclusivamente desde la solución del suelo, la cual comprende la fase líquida acuosa del suelo y sus solutos. Las principales formas de los elementos presentes en la solución del suelo son:

- Nitrógeno: NO_3^- (nitrato), NH_4^+ (amonio), NO_2^- (nitrito)
 - Fósforo: H_2PO_4^- (fosfato monovalente) y HPO_4^{2-} (fosfato divalente)
 - Potasio: K^+
 - Calcio: Ca^{2+}
 - Magnesio: Mg^{2+}
 - Azufre: SO_4^{2-} (sulfato)
- Hierro: Fe^{2+} (ferroso), Fe^{3+} (férrico)
 - Cloro: Cl^- (cloruro)
 - Manganeso: Mn^{2+}
 - Boro: H_2BO_3^- (borato), H_3BO_3 (ácido bórico)
 - Zinc: Zn^{2+}
 - Cobre: Cu^{2+}
 - Níquel: Ni^{2+}
 - Molibdeno: MoO_4^{2-} (molibdato)
 - Aluminio: Al^{3+}
 - Sodio: Na^+
 - Carbono: HCO_3^- (bicarbonato)

Esta solución se encuentra en los mesoporos (diámetro entre 10 y 100 micras) y está en equilibrio con la fase sólida del suelo. Puesto que los poros están interconectados, la solución contenida experimenta movimientos a cortas distancias. La concentración de los elementos allí presentes varía de manera importante en el espacio y el tiempo, según la fertilidad del suelo, las variaciones en la humedad y la temperatura, la actividad biológica y las labores culturales, entre otros aspectos. Los elementos presentes en la solución del suelo pueden hallarse como iones o formando compuestos; por ejemplo, es posible que el potasio esté libre, K^+ , o en asocio con aniones cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-) o fosfato (HPO_4^{2-} y $H_2PO_4^-$). Por lo general, las concentraciones de estos son relativamente bajas.

En la Tabla 5 se consigna, como una muestra, la riqueza de cationes y aniones en la solución del suelo de dos sistemas de producción de café en los departamentos de Caldas y Valle del Cauca. Se destacan mayores concentraciones de nitrógeno nítrico con respecto a la fracción amoniacal y la casi nula aparición de fosfato frente a los demás aniones. La alta presencia de cloruro, estaría eventualmente asociada a la aplicación de KCl; condición que puede favorecer la pérdida de cationes por lixiviación al formar **pares iónicos**.

Hincapié y Henao (2008) midieron la concentración iónica de nutrientes en un suelo de la unidad cartográfica Chinchiná (departamento de Caldas), en respuesta a la aplicación de potasio y nitrógeno.

Las concentraciones de K^+ y NO_3^- se incrementaron conforme a las dosis suministradas (Tabla 6). El ion HPO_4^{2-} se detectó solamente en algunas muestras, respuesta que se asoció con el alto poder de fijación por los complejos Al-humus y Fe-humus, propios de los Andisoles de la zona de estudio.

Materia orgánica

La fracción orgánica del suelo es uno de los componentes más importantes de los ecosistemas, pues a través de ella se sustenta la vida misma sobre el planeta. Debido a la complejidad que la caracteriza, por lo general, su definición tiende a ser insuficiente e imprecisa, sin embargo, en un sentido amplio, se acepta que comprende: i) la biomasa del suelo, es decir, los tejidos intactos de todos los organismos vivos, ii) los restos reconocibles de plantas, animales y microorganismos en diferentes estados de descomposición, iii) una mezcla de complejas sustancias orgánicas amorfas y coloidales, no identificadas como tejido, sintetizadas por los microorganismos (Weil & Brady, 2017).

Los términos **humus** y **materia orgánica del suelo** (MO) pueden emplearse como sinónimos, y comprenden el total de los compuestos orgánicos en el suelo, sin incluir a los tejidos vegetales y animales sin descomponer, sus productos de “descomposición parcial” y la biomasa del suelo (Stevenson, 1982). El humus, por lo tanto, incluye las sustancias húmicas más los productos de re-síntesis de microorganismos, los cuales son estables y forman parte del suelo (Sparks, 1995).

Tabla 5.
Concentración de cationes y aniones ($mg\ L^{-1}$) en la solución del suelo de cafetales al sol y bajo sombra de guamo. Datos de la Disciplina de Suelos, sin publicar.

Departamento	Sistema de producción	Cationes					Aniones			
		Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	HPO_4^{2-}	SO_4^{2-}
Caldas	Café al sol	0,18	0,10	0,29	0,20	0,36	0,47	0,56	0,03	0,05
	Café con sombra	0,09	0,08	0,13	0,23	0,77	0,20	0,95	0,00	0,08
Valle del Cauca	Café al sol	0,10	0,05	0,22	0,21	0,50	0,21	0,74	0,00	0,07
	Café con sombra	0,12	0,22	0,24	0,39	1,10	4,14	1,46	0,00	0,09



Tabla 6. Concentración de iones en la solución del suelo, en respuesta a la fertilización con nitrógeno y potasio. Tomado de Hincapié y Henao (2008).

Dosis (kg ha-año ⁻¹)		K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
N	K ₂ O	----- mmol _c L ⁻¹ -----							
0	0	0,039	0,360	0,233	0,075	0,028	0,077	0,388	0,140
0	150	0,116	0,088	0,047	0,037	0,009	0,055	0,084	0,125
0	300	0,419	0,098	0,038	0,067	0,005	0,198	0,008	0,286
150	0	0,041	0,124	0,066	0,049	0,017	0,079	0,224	0,102
150	150	0,157	0,234	0,136	0,076	0,065	0,107	0,340	0,145
150	300	0,211	0,096	0,055	0,047	0,016	0,076	0,157	0,190
300	0	0,043	0,190	0,203	0,050	0,027	0,029	0,371	0,108
300	150	0,186	0,359	0,194	0,066	0,017	0,082	0,680	0,091
300	300	0,277	0,177	0,123	0,050	0,031	0,136	0,338	0,132
Testigo absoluto		0,042	0,132	0,067	0,093	0,058	0,071	0,046	0,122

Todos los tratamientos, a excepción del Testigo absoluto, recibieron aportes de fósforo, calcio y magnesio, según los resultados del análisis de suelos.

Es común referirse a los materiales orgánicos empleados en la agricultura como **humus**, por ejemplo, humus de lombriz; afirmación que no es cierta, pues la formación del humus se da mediante procesos netamente pedogenéticos, es decir, que ocurren en el suelo e involucra los cinco factores de la formación del mismo (material parental, organismos, clima, relieve y tiempo). Al respecto, sería más preciso emplear términos como sustancias tipo humus (*like humus*), cuya composición se asemeja a las estructuras identificadas en las sustancias húmicas.

En la región cafetera de Colombia existe una gran diversidad de suelos, los cuales contrastan en sus contenidos de MO (Tabla 7). A nivel de lote también se presenta una alta variabilidad de este componente, como lo corroboran los estudios de Ochoa et al. (2003) y Patiño (2005) (Tabla 8). Los niveles de la MO pueden sufrir alteraciones con los sistemas de uso y el manejo. De acuerdo con los estudios adelantados por Cardona y Sadeghian (2005) y Salamanca y Sadeghian (2005), en los bosques y los guaduales, así como en los cafetales con sombrío de Guamo (*Inga* sp.), son mayores los aportes de residuos orgánicos, lo cual se traduce en incrementos de la MO en los primeros 10 cm de profundidad (Figura 5).

Propiedades físicas del suelo

Textura

Esta propiedad está relacionada exclusivamente con el tamaño de las partículas minerales menores de 2 mm de diámetro; consideración que excluye tanto a las rocas y gravas, como a la materia orgánica del suelo. Específicamente se refiere a la proporción relativa de las fracciones de arena (A), limo (L) y arcilla (Ar) del suelo (Figura 6). La importancia del estudio de la textura radica en el papel que esta juega en la cantidad de agua que puede almacenar un suelo, su movimiento a través del perfil y en la facilidad de abastecimiento de nutrientes y aire, factores importantes para el crecimiento de las plantas.

El Sistema Internacional establece que el diámetro de la fracción arcilla es menor de 0,002 mm (2 micras), la fracción limo entre 0,02 y 0,002 mm y la fracción arena entre 0,02 y 2 mm. De acuerdo con el Sistema Americano, USDA, las arenas tienen un diámetro entre 0,05 y 2,0 mm, los limos de 0,002 y 0,05 mm, y las arcillas menos de 0,002 mm.



Tabla 7.
 Contenido de materia orgánica (MO) en los primeros 20 cm de profundidad, en algunas unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia (Sadeghian, 2010c).

Unidad de suelo	Material parental	Clase taxonómica	Rango de MO (%)	Departamento	Municipio
Chinchiná	Ceniza volcánica	Melanudands	8,7-14,3	Caldas	Chinchiná
Chinchiná	Ceniza volcánica	Melanudands	16,2-24,8	Antioquia	Venecia
Doscientos	Basalto	Dystropept	6,4-9,9	Valle del Cauca	Jamundí
Guadalupe	Arenisca	Dystropept	7,7-16,4	Huila	Pitalito
Montenegro	Ceniza volcánica	Fulvudands	4,1-9,4	Quindío	Buenavista
San Simón	Granito biotítico	Europept	3,2-7,9	Tolima	Ibagué
Suroeste	Aglomerados	Dystropept	13,9-19,4	Antioquia	Fredonia
Timbío	Ceniza volcánica	Melanudands	16,1-25,9	Cauca	Tambo
Salgar	Pizarra	Dystropept	6,9-12,8	Antioquia	Fredonia
Piendamó	Ceniza volcánica	Melanudands	18,2-29,9	Cauca	Piendamó
Fresno	Ceniza volcánica	Fulvudands	12,2-14,5	Tolima	Fresno

Tabla 8.
 Valores mínimos, máximos, promedios y coeficientes de variación (C.V.) de la materia orgánica del suelo a nivel de lote cafetero.

Sitio	Municipio	Departamento	Área del lote (ha)	Contenido de materia orgánica (%)			C.V. (%)
				Mínimo	Máximo	Promedio	
E.E. Naranjal*	Chinchiná	Caldas	1,0	10,80	16,80	14,26	7,90
E.E. Paraguaicito*	Buenavista	Quindío	1,0	5,20	9,80	7,10	14,80
E.E. Maracay*	Quimbaya	Quindío	1,0	6,60	14,70	10,26	14,10
E.E. Catalina*	Pereira	Risaralda	1,0	5,60	14,00	10,22	11,10
Finca La Morada**	Sevilla	Valle del Cauca	2,8	3,00	11,90	5,84	25,10
Finca Las Delicias**	Trujillo	Valle del Cauca	2,7	7,20	17,60	12,57	20,82

E.E.: Estación Experimental de Cenicafé, * Ochoa et al. (2003), ** Patiño (2005).

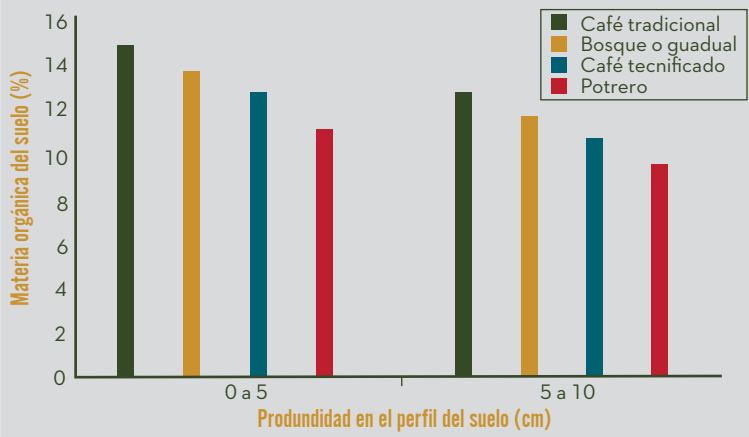


Figura 5.
 Contenido de MO en cuatro agroecosistemas de la zona cafetera de Colombia (promedio de ocho unidades cartográficas de suelos). Tomado de Salamanca y Sadeghian (2005).



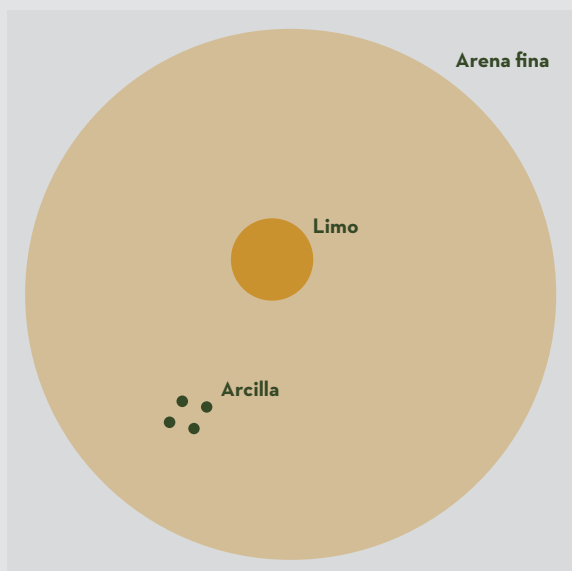


Figura 6. Tamaño relativo de arena fina, limo y arcilla. Tomado de SICCPHA (2004).

Con base en las proporciones relativas de estos componentes, los suelos se clasifican en las siguientes 12 clases texturales: arcillosa, arcillo arenosa, arcillo limosa, franco arcillosa, franco arcillo arenosa, franco arcillo limosa, franca, franco arenosa, arenosa, franco limosa, limosa y arenoso franca. Los límites de estas clases se acotan en el **triángulo textural** (Figura 7).

La descripción de las clases texturales revela los tipos de interacciones que pueden presentarse entre el suelo y las plantas. En los suelos minerales, la capacidad para retener los elementos nutritivos se relaciona estrechamente con la cantidad y el tipo de arcilla. El agua que puede almacenar el suelo depende, en buena medida, de la distribución de las partículas; al respecto, los suelos con texturas finas retienen más agua que los suelos con predominio de arenas. Frecuentemente, los suelos con alta representación de arcillas y limos muestran menor movimiento de agua y aire, y pueden ser más difíciles de trabajar. Desde el crecimiento de las plantas, los suelos con textura mediana como son los francos, franco arenosos y franco limosos, se acercan

a una condición ideal (SICCPHA, 2004). En la Tabla 9 se presenta la relación que tienen algunas propiedades físicas del suelo con el tamaño de las partículas minerales del suelo. En este punto cabe recordar que los fenómenos que ocurren en el suelo resultan de la interacción de las diferentes propiedades que este tiene y, en consecuencia, aspectos como la aireación, la retención de agua y el drenaje no solo dependen de la textura sino de otras características, por ejemplo, el contenido de MO y la estructura del suelo.

Los suelos de la zona cafetera de Colombia son disímiles en su textura (Tabla 10), por ejemplo, las unidades cartográficas Montenegro y San Simón se caracterizan por ser más arenosas, mientras que la unidad Doscientos es arcillosa. Adicionalmente, el sistema de uso y manejo puede modificar la textura en la superficie del terreno, como consecuencia de las pérdidas por erosión de las arenas finas, las cuales no forman agregados estables (Sadeghian et al., 2001). Se ha demostrado que la textura determina la densidad aparente del suelo en los sistemas productivos de café, la cual afecta a su vez la retención de humedad (Salamanca & Sadeghian, 2005).

Densidad real (Dr)

También conocida como **densidad de partículas**, está dada por la relación existente entre la masa de los sólidos del suelo y el volumen de los mismos, sin incluir el volumen de poros. Se calcula según la Ecuación <1>.

$$Dr \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{Ms}{Vp} \text{ <1>}$$

donde:

Dr = densidad real del suelo

Ms = masa del suelo seco

Vp = volumen de las partículas o de la materia sólida del suelo

La Dr de los suelos varía generalmente entre 2,60 y 2,75 g cm⁻³, siendo un valor representativo 2,65 g cm⁻³, por cuanto esta es la densidad aproximada de los minerales

más comunes del suelo como el cuarzo. Este valor puede variar de acuerdo con el tipo y cantidad del material mineral predominante y el contenido de materia orgánica del suelo. Los estudios desarrollados en la zona cafetera de Colombia sugieren densidades reales entre 2,0 y 2,65 g cm⁻³, según el tipo de suelo (Tabla 11). Generalmente los Andisoles ricos en materia orgánica, por ejemplo, la unidad Timbío en el departamento del Cauca, presentan valores más bajos de Dr.

Densidad aparente (Da)

Es llamada también densidad global o densidad de campo y se define como la masa del suelo seco (peso de la fase sólida) por unidad de volumen, incluyendo el espacio poroso. Se calcula de acuerdo con la Ecuación <2>.

$$Da \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{Ms}{Vs} \text{ <2>}$$

donde:

- Da = densidad aparente del suelo
- Ms = masa del suelo seco
- Vs = volumen del suelo, incluyendo los poros

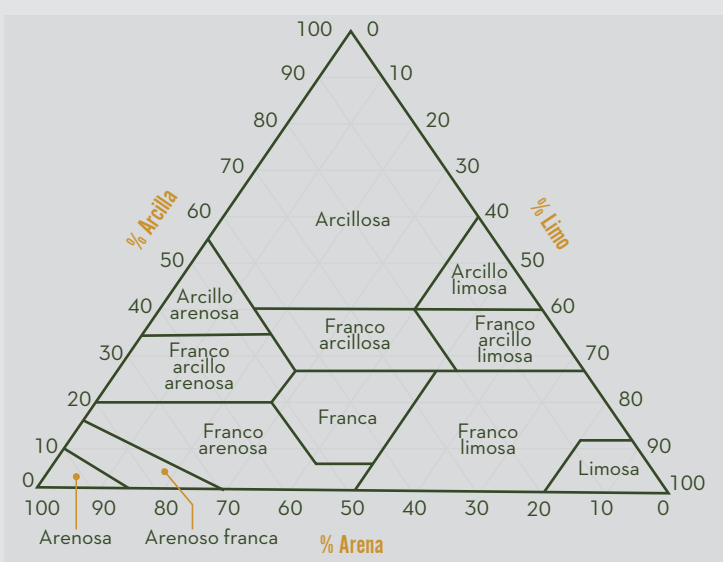


Figura 7. Clasificación textural del suelo con base en los porcentajes de arena, limo y arcilla. Adaptado de Weil & Brady (2017).

La Da es afectada por el material parental que origina el suelo, la estructura, la textura, y el contenido de la materia orgánica, así como por sus características de expansión y contracción, las cuales dependen del contenido de humedad. La Da afecta los espacios porosos, la retención de

Tabla 9. Propiedades físicas del suelo relacionadas con el tamaño de las partículas minerales del suelo. Adaptado de Roy et al. (2006).

Propiedad física	Impacto relativo de la fracción en la propiedad del suelo			
	Arena gruesa	Arena fina	Limo	Arcilla
Capacidad de retención de agua	Muy baja	Media	Alta	Muy alta
Capilaridad	Muy baja	Buena	Muy buena	Excelente
Tasa de movimiento de agua	Muy rápida (hacia abajo)	Rápida (hacia abajo y arriba)	Lenta (hacia abajo y arriba)	Muy lenta (hacia abajo y arriba)
Capacidad de absorción de gases, agua y nutrientes	Muy ligera	Ligera	Alta	Muy alta
Cohesión y plasticidad	Ninguna	Ligera	Alta	Muy alta
Temperatura relativa	Cálida	Ligeramente cálida	Fría	Muy fría
Aireación	Muy buena	Bastante buena	Pobre	Muy pobre



Tabla 10.

Texturas de algunas unidades de suelos representativas de la zona cafetera de Colombia.

Unidad cartográfica de suelo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clasificación textural
Chinchiná	50	33	16	Franca
Doscientos	16	22	62	Arcillosa
Fondesa	38	32	30	Franco arcillosa
Guadalupe	33	32	34	Franco arcillosa
Montenegro	60	21	18	Franco arenosa
San Simón	53	17	30	Franco arcilloso arenosa
Suroeste	42	26	32	Franco arcillosa
Timbío	48	29	23	Franca

humedad, la difusión de gases en el suelo, la permeabilidad, el grado de la penetración radical y el régimen térmico.

En suelos arenosos de la región cafetera de Colombia, donde la porosidad total es baja, la D_a alcanza valores de hasta $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, en suelos francos y arcillosos, valores cercanos a $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ y en suelos con muy altos contenidos de materia orgánica, por ejemplo, algunos Andisoles, menor de $0,6 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabla 11).

La D_a presenta variaciones en los primeros 40 cm de profundidad, donde crecen las raíces de las plantas (Figura 8). Esta puede verse afectada por el uso y el manejo; por ejemplo, en bosques y guaduales se presentan valores relativamente bajos, mientras que en los sistemas ganaderos ocurre lo contrario, por la compactación que generan los animales (Sadeghian et al., 2010; Salamanca & Sadeghian, 2005). Con respecto al café, el asocio con el guamo (*Inga* sp) contribuye a que la D_a sea menor con respecto al sistema sin sombrero, como consecuencia de los altos aportes de hojarasca (Cardona & Sadeghian, 2005).

En un estudio desarrollado por Salamanca y Sadeghian (2004) se demostró que en suelos arenosos y con alta D_a ($1,4 \text{ g cm}^{-3}$), como la unidad San Simón, la reducción de esta propiedad favorece un mayor crecimiento del café (Figura 9), respuesta que se relaciona con un menor impedimento para el crecimiento de raíces. En el caso de suelos con baja D_a ($0,7 \text{ g cm}^{-3}$), por ejemplo, la unidad Chinchiná,

la reducción o el aumento de la D_a afecta negativamente la biomasa de las plantas, bien sea por la compactación o el incremento excesivo de los macroporos.

Porosidad y distribución del tamaño de los poros

El espacio poroso de un suelo es la parte del mismo que en su estado natural está ocupado por aire y/o agua. Esta importante propiedad determina los espacios para la existencia de los seres vivos, incluyendo las raíces. El volumen total de los poros del suelo, expresado en porcentaje del volumen total, se calcula a partir de la densidad aparente y la densidad real (Ecuación <3>).

$$P (\%) = 100 - \frac{D_a}{D_r} \times 100 \text{ <3>}$$

donde:

P = porosidad del suelo

D_a = densidad aparente del suelo

D_r = densidad real del suelo

En el suelo existen poros con diferentes tamaños, los cuales determinan la aireación y la retención del agua. Estos pueden clasificarse en **macroporos**, **mesoporos** y **microporos**. Los microporos, con un diámetro menor de 20 micras, retienen el agua con mucha fuerza, evitando que sea fácilmente aprovechable por las raíces de las plantas. En este caso, las fuerzas de retención alcanzan

Tabla 11.

Valores de densidad real y densidad aparente en algunas unidades de suelos representativas de la zona cafetera de Colombia.

Unidad cartográfica de suelo	Densidad real	Densidad aparente
	----- (g cm ⁻³) -----	
Chinchiná	2,41	0,75
Doscientos	2,62	0,99
Fondesa	2,47	1,05
Guadalupe	2,42	0,88
Montenegro	2,50	0,89
San Simón	2,65	1,32
Suroeste	2,21	0,70
Timbio	2,08	0,55

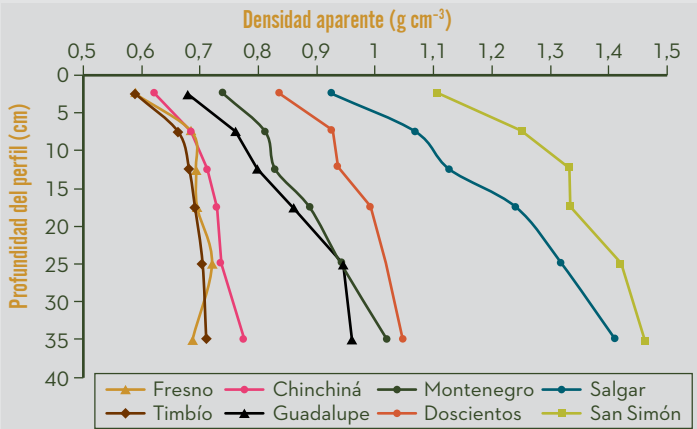


Figura 8. Variaciones de la densidad aparente a través del perfil, en ocho unidades de suelos representativas de la zona cafetera. Tomado de Salamanca y Sadeghian (2004).

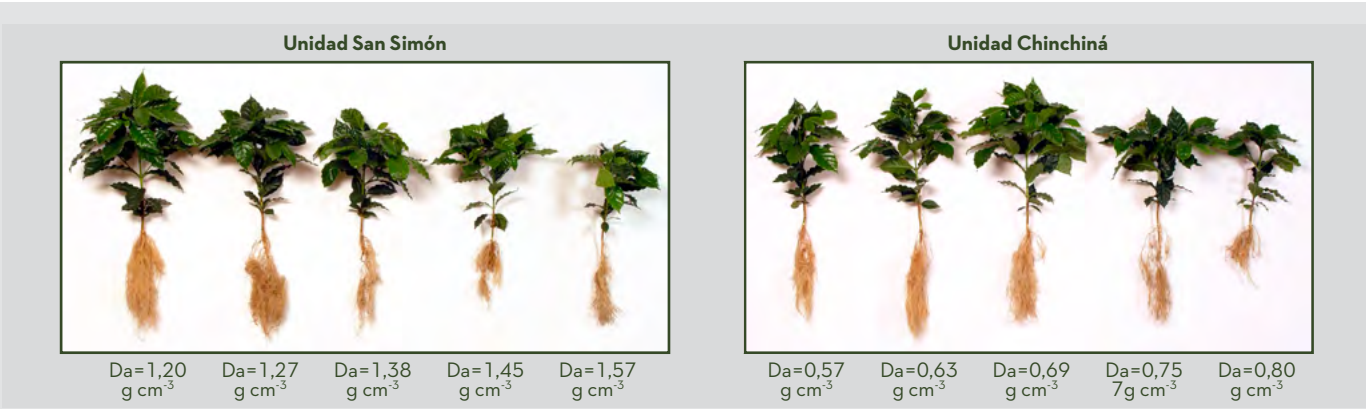


Figura 9. Crecimiento de café en respuesta a los cambios en la densidad aparente (Da) de dos unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia.



valores superiores a 1,5 MPa. Los mesoporos, cuyos diámetros varían entre 20 y 100 micras, retienen el agua con fuerzas desde 0,033 MPa hasta 1,5 Mpa, rango en el cual las plantas pueden disponer con facilidad del agua almacenada en ellos. Los macroporos, por su mayor tamaño (diámetro mayor de 100 micras), retienen poca humedad y permiten el drenaje libre y el movimiento del agua, así como el crecimiento de las raíces.

En suelos con texturas arenosas, la macroporosidad supera a la micro y mesoporosidad, favoreciendo la aireación del suelo; entretanto, su capacidad para retener agua es baja. Una condición contraria ocurre en suelos con texturas más finas. Otra propiedad que define la porosidad total y la distribución del tamaño de los poros es la materia orgánica del suelo. En algunos casos, los altos contenidos de MO favorecen la macroporosidad a través del mejoramiento de la estructura del suelo.

La mayoría de los suelos de la zona cafetera de Colombia presentan una elevada porosidad total (mayor de 60%); son algunas excepciones los suelos de la unidad San Simón y, parcialmente, Fondesa (Tabla 12). En cuanto a la distribución del tamaño de los poros, se presenta una alta diversidad; por ejemplo, las unidades Timbío y Montenegro exhiben una alta macroporosidad, en tanto que para Fondesa ocurre lo contrario.

Propiedades químicas del suelo

pH

El **potencial de hidrogeniones, pH**, se define como el logaritmo del inverso de la actividad del ion hidrógeno (H⁺) en una solución, como se expresa en la Ecuación <4>.

$$pH = \log_{10} \frac{1}{(H^+)} <4>$$

Cuando se refiere a la actividad H⁺, se está indicado que el hidrógeno está libre, es decir, que no se encuentra unido a otro(s) elemento(s) y, por lo tanto, tiene carga eléctrica y la capacidad de influenciar la acidez del suelo. El pH es la principal medida de la reacción de la solución del suelo (ácida o básica). Dependiendo de su magnitud se afectan todas las propiedades físicas, químicas y biológicas del medio edáfico; en razón de ello, puede afirmarse que controla la disponibilidad de los nutrientes para las plantas (Figura 10).

La escala del pH va de 0 a 14. Un valor de 7,0 indica condiciones de neutralidad (igual número de H⁺ y OH⁻ en la solución). Conforme se incrementa la actividad de H⁺, la solución del suelo se hace más ácida y el valor del pH

Tabla 12. Porosidad total y distribución del tamaño de los poros en algunas unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Cardona y Sadeghian (2005); Salamanca y Sadeghian (2005).

Unidad de suelo	Microporos	Mesoporos	Macroporos	Porosidad total
	----- (%) -----			
Chinchiná	31,63	19,21	18,05	68,90
Doscientos	38,08	5,52	18,82	62,42
Fondesa	26,56	16,35	14,38	57,29
Guadalupe	36,11	7,78	20,40	64,29
Montenegro	25,34	14,86	24,06	64,26
San Simón	19,82	12,35	18,00	50,16
Suroeste	33,08	16,59	19,00	68,66
Timbío	31,27	15,33	26,96	73,56



disminuye; en contraste, con el aumento de la concentración de iones OH^- en la solución, el suelo se hace más básico y el valor del pH se incrementa.

El pH de los suelos agrícolas varía entre 4,0 y 10,0. En la zona cafetera de Colombia y con pocas excepciones, los suelos de la mayoría de los departamentos tienden a presentar condiciones de acidez (Tabla 13), siendo el rango adecuado del pH para café entre 5,0 y 5,5. En trabajos recientes se ha caracterizado la fertilidad del suelo en diferentes escalas de detalle. Una muestra para el pH de los suelos de Huila se presenta en la Tabla 14, en la cual se agrupan los municipios en razón de la frecuencia de muestras de suelo con valores de pH menores de 5,0.

Materia orgánica

El humus, es decir, la materia orgánica estable, es la fracción químicamente más activa del suelo, la cual almacena varios elementos esenciales, mejora la estructura del suelo, contribuye a la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), regula el pH, propicia las relaciones adecuadas entre el aire y el agua en los suelos, y es un enorme depósito geoquímico de carbono (Bohn et al., 1993).

En la Figura 11 puede observarse el efecto de la materia orgánica (MO) en las siguientes propiedades físicas y químicas del suelo en la zona cafetera de Colombia: la densidad aparente, la densidad real, la resistencia la penetración, la porosidad total, la estabilidad de agregados, la CIC y la disponibilidad del nitrógeno nítrico.

Cerca del 58% de la MO está constituida por carbono, cantidad que puede representar variaciones entre 70 y 140 t ha⁻¹ en los primeros centímetros de profundidad del suelo, según el tipo de suelo (Tabla 15).

En los agroecosistemas cafeteros no siempre resulta sencillo incrementar los contenidos de MO; más bien las acciones deben orientarse a

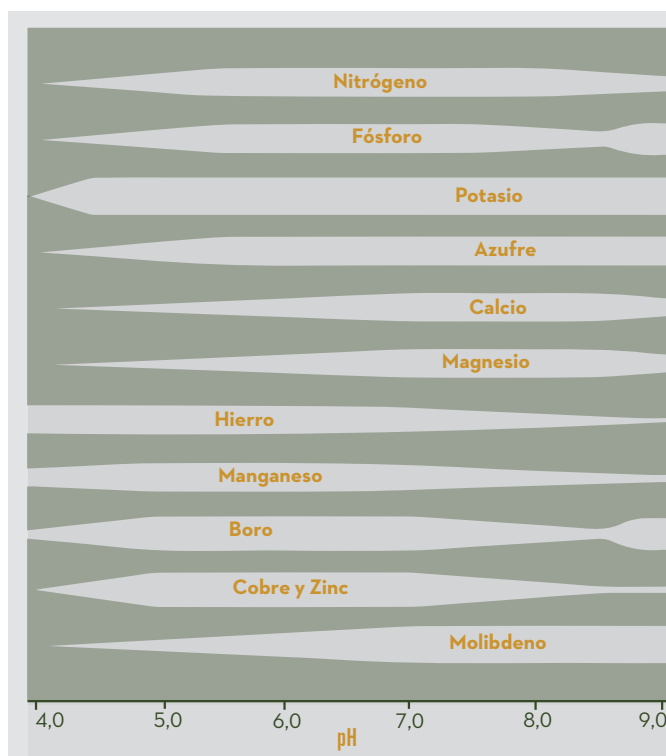


Figura 10.

Disponibilidad relativa de nutrientes en función del pH del suelo. Adaptado de Weil & Brady (2017).

la conservación del suelo mediante el control de la erosión. Algunas prácticas como el manejo integrado de arvenses y la adición de residuos orgánicos, por ejemplo, pulpa descompuesta, ramas de café después del zoqueo y hojarasca, contribuyen a incrementar la MO, y así reducir la compactación, mantener la humedad, mejorar la agregación, aumentar la porosidad del suelo y a favorecer el desarrollo de las raíces del cultivo (Salamanca & Sadeghian, 2005).

El método de laboratorio comúnmente empleado para valorar la MO es el de Walkley-Black, el cual, mediante una combustión húmeda, determina el contenido total del carbono orgánico de una muestra recolectada en el campo, que ha pasado por un tamiz de 2 mm. Para expresar el resultado obtenido en el laboratorio en términos del porcentaje de la MO, este valor se multiplica por 1,724,

Tabla 13.

Distribución porcentual para rangos del pH en muestras analizadas en algunos departamentos de Colombia.

Departamento	pH ≤ 4,5	4,5 < pH ≤ 5,0	5,0 < pH ≤ 5,5	5,5 < pH ≤ 6,0	6,0 < pH
Antioquia	42	36	15	5	2
Boyacá	47	32	11	4	6
Caldas	10	36	38	14	2
Caquetá	70	23	6	0	0
Casanare	83	14	2	2	0
Cauca	10	40	36	11	3
Cesar	29	29	24	13	5
Chocó	17	55	23	5	0
Cundinamarca	43	31	16	6	5
Huila	23	33	27	14	4
La Guajira	11	16	34	24	14
Magdalena	16	44	32	8	1
Meta	85	12	1	0	2
Nariño	14	29	33	18	6
Norte de Santander	45	27	16	8	5
Putumayo	41	56	4	0	0
Quindío	16	39	35	8	1
Risaralda	7	32	46	13	1
Santander	57	26	9	5	4
Tolima	18	32	34	13	3
Valle del Cauca	4	19	41	28	7

Tabla 14.

Frecuencia de muestras de suelo del departamento del Huila, con valores de pH menores de 5,0. Tomado de Sadeghian et al. (2019).

Frecuencia	Municipio
Muy alta (80%-100%)	Acevedo, Paicol y Palestina
Alta (60%-80%)	Agrado, Aipe, Colombia, Garzón, Nátaga, Oporapa, Pital, Pitalito, Suaza y Timaná
Media (40%-60%)	Baraya, Gigante, Guadalupe, La Argentina, Neiva, Palermo, Rivera y Tesalia
Baja (20%-40%)	Algeciras, Altamira, Campoalegre, Elías, Hobo, Íquira, Isnos, La Plata, Saladoblanco, San Agustín, Santa María, Tarqui, Tello y Teruel

presumiendo que el 58% de la MO corresponde al carbono (C).

La MO es la principal fuente de nitrógeno (N) para las plantas y los microorganismos. Para la zona cafetera de Colombia se han desarrollado varios modelos matemáticos, con el fin de estimar el contenido total de N en función de la MO del suelo (Carrillo & Chaves, 1994; Sadeghian, 2003). Estas expresiones,

en su mayoría de tipo cuadrático, sugieren un incremento de este elemento hasta niveles cercanos a 30%–35% de MO, valor después del cual ocurre un descenso de N, como consecuencia de la reducción de la actividad microbiana. Con respecto a lo anterior, el modelo más divulgado se obtuvo al analizar 1.174 parejas de datos con valores de N mayores de 0,05% y MO mayores de 2,0% (Figura 12).

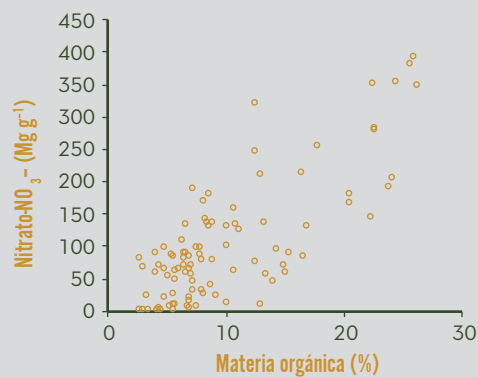
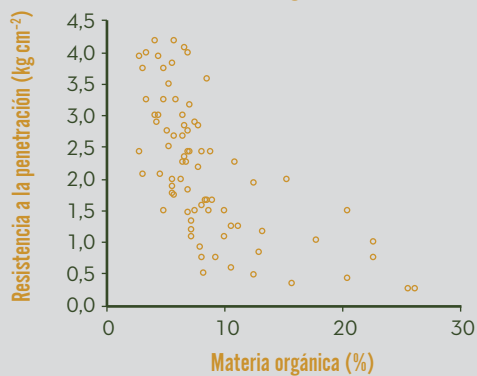
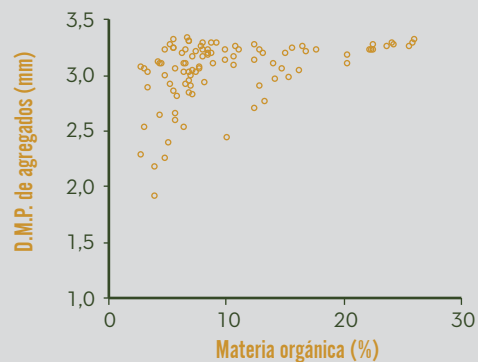
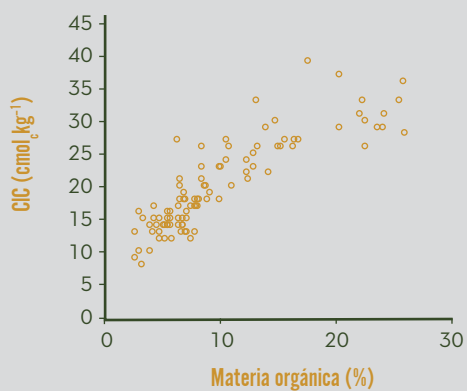
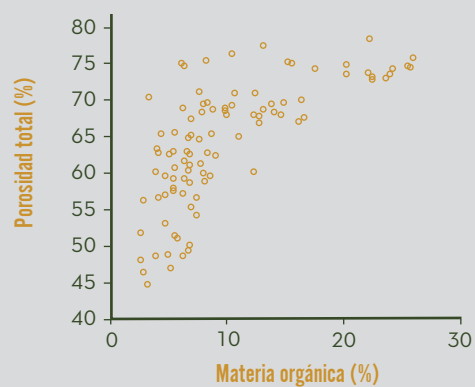
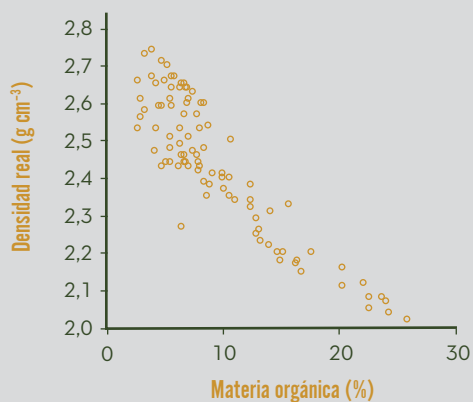
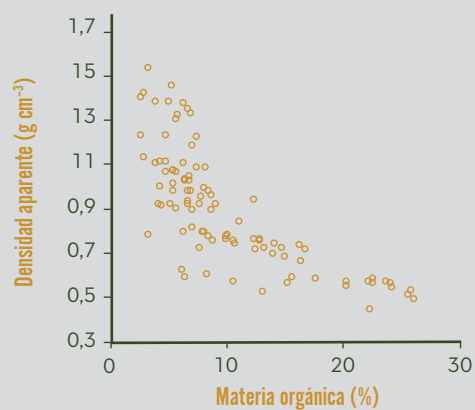


Figura 11.

Relación entre la materia orgánica del suelo y algunas propiedades físicas y químicas del suelo. D.M.P.: Diámetro Medio Ponderado. Tomado de Sadeghian (2010c).

Tabla 15.

Contenido del carbono orgánico, estimado para los primeros 20 cm de profundidad de algunas unidades cartográficas de suelos de la zona cafetera de Colombia.

Unidad cartográfica de suelo	Clase taxonómica	Departamento	Contenido de CO (t ha ⁻¹)
Chinchiná	Melanudands	Caldas	96
Chinchiná	Melanudands	Antioquia	144
Timbío	Melanudands	Cauca	135
Piendamó	Fulvudands	Cauca	139
Montenegro	Fulvudands	Quindío	70
Doscientos	Dystropept	Valle del Cauca	77
Fondesa	Dystropept	Valle del Cauca	73
Guadalupe	Dystropept	Huila	96
San Simón	Europept	Tolima	93
Suroeste	Dystropept	Antioquia	121

Datos obtenidos a partir del carbono orgánico y la densidad aparente, correspondientes a valores promedio de muestras dentro de una misma unidad de suelo.

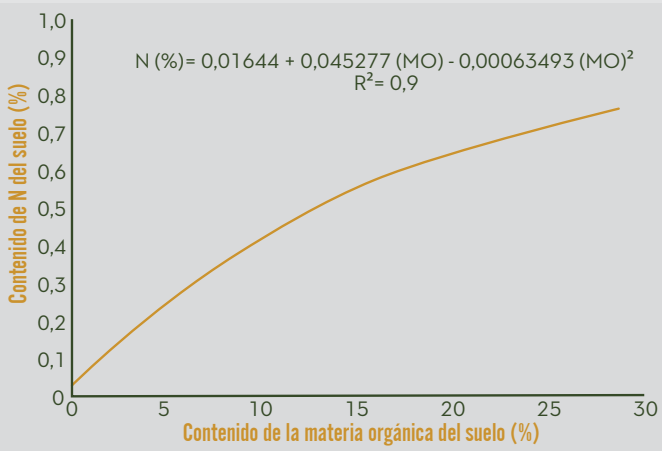


Figura 12. Contenido de nitrógeno total (N) en función de la materia orgánica, en suelos de la zona cafetera de Colombia. Tomado de Carrillo y Chaves (1994).

Los contenidos de MO, al igual que las demás propiedades del suelo, varían en el espacio, connotación que incluye tanto en el área como la profundidad. Una muestra de los cambios en el perfil se presenta en la Figura 13, para ocho unidades de suelos de la zona cafetera (Salamanca & Sadeghian, 2005).

A través del proceso de la mineralización, proceso biológico de la descomposición

de la MO y la subsiguiente formación de productos inorgánicos, la MO llega a aportar considerables cantidades de nutrientes a las plantas, principalmente N. La tasa de mineralización y la cantidad aportada de N pueden variar según el sitio, de acuerdo a los contenidos de la MO y las condiciones del clima (lluvia y temperatura), como se muestra en la Tabla 16 para dos Estaciones Experimentales de Cenicafé.

Intercambio catiónico

Las partículas coloidales del suelo, principalmente las arcillas finas y la materia orgánica humificada, se caracterizan por poseer cargas eléctricas, tanto positivas como negativas. La predominancia de una u otra clase de cargas depende de la acidez del suelo; en este sentido, con el aumento del pH se incrementa la proporción de cargas negativas y con la disminución del pH se elevan las positivas. Para la nutrición vegetal, tienen mayor relevancia las cargas negativas, pues ayudan a retener iones cargados positivamente (cationes), tanto aquellos de naturaleza básica (calcio-Ca²⁺, magnesio-Mg²⁺, potasio-K⁺ y sodio-Na⁺), como ácida (aluminio-Al³⁺ e hidrógeno-H⁺). Los cationes **adsorbidos** a las cargas negativas del suelo por fuerzas

electroestáticas tienden a desorberse en presencia de agua e intercambiarse con otros de la solución del suelo, fenómeno que se denomina **intercambio catiónico** (Bohn et al., 1993; Essington, 2015; Havlin et al., 2017). Este proceso se caracteriza por ser reversible, estequiométrico y rápido (Bohn et al., 1993).

En la Figura 14 se ilustra el intercambio catiónico que puede presentarse en el suelo al adicionar una solución de cloruro de potasio (KCl). En esta reacción y otras similares, se establece un equilibrio entre los cationes adsorbidos en la fase sólida y los cationes en la solución (Raij, 2011).

El intercambio catiónico constituye una de las propiedades más importantes de la fertilidad del suelo y su productividad potencial, pues a través de éste se regula la retención y la liberación de nutrientes en forma disponible para las plantas (CPHA, 2004). Suelos con mayores cargas negativas poseen una **Capacidad de Intercambio Catiónico** (CIC) más alta, capacidad que constituye la “despensa” del suelo. Una CIC alta ayuda a retener y conservar por más tiempo una mayor cantidad de nutrientes, principalmente Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} y NH_4^{+} , evitando que se pierdan con facilidad por lixiviación.

En el ámbito general, existe una relación directa entre la valencia del ion y la fuerza

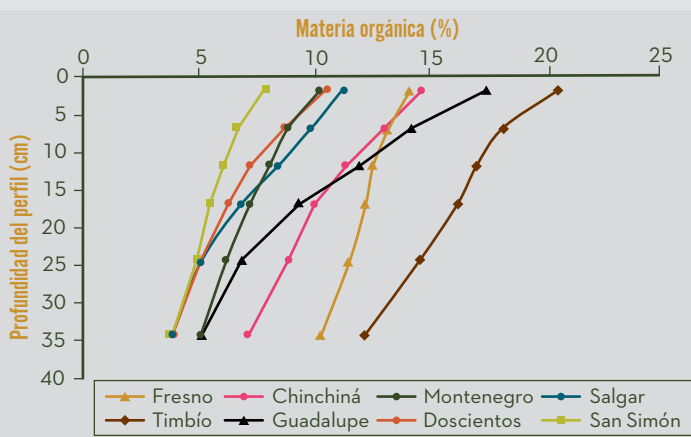


Figura 13. Variaciones de los contenidos de la materia orgánica con la profundidad, en ocho unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Tomado de Salamanca y Sadeghian (2005).

con que es retenido por los sitios de intercambio; en consecuencia, los cationes trivalentes se adsorben más firmemente que los bivalentes, y estos a su vez son retenidos con más fuerza que los monovalentes. Adicionalmente, entre los cationes de igual carga, aquel con menor radio de hidratación o potencial iónico presenta una adsorción más firme (Bohn et al., 1993; Sparks, 1995). La facilidad con la que puede reemplazarse un ion por otro se conoce como **serie liotrópica**; un ejemplo de ello es:

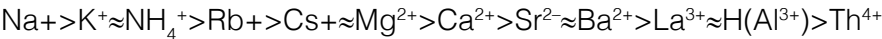


Tabla 16. Valores promedio y coeficientes de variación (C.V.) de la tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo y la cantidad de nitrógeno aportado, en dos Estaciones Experimentales de Cenicafé durante dos periodos. Cenicafé (2007).

Estación Experimental	Variable	----- 0 a 30 días -----		----- 0 a 60 días -----	
		Promedio	C.V. (%)	Promedio	C.V. (%)
Naranjal	Tasa de mineralización (kg ha-d ⁻¹)	0,37	32,7	0,47	52,7
	N mineralizado (kg ha ⁻¹)	11,22	32,7	28,37	52,7
Paraguaicito	Tasa de mineralización (kg ha-d ⁻¹)	0,26	42,9	0,70	40,4
	N mineralizado (kg ha ⁻¹)	7,74	42,9	41,74	40,4



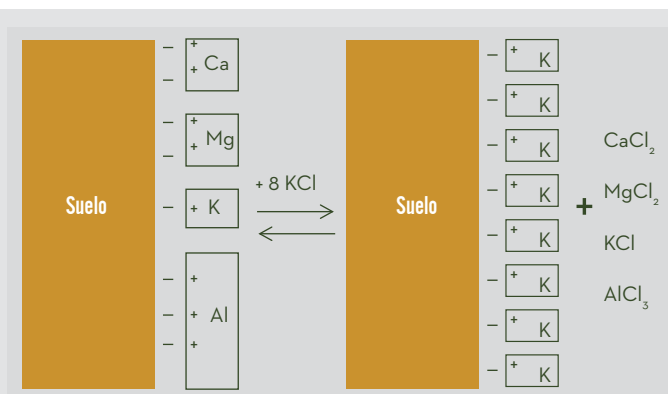


Figura 14.
Representación de intercambio catiónico con cloruro de potasio.

El anterior fenómeno es la razón por la cual el aluminio trivalente permanece en la fase intercambiable cuando el suelo es sometido a la acción de la lluvia, perdiéndose más fácilmente por lavado elementos con menor valencia, en especial los monovalentes como el potasio.

Por su origen, las cargas del suelo pueden ser **permanentes** o **variables**. Las cargas permanentes resultan de la **sustitución isomórfica** de los cationes en la red cristalina, durante el proceso de meteorización de los minerales primarios y la formación de los secundarios. Las cargas variables dependen de la acidez; en este sentido, las cargas negativas del suelo se elevan al incrementarse el pH.

Una aplicación práctica, derivada del conocimiento de las cargas variables, tiene que ver con el aumento de la CIC mediante la corrección de la acidez del suelo. El encalado, además de reducir el Al^{3+} en la fase intercambiable y aumentar los contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} , incrementa la CIC, permitiendo una mayor retención de otros cationes como K^+ y NH_4^+ (Figura 15). Al respecto, es de utilidad saber que la mayoría de los suelos de la zona cafetera de Colombia se caracterizan por presentar carga variable o dependiente del pH.

La valoración de la CIC en el laboratorio se hace mediante el empleo de acetato de amonio a $\text{pH}=7,0$, extractante que genera la máxima cantidad de cargas posibles en el suelo. El

valor obtenido analíticamente se conoce como **CIC potencial** a $\text{pH } 7,0$.

Es posible obtener una estimación de la CIC a través del contenido de la MO. La siguiente expresión, reportada por Sadeghian y Zapata (2012) para suelos de la zona cafetera, sugiere que, por cada 1% de MO, la CIC se incrementa en 1,25 unidades; además del aporte de la fracción mineral (aproximadamente $10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, según la textura y el tipo de arcilla, Ecuación <5>):

$$\text{CIC} (\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}) = 10,26 + 1,25 \times \text{MO} (\%) \quad <5>$$

Generalmente, en los suelos ácidos la CIC “real” del suelo, es decir, aquella que presenta el suelo al momento de analizar la muestra correspondiente en el laboratorio, es menor que la CIC potencial, valorada analíticamente; efecto que se debe al uso de acetato de amonio neutro ($\text{pH}=7,0$). Por esta razón, y con el propósito de tener una idea más cercana a la CIC real, se estima la capacidad de intercambio catiónico que posee el suelo al momento de realizar el análisis, mediante la suma de los cationes intercambiables, predominantemente Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Al^{3+} . Este parámetro se conoce como la **Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE)**, obtenida al pH del suelo en el momento de la toma de la muestra. Habitualmente, se excluye al sodio (Na^+) para el cálculo de la CICE, debido a su baja concentración en los suelos de la zona cafetera (el cual toma importancia cuando el pH es mayor de 9,0).

En la Tabla 17 se presenta información acerca de la CIC, la CICE, el pH y los cationes intercambiables, correspondiente a muestras tomadas en algunas unidades de suelos representativas de la zona cafetera de Colombia. Estos resultados revelan una correlación alta y positiva entre la CIC potencial y el contenido de la MO del suelo; sin embargo, no se evidencia relación entre CICE y la MO o entre CICE y CIC. Los niveles de Al^{3+} se reducen con el aumento del pH y los contenidos de las bases intercambiables, en especial Ca^{2+} y Mg^{2+} , tienden a incrementarse con la CICE. Una muestra para Mg^{2+} se presenta en la Figura 16.

Clasificación de suelo

La clasificación de los suelos, al igual que cualquier sistema de agrupación por similitud, permite, entre otros aspectos, organizar la información, predecir el comportamiento de los objetos, identificar su mejor uso y estimar su productividad. A través de la taxonomía, y teniendo en cuenta el origen y los factores de formación, pueden organizarse los suelos en un sistema jerárquico. En Colombia se adoptó el sistema de clasificación propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (*United States Department of Agriculture* [USDA]).

Actualmente existen en el país aproximadamente siete millones de hectáreas con potencial para cultivar café. El 60,2% de esta área se ha clasificado como Inceptisol, 17,4% Andisol, 10,4% Entisol, 7,9% Molisol, 1,3% Alfisol y 0,9% Vertisol. En la Tabla 18 se consigna la representación porcentual de los órdenes de suelos por departamento (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [FNC] y Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2017).

Descripción de los órdenes de suelos más comunes en la zona cafetera de Colombia

- ♦ **Alfisoles.** Suelos minerales, con bajos contenidos de materia orgánica y ricos en bases intercambiables. Los factores de formación más influyentes en estos son clima/vegetación en regiones subhúmedas. Presentan un horizonte B enriquecido en arcillas, provenientes del horizonte A. Su perfil puede contener la secuencia de horizontes A/B/C o A/E/B/C en un estado más evolucionado. Su nomenclatura termina en ALF.
- ♦ **Andisoles.** Suelos formados a partir de cenizas volcánicas, de color muy oscuro, con alta fijación de fosfatos, baja densidad aparente, alta porosidad y generalmente

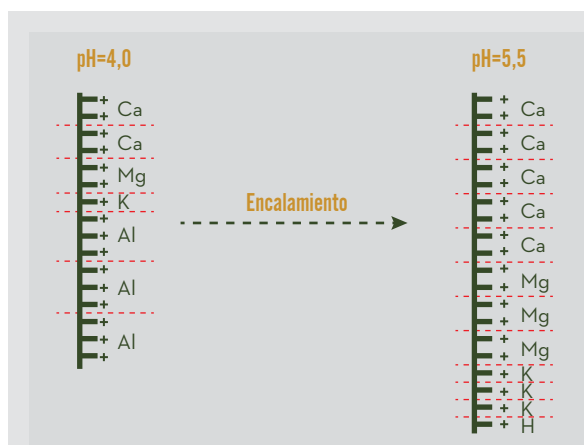


Figura 15.

Efecto del encalamiento con dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) en la acidez del suelo (pH y aluminio intercambiable) y los contenidos de las bases intercambiables. Tomado de Sadeghian et al. (2015).

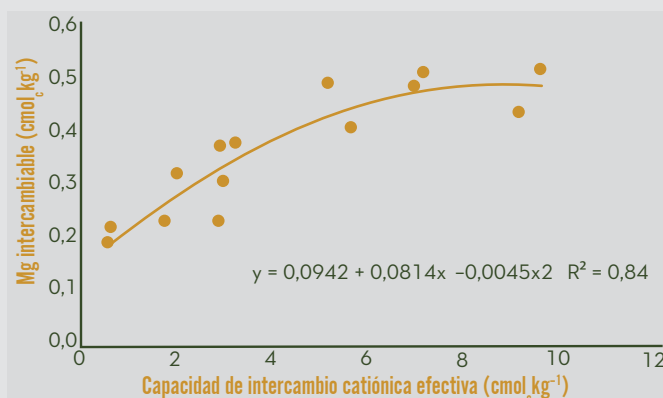


Figura 16.

Magnesio intercambiable en función de la CICE. Tomado de Sadeghian et al. (2015).

ácidos. La secuencia típica de este orden es A/C o A/B/C. Su nomenclatura termina en AND.

- ♦ **Entisoles.** Suelos muy jóvenes, con poca evolución y bajos contenidos de materia orgánica. Generalmente presentan organización solo en la parte superior del suelo, donde hay más materia orgánica y la actividad biológica. Normalmente

Tabla 17.
Propiedades químicas de algunas unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia, relacionadas con la capacidad de intercambio catiónico. Tomado de Sadeghian y Zapata (2012).

Unidad de suelo- Procedencia	Taxonomía	pH	MO	Ca	Mg	K	Na	Al	CICE	CIC
			(%)	(cmol _c kg ⁻¹)						
Líbano	Melanudands	5,1	17,9	2,0	0,59	0,20	0,03	1,2	4,02	32
Chinchiná-Pereira	Melanudands	5,0	11,4	1,9	0,41	0,26	0,03	1,2	3,80	28
Chinchiná-Chinchiná	Fulvudands	4,8	12,6	0,6	0,25	0,15	0,09	1,6	2,69	25
Chinchiná-Venecia	Melanudands	4,7	17,6	0,5	0,21	0,18	0,01	2,8	3,70	40
Timbío	Melanudands	5,5	22,8	6,4	2,17	0,64	0,08	0,5	9,79	36
Fresno	Fulvudands	5,5	18,4	0,6	0,14	0,13	0,05	0,7	1,62	30
Quindío	Hapludands	5,3	6,0	2,3	0,38	0,23	0,02	0,8	3,73	17
San Simón	Dystrudepts	5,4	4,5	3,9	1,39	0,19	0,09	0,2	5,77	12
Paujil	Dystrudepts	5,4	8,3	5,3	0,93	0,92	0,03	0,4	7,58	19
Doscientos-Jamundí	Dystrudepts	4,9	13,8	0,2	0,16	0,10	0,01	1,2	1,67	26
Doscientos-Sevilla	Eutrodepts	4,6	4,3	2,4	1,62	0,47	0,10	2,8	7,39	21
Suroeste	Dystrudepts	4,4	10,2	0,7	0,24	0,61	0,01	7,8	9,36	30
Salgar	Dystrudepts	4,7	13,3	2,9	0,67	0,62	0,02	2,0	6,21	22
Guadalupe	Dystrudepts	4,7	4,5	0,8	0,24	0,38	0,01	1,5	2,93	11

Tabla 18.
Representación porcentual de los órdenes de suelos en zona cafetera de Colombia por departamento (FNC & IGAC, 2017).

Departamento	Orden del suelo					
	Alfisol	Andisol	Entisol	Inceptisol	Molisol	Vertisol
Antioquia		19,1	4,5	73,7	0,8	
Bolívar			4,7	95,3		
Boyacá	0,4	2,9	3,8	76,6	5,6	10,7
Caldas	0,0	35,9	22,6	5,1	35,4	
Caquetá			1,3	98,7		
Casanare			9,5	71,9		8,5
Cauca	0,9	43,3	4,5	42,1	8,7	
Cesar		3,0	27,9	66,0	3,0	
Chocó		58,1		41,9		
Cundinamarca	0,1	7,8	14,3	76,7	0,5	
Huila	4,7	14,1	4,3	56,7	16,7	
La Guajira	1,3		24,0	58,8	16,0	
Magdalena		1,5	33,1	59,5	5,8	
Meta			34,2	50,6		
Nariño	3,1	30,0	7,9	22,9	35,9	
Norte de Santander		6,8	11,7	76,6	2,5	
Putumayo		1,1	23,1	75,8		
Quindío	4,0	66,6	1,4	14,3	13,6	
Risaralda	0,8	33,5	0,4	47,0	18,3	
Santander	2,3	14,6	15,8	49,7	12,7	3,9
Tolima	0,2	16,0	16,0	66,2	0,9	0,2
Valle del Cauca	5,0	20,1	4,7	51,4	11,6	0,7

presentan un perfil A/C. Su nomenclatura termina en ENT.

- ♦ **Inceptisoles.** Suelos de evolución incipiente, desarrollados con materiales parentales transportados y pobres en materia orgánica. En el perfil pueden incluir una secuencia A/C en regiones de fuerte pendiente o A/B/C en regiones geográficas de menor inclinación. Su nomenclatura termina en EPT.
- ♦ **Molisoles.** Suelos muy oscuros con buenas propiedades físicas y químicas en el horizonte. Presentan generalmente un perfil genéticamente bien evolucionado A/E/B/C. Su nomenclatura termina en OLL.
- ♦ **Vertisoles.** Suelos de arcillas expansivas de color oscuro. La contracción durante las épocas secas genera grietas en la superficie de los suelos, con limitaciones físicas para la actividad agrícola. Su nomenclatura termina en ERT.

Fertilidad del suelo

Dada la naturaleza compleja del suelo, definir su fertilidad no resulta fácil. Una definición general es aquella que la relaciona con la capacidad que tiene el medio edáfico para suplir los elementos esenciales que demandan las plantas para su metabolismo. Según este concepto, un suelo fértil posee una reserva adecuada y balanceada de nutrientes,

suficientemente disponible para soportar los requerimientos de las especies vegetales (Foth & Ellis, 1997).

Malavolta (2006) define la fertilidad del suelo en función de su capacidad global para garantizar el crecimiento y la producción de los cultivos, mediante el suministro de agua y nutrientes; en esta vía, están involucradas muchas de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Tabla 19). Otros autores, en cambio, sostienen que no debe expresarse la fertilidad en términos de productividad (producción por unidad de área); razón por la cual, la relacionan básicamente con la capacidad química del suelo para “proporcionar” elementos esenciales a las plantas (Días & Álvarez, 1996). Según este enfoque, un suelo puede ser fértil mas no productivo, pero un suelo productivo será fértil; además, un suelo fértil puede llegar a perder su fertilidad por un manejo inadecuado (Lopes & Guilherme, 2007).

La fertilidad del suelo puede clasificarse en tres categorías: **natural, potencial y actual**. La fertilidad natural hace referencia a las condiciones propias de los suelos que no han sido intervenidos por la acción del hombre, y en los cuales existe un equilibrio entre el suelo y la vegetación que soporta. Su connotación tiene alta importancia dentro de los estudios de la clasificación de suelos en los que se presentan las características taxonómicas de los diferentes órdenes y unidades de suelos. En el caso de la fertilidad potencial, se presenta algún elemento o característica

Tabla 19.
Propiedades del suelo relacionadas con su fertilidad. Tomado de Malavolta (2006).

Propiedad física	Propiedad química	Propiedad biológica
Textura Profundidad efectiva Densidad aparente e infiltración Capacidad para retener agua Característica del agua retenida Contenido del agua Temperatura Topografía	Contenido total de C y N pH Conductividad eléctrica Contenidos de macro y micronutrientes Contenido de elementos tóxicos Relaciones entre elementos	Biomasa microbiana Potencial de mineralización de N y S Respiración del suelo Relación C de biomasa/C orgánico total Relación respiración/biomasa Flora y fauna



que impide al suelo exhibir su capacidad de proporcionar nutrientes a las plantas, de tal suerte que hasta no aliviar estas condiciones limitantes estará truncada la capacidad potencial del suelo, aun cuando esta sea alta. Un ejemplo común de lo anterior en la zona cafetera del país es la acidez del suelo, cuyos limitantes para la nutrición vegetal, altos niveles de aluminio y baja disponibilidad de calcio, magnesio y fósforo, pueden corregirse con la aplicación de enmiendas y fósforo. La fertilidad actual está relacionada con suelos cultivados o que han sufrido intervención antrópica por el uso de abonos, enmiendas y la realización de otras prácticas de manejo. Esta se evalúa mediante el análisis químico y físico de rutina en el laboratorio (Álvarez, 1994).

En las Tablas 20 y 21 se presenta la clasificación de las unidades cartográficas de suelos de la zona cafetera de Colombia según la fertilidad natural y potencial, respectivamente. Con el fin de caracterizar la fertilidad de los suelos cultivados en café, Sadeghian y Duque (2017) emplearon 255.000 registros históricos de 20 departamentos (Tabla 22). Los resultados obtenidos permitieron identificar puntos de atención en las diferentes regiones y proponer formulaciones de fertilizantes.

Disponibilidad de nutrientes

Las raíces de las plantas absorben los nutrientes desde la solución del suelo, la cual consiste en una fase líquida acuosa y sus solutos. Los nutrientes presentes allí en su mayoría son iones hidratados y, en menor cantidad, moléculas inorgánicas y compuestos quelatados. Los solutos provienen principalmente de reacciones de intercambio y desorción entre las fases sólida y acuosa, disolución o meteorización química de minerales y mineralización de la materia orgánica. Por lo anterior, los nutrientes disponibles son, esencialmente, los iones en la solución más los iones de la fase sólida que están en rápido equilibrio con los iones en solución (Foth & Ellis, 1997).

En el glosario de *Soil Science Society of America* (2008) se define a los “*nutrientes disponibles*” como “*la cantidad de nutrientes en formas químicas accesibles para las raíces de las plantas o compuestos susceptibles a convertirse a formas tales durante la temporada de crecimiento*”.

De acuerdo con Raij (2011), los nutrientes que se encuentran en el suelo como cationes intercambiables, tales como Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} , presentan equilibrio entre los

Tabla 20.
Clasificación de las unidades cartográficas de suelos de la zona cafetera según la fertilidad natural. Tomado de Gómez et al. (1991).

Fertilidad natural	Unidades cartográficas de suelos
Baja	Cajibío, Cartagenita, Chanchón, Chinchiná, Cínera, Doña Juana, El Peñol, El Rosario, Fondesa, Fresno, La Laguna, La Laja, La Victoria, Libano, Mendarco, Paujil, Piendamó, Pubenza, San Agustín, Sandoná, Santa Cruz, Sargento, Socorro, Sucre, Tambo, Timbío, Villapaz y Villeta.
Baja a media	Cincho, Colón, Combeima, Doscientos, Dovio, El Recreo, Garzón, Guadalupe, Junín, La Espiga, Llano de Palmas, Montenegro, Puracé, Quindío, Roperó, San Simón y Tacueyó.
Media	Cantarranas, Cascarero, Génova, Gualí, Isnos, La Estrella, Llana Fría, Mayo, Mondomo, Mortiño, Pensilvania, Quiña, Río Manso, Rionegro y Tareas.
Alta	Catarina
Variable	Amagá, Armenia, Balboa, Chuscal, Guaduas, La Loma, La Mutis, Lengupá, Malabar, Miraflores, Norte, Oriente, Saladoblanco, Salgar, Salinas, Seguengue, Siberia, Suroeste, Tablazo, Tambillo, Titiribí, Togüí, Venecia y Vergel.



Tabla 21.

Clasificación de las unidades cartográficas de suelos de la zona cafetera, según la fertilidad potencial. Tomado de Gómez et al. (1991).

Fertilidad potencial	Unidades cartográficas de suelos
Baja	Balboa, Cajibío, Cantarranas, Cincho, Cínera, Doña Juana, El Peñol, El Recreo, El Rosario, Fondesa, Fresno, Garzón, La Espiga, La Laja, La Victoria, Lengupá, Líbano, Malabar, Miraflores, Montenegro, Norte, Piendamó, Pubenza, Puracé, Quindío, Quiña, Roper, Saladoblanco, Salinas, San Agustín, Sandoná, Socorro, Sucre, Tacueyó, Tambo, Timbío y Villeta.
Baja a media	Amagá, Cascarero, Isnos, Junín, Mayo, Oriente, Paujil, San Simón, Siberia, Tambillo, Titiribí y Villapaz.
Media	Chanchón, Chuscal, Colón, Doscientos, Dovio, Génova, La Loma, Mondomo, Mortiño, Tablazo y Tareas.
Alta	Armenia, Cartagena, Catarina, Combeima, Guadalupe, Guaduas, Gualí, La Estrella, La Laguna, La Mutis, Llana Fría, Llano de Palmas, Mendarco, Pensilvania, Río Manso, Rionegro, Salgar, Sargento, Seguengue, Suroeste, Togüí, Venecia y Vergel.
Variable	Amagá, Armenia, Balboa, Chuscal, Guaduas, La Loma, La Mutis, Lengupá, Malabar, Miraflores, Norte, Oriente, Saladoblanco, Salgar, Salinas, Seguengue, Siberia, Suroeste, Tablazo, Tambillo, Titiribí, Togüí, Venecia y Vergel.

contenidos en la solución y los contenidos intercambiables adsorbidos en la fase sólida, siendo considerados disponibles. Con respecto al fósforo, aunque existe equilibrio entre el elemento en la solución y la fracción que se encuentra en la fase sólida, hay mucha dificultad en determinar lo que sería realmente el fósforo disponible. En el caso de los nutrientes que están en formas orgánicas, principalmente nitrógeno y azufre, su disponibilidad depende de la mineralización de la materia orgánica, la cual siempre es una incógnita, dado que depende de las variaciones en las condiciones ambientales predominantes, por ejemplo, la humedad y la temperatura del suelo; en consecuencia, pueden considerarse realmente disponibles solo las fracciones que están en la solución.

Conceptualmente, la disponibilidad de los nutrientes se refiere al resultado de la acción integrada de los factores **intensidad** (I), que estima la concentración del nutriente en la solución del suelo; **cantidad** (Q), que se refiere a la reserva lábil del nutriente, es decir, la cantidad adsorbida o precipitada que puede pasar fácilmente a la solución, y

capacidad (C), también llamada **capacidad tampón**, la cual es la medida de resistencia que ofrece el suelo para dejar modificar la cantidad de nutriente en la solución. Cabe resaltar que los coloides de los suelos difieren en su capacidad, debido a su naturaleza y composición química (Havlin et al., 2017; Mengel et al., 2001). Un ejemplo se presenta en la Figura 17, en la cual se observa el comportamiento del Mg para tres localidades cafeteras de Colombia.

La Figura 18 esquematiza los diferentes “compartimentos” del suelo para abastecer de nutrientes a la solución del suelo, el respectivo nivel de disponibilidad y los procesos que involucra.

Por último, cabe resaltar que la disponibilidad de un nutriente, en una determinada condición, depende tanto de las formas químicas en que este se encuentra en el suelo, como de la capacidad de absorción de la planta, del desarrollo del sistema radical, del tiempo de crecimiento, de las condiciones climáticas (principalmente la lluvia) y de la disponibilidad de los demás nutrientes (Raij, 2011).



Tabla 22.

Frecuencia (porcentaje) de muestras de suelos clasificadas en la categoría baja de fertilidad para materia orgánica, fósforo, potasio y magnesio en 20 departamentos de Colombia. Tomado de Sadeghian y Duque (2017).

Departamento	Número de muestras	Porcentaje de las muestras de suelo en la categoría baja			
		Materia orgánica	Fósforo	Potasio*	Magnesio
Antioquia	79.227	56	61	65	47
Boyacá	806	57	70	91	66
Caldas	34.071	44	60	66	43
Caquetá	275	84	86	94	91
Casanare	63	89	60	94	75
Cauca	7.897	33	91	55	44
Cesar	969	71	62	72	26
Chocó	270	29	57	61	27
Cundinamarca	2.628	57	55	75	36
Huila	21.093	74	51	65	25
La Guajira	166	64	23	53	16
Magdalena	1.711	91	64	92	31
Meta	224	76	75	92	82
Nariño	452	75	41	32	17
Norte de Santander	7.101	79	49	80	46
Putumayo	27	89	82	100	100
Quindío	40.999	53	42	57	50
Risaralda	6.152	33	64	56	34
Tolima	25.072	70	50	70	35
Valle del Cauca	25.816	58	82	63	14
No. de departamentos con una frecuencia mayor de 50%		16	16	19	6
Porcentaje de frecuencias mayores de 50% **		80	80	95	25

* Corresponde a la agrupación de las categorías baja y media.

** (Número de departamentos con una frecuencia mayor a 50% x 100) / Número total de departamentos.

Como ejemplo pueden considerarse las siguientes condiciones:

- Cuando el nivel de Mg intercambiable–Mg²⁺ en el suelo es 1,0 cmol_c kg⁻¹ hay mayor disponibilidad para la planta que un nivel de Mg²⁺ igual a 0,5 cmol_c kg⁻¹
- 0,5 cmol_c kg⁻¹ de Mg²⁺ son más disponibles para la planta si se presenta buena humedad en el suelo que en temporadas secas.
- Cuando se presenta buena humedad en el suelo, 0,5 cmol_c kg⁻¹ de Mg²⁺ son más

disponibles para la planta que 1,0 cmol_c kg⁻¹ del elemento en condiciones de déficit hídrico.

- 0,5 cmol_c kg⁻¹ de Mg²⁺ son más disponibles para una planta con buen sistema radical que para otra pobre en raíces, o para una planta que una plántula.
- 0,5 cmol_c kg⁻¹ de Mg²⁺ son más disponibles para la planta cuando el nivel de potasio intercambiable–K⁺ es medio (0,3 cmol_c kg⁻¹) que un nivel de K⁺ muy alto (0,8 cmol_c kg⁻¹).



- ♦ $0,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de Mg^{2+} son más disponibles para la planta cuando no se presentan condiciones de acidez en el suelo frente a escenarios de elevada acidez.
- ♦ $0,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de Mg^{2+} son más disponibles para la planta cuando no hay un exceso del ion sulfato- SO_4^{2-} en el suelo que cuando lo hay.

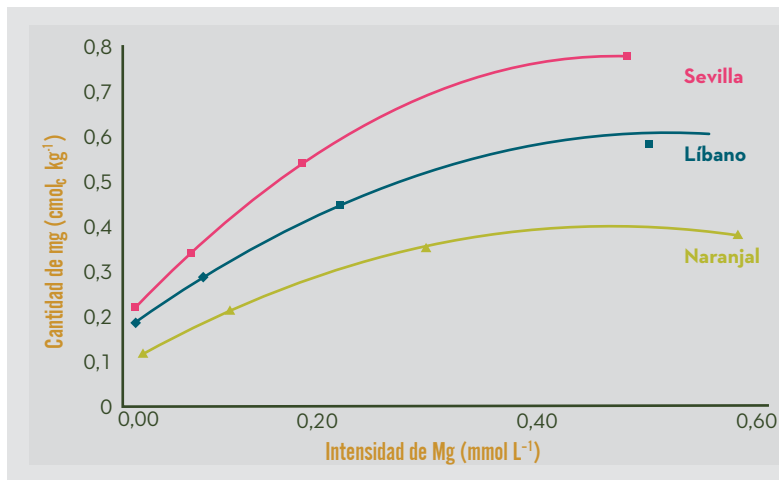


Figura 17. Relación entre la Intensidad (I) y la Cantidad (Q) de Mg^{2+} para tres suelos de la zona cafetera colombiana, diferentes en su capacidad tampón (C). En el suelo de Sevilla se presenta una mayor capacidad búfer o tampón para Mg con respecto al suelo de Naranjal. Tomado de Sadeghian (2014).

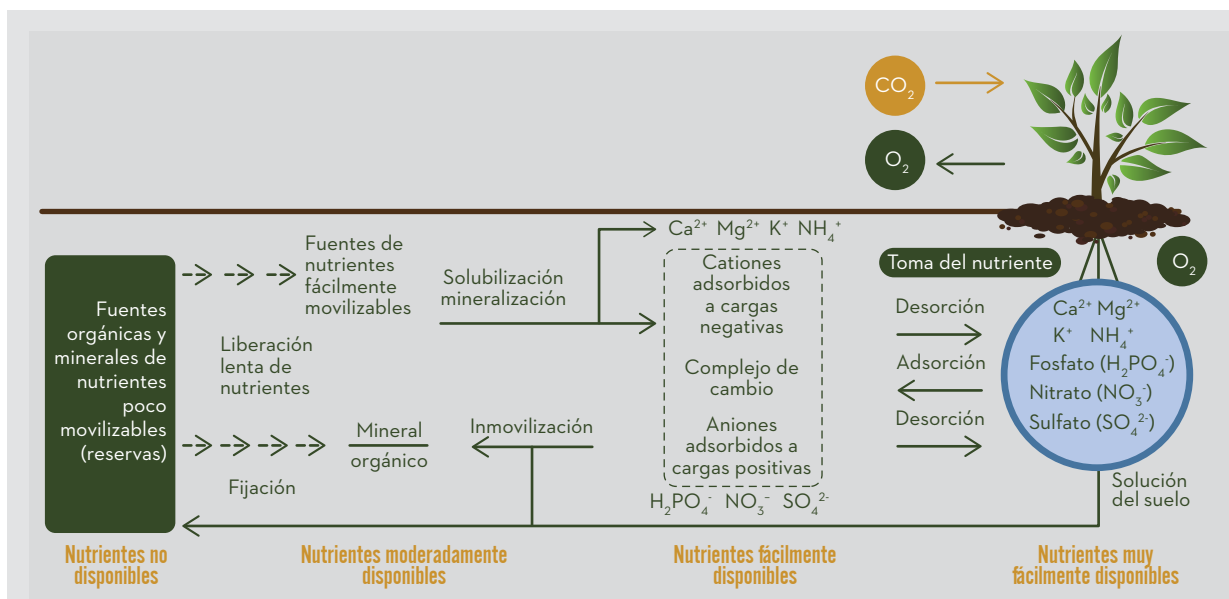


Figura 18. Esquema de los diferentes “compartimentos” del suelo para abastecer de nutrientes a la solución del suelo, el respectivo nivel de disponibilidad y los procesos que involucra. Adaptado de Roy et al. (2006).

Nutrientes minerales:
Extracción, partición y remoción





Hemos determinado que una serie de elementos son absolutamente esenciales para la vida vegetal.

Son esenciales porque una planta privada de cualquiera de estos elementos dejaría de existir (Justus von Liebig, 1803-1873).

Mediante la fotosíntesis, las plantas hacen uso de la energía de la luz para generar biomasa en forma de productos que son de interés para la humanidad, principalmente granos, fibras, tubérculos, frutas, verduras y forrajes. Para lograr este propósito, además de la luz, las plantas necesitan una temperatura adecuada, agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2) y nutrientes minerales. Los elementos que se consideran esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, es decir, nutrientes, son indispensables como constituyentes de las plantas, para reacciones bioquímicas y la producción de compuestos orgánicos, tales como carbohidratos, proteínas, grasas y vitaminas. Por esta razón, en la agricultura la adecuada nutrición mineral de las especies cultivadas es un requisito previo e importante para obtener altos rendimientos y productos de buena calidad. Los nutrientes minerales se obtienen tanto de las reservas del suelo como de las fuentes externas, principalmente fertilizantes, enmiendas, abonos orgánicos y la atmósfera.

El café, al igual que las demás especies vegetales, requiere elementos minerales esenciales para su crecimiento y desarrollo; por lo tanto, la disponibilidad de estos en el suelo determina la productividad de los cultivos.

Elementos esenciales para las plantas

Cuando se analiza químicamente la composición de las plantas superiores es posible hallar un número considerable de elementos; sin embargo, esto no significa que todos sean indispensables o esenciales para su existencia. Ello se debe a que las

plantas absorben de manera indiscriminada cualquier elemento que se encuentra en forma disponible. En razón de lo expuesto, se hace necesario identificar aquellos elementos que son esenciales para su crecimiento y desarrollo.

El empleo de compuestos químicos con alto grado de pureza, utilizados para la preparación de soluciones en las técnicas de cultivos hidropónicos, ha contribuido enormemente al avance de la nutrición mineral de las plantas. Cabe aclarar que el término **elemento mineral esencial** o nutriente mineral fue propuesto por Arnon y Stout (1939), quienes establecieron los siguientes criterios para que un elemento sea considerado como esencial:

1. La ausencia del elemento impide que la planta complete su ciclo de vida.
2. El elemento es insustituible, o sea que no puede ser reemplazado por otro con propiedades similares.
3. El elemento hace parte de una sustancia o reacción bioquímica esencial para el metabolismo de la planta.

Macro y micronutrientes

Existen 17 elementos en la naturaleza que se consideran esenciales para las plantas. Tres de ellos: carbono (C), oxígeno (O) e hidrógeno (H), provienen del agua que absorben las raíces y del dióxido de carbono (CO_2) que se fija desde la atmósfera vía fotosíntesis. Más del 90% de la materia seca de las plantas está constituida por C, H y O (Epstein & Bloom, 2005). De manera general, en el estudio de la fertilidad del suelo no se tienen en cuenta estos tres elementos, dado que el suelo no es su fuente primaria para las especies vegetales.

Junto con C, H y O, otros 14 elementos son requeridos; los cuales se absorben principalmente por las raíces desde el suelo. Seis de ellos tienen una demanda más alta y se denominan **macronutrientes**: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca),

magnesio (Mg) y azufre (S). La concentración de estos elementos en el tejido vegetal se expresa, de modo general, en el orden de decagramos por kilogramo (dag kg^{-1}) de materia seca o porcentaje (%). Los restantes ocho: hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn), boro (B), molibdeno (Mo), zinc (Zn), cloro (Cl) y níquel (Ni), son exigidos en cantidades menores, razón por la cual se conocen como **micronutrientes**. La concentración de estos elementos se da en orden de miligramos por kilogramo (mg kg^{-1}) de materia seca, o sea partes por millón (ppm) (Epstein & Bloom, 2005; Havlin et al., 2017; Malavolta, 2006; Mengel et al., 2001). Es pertinente resaltar que hoy día no existe un consenso total acerca de la esencialidad de los nutrientes; por ejemplo, Kirkby (2012) sostiene que el carácter esencial de Cl y Ni se encuentra restringido a un número limitado de especies.

Una división adicional clasifica al N, P y K como **macronutrientes primarios** y al Ca, Mg y S como **macronutrientes secundarios**. Para el caso de N y K, la agrupación en mención se debe a las cantidades requeridas por las plantas, mientras que, para el P se relaciona con la frecuencia de respuesta a su aplicación en la mayoría de los suelos del mundo, tendencia que no se observa para los macronutrientes secundarios, cuyos contenidos llegan a ser iguales o mayores que el P.

Elementos benéficos

Con la evolución de las investigaciones en el área de la nutrición mineral de plantas se identificaron ciertos elementos que pueden ser considerados nutrientes para algunas especies o que ocasionalmente sustituyen de manera parcial la función de los elementos esenciales. Otros, en concentraciones muy bajas, estimulan el crecimiento de las plantas; sin embargo, sus esencialidades no han sido demostradas o, apenas demostradas en determinadas condiciones especiales. Estos elementos se clasifican como **elementos benéficos**, entre los que se encuentran: cobalto (Co), selenio (Se), silicio (Si), sodio (Na) y vanadio (V) (Epstein y Bloom, 2005; Malavolta, 2006).

Movimiento de iones del suelo hacia la raíz

Para que los elementos esenciales que se encuentran en el suelo bajo su forma iónica sean absorbidos por las raíces, es necesario que establezcan contacto con estas. Existen tres mecanismos de movimiento hacia la raíz y posterior contacto: **interceptación radical**, **flujo de masa** y **difusión** (Figura 19). Havlin et al. (2017) describen estos mecanismos de la siguiente manera:

Intercetapción radical

La absorción de iones presentes en la solución del suelo, se facilita mediante el contacto físico entre la raíz y la superficie mineral o la materia orgánica. A medida que el sistema radical crece o cuando hay presencia de **micorrizas** que actúan como extensión de las raíces, se incrementan las posibilidades de la absorción de nutrientes por la planta.

Dado que las raíces ocupan un porcentaje muy pequeño del volumen del suelo (0,2%-0,5%) es mínimo el porcentaje de los nutrientes que son interceptados directamente a través del sistema radical (menos del 1%), por lo tanto,

su contribución es pequeña en comparación con las necesidades totales de la planta.

Flujo de masa

En el proceso de la absorción del agua por las raíces ocasionada en respuesta al proceso de transpiración, la evaporación de la humedad en la superficie del suelo y la percolación del agua a través del perfil del suelo, se genera la posibilidad del transporte de nutrientes hacia las raíces de las plantas. En condiciones de alta transpiración por la planta y una alta concentración de nutrientes en la solución del suelo, cantidades importantes de agua transportan iones hacia la raíz. La mayor parte del N y una parte del Ca, Mg y S se mueven de esta manera. Es así como ante condiciones de sequía el movimiento y la absorción de estos nutrientes, se verán más afectados que otros elementos requeridos.

Difusión

Sucede cuando se genera un movimiento de iones a distancias cortas, debido a un gradiente de concentración química, desde la solución del suelo con mayor concentración a la superficie de la raíz con menor concentración. El K y P son los representantes de mayor importancia en este mecanismo.

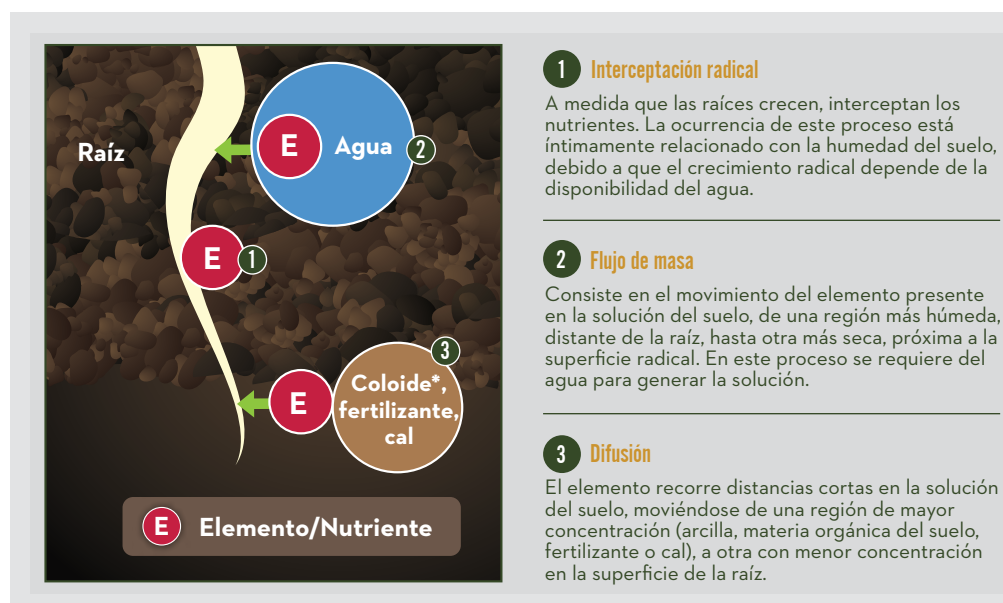


Figura 19. Mecanismos de contacto y movimiento de nutrientes hacia la raíz. Adaptado de Malavolta et al. (1989).
*Coloide: materia orgánica y arcilla.

Absorción de los nutrientes

Las raíces de las plantas absorben los nutrientes minerales desde la solución del suelo, casi exclusivamente en sus formas iónicas, bien sea como cationes con carga positiva o como aniones con carga negativa:

Nutriente	Forma de absorción por la planta
Nitrógeno	NO_3^- (nitrato), NH_4^+ (amonio)
Fósforo	H_2PO_4^- (fosfato monovalente) y HPO_4^{2-} (fosfato divalente)
Potasio	K^+
Calcio	Ca^{2+}
Magnesio	Mg^{2+}
Azufre	SO_4^{2-} (sulfato)
Hierro	Fe^{2+} (ferroso), Fe^{3+} (férrico)
Cloro	Cl^- (cloruro)
Manganeso	Mn^{2+}
Boro	H_2BO_3^- (borato), H_3BO_3 (ácido bórico)
Zinc	Zn^{2+}
Cobre	Cu^{2+}
Níquel	Ni^{2+}
Molibdeno	MoO_4^{2-} (molibdato)

Movilidad de los nutrientes en la planta

Una vez los elementos esenciales ingresan a las raíces de las plantas, se mueven con relativa facilidad hasta las hojas a través del xilema. Del mismo modo, algunos nutrientes también pueden moverse rápidamente vía floema desde las hojas más viejas hacia las más nuevas cuando ocurre una deficiencia, razón por la cual se conocen como **móviles**. Caso contrario ocurre con los nutrientes **inmóviles**, pues ante la eventualidad de una carencia, permanecen en las hojas más viejas (Mengel et al., 2001).

- Los nutrientes móviles en la planta son: N, P, K, Mg, Cl y Mo
- Los nutrientes inmóviles en la planta son: Ca, S, Fe, Mn, B, Zn, Cu y Ni

La concentración foliar de los elementos presenta cambios con el crecimiento de

la hoja en respuesta a su movilidad en la planta. Los nutrientes móviles como nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio exhiben valores mayores en las hojas más nuevas, en tanto que los poco móviles por ejemplo calcio, presentan un comportamiento contrario. Por lo general, en café la anterior tendencia tiende a estabilizarse a partir del cuarto par de hojas, contadas desde el ápice (Figura 20).

Funciones de los nutrientes en la planta

Una vez los elementos esenciales ingresan a la planta cumplen tres tipos de funciones: i) hacen parte de la estructura de una molécula o un compuesto orgánico; ii) son componentes de enzimas; iii) son activadores enzimáticos. En la Tabla 23 se presentan algunas de las funciones de los macro y micronutrientes en la planta.

Extracción, partición y acumulación de los nutrientes en café

La cantidad absorbida de nutrientes por la planta varía de acuerdo con:

- **Las características de la planta.** Especie, variedad, etapa de desarrollo y nivel de producción, entre otras.
- **Los factores climáticos.** Principalmente la precipitación, humedad relativa, temperatura y luminosidad.
- **Las propiedades del suelo.** Físicas, químicas y biológicas.
- **El manejo del cultivo.** Densidad de siembra y arreglo espacial, riego, sombrero, control de arvenses, fertilización, entre otros.

Con respecto a lo anterior, cabe aclarar que frecuentemente la planta extrae del suelo una cantidad mayor del nutriente a la requerida, como consecuencia de una alta disponibilidad de este en el suelo.

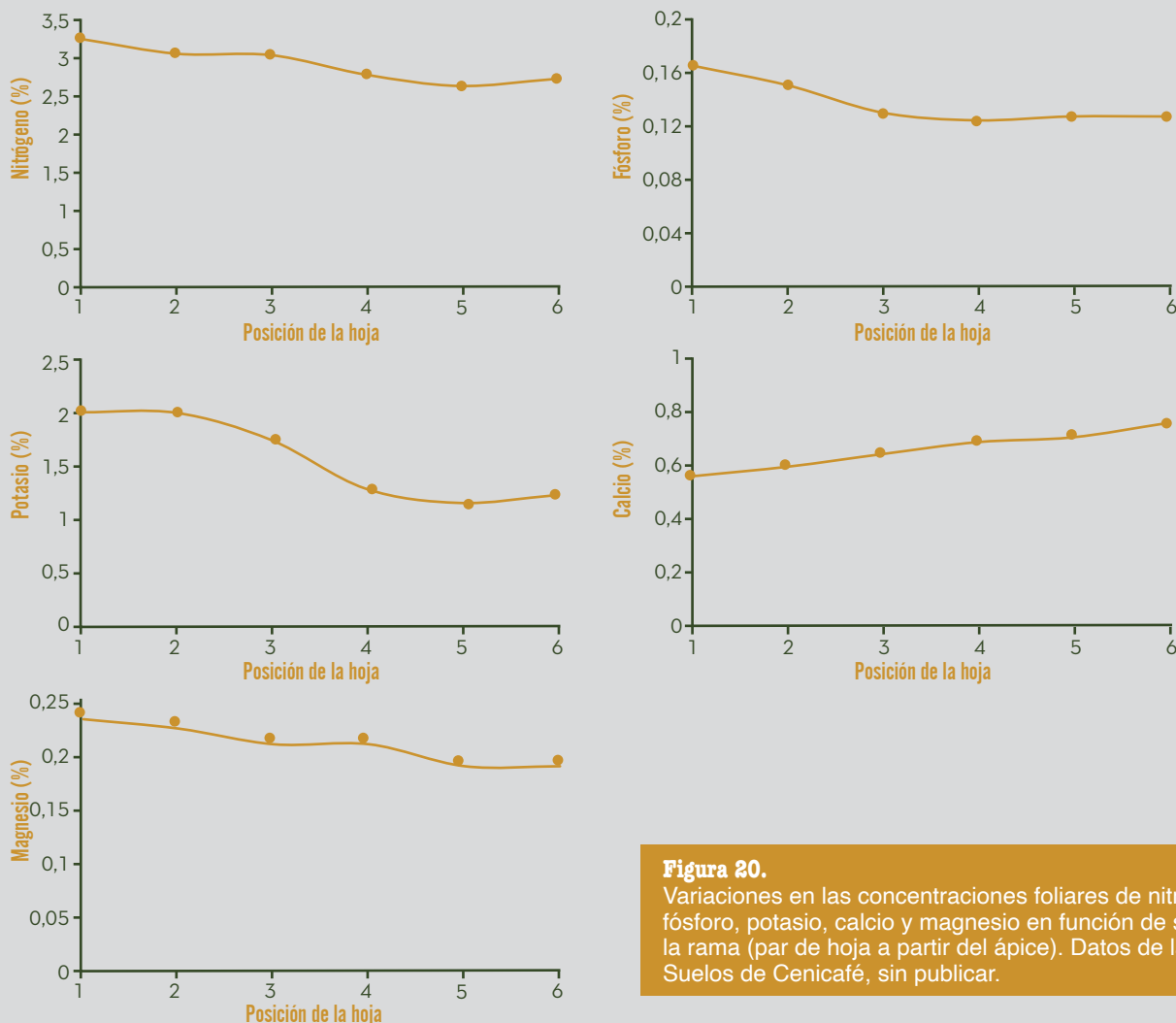


Figura 20. Variaciones en las concentraciones foliares de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en función de su posición en la rama (par de hoja a partir del ápice). Datos de la Disciplina de Suelos de Cenicafé, sin publicar.

El término **extracción** generalmente se refiere a la cantidad total de los nutrientes minerales absorbidos por las raíces y acumulados en toda la planta, la **partición** hace referencia a la distribución de estos elementos en los diferentes órganos, raíces, tallo, ramas, hojas, flores y frutos y, la **remoción o exportación**, corresponde a la cantidad del nutriente que se remueve o se retira del lote a través de la cosecha, la cual, para el caso de café se relaciona con los frutos. Al respecto, cabe resaltar que los nutrientes contenidos en órganos diferentes a los frutos por lo general retornan al suelo, participando en el proceso de ciclaje en el sistema. En el café, una excepción de lo anterior la constituye la remoción de los tallos

del lote luego de una renovación mediante la zoca tradicional.

Durante todas las etapas del cultivo de café (almácigo, levante y producción) las plantas extraen una mayor cantidad de N y K que los demás nutrientes, en un segundo lugar se posiciona el Ca y, posteriormente, el P, Mg y S, seguidos por los micronutrientes Fe, Mn, Zn, Cu y B.

En la etapa de almácigo, con una duración entre cuatro y seis meses, las plantas absorben cantidades muy bajas de todos los nutrientes, condición que se relaciona con el “arranque” inicial de las plantas, el cual depende de las condiciones predominantes del sitio y

Tabla 23.

Funciones de los macro y micronutrientes minerales en las plantas. Adaptado de Kirkby y Römheld (2007), Mengel et al. (2001).

Clasificación	Elemento esencial	Funciones en la planta
Macronutrientes	Nitrógeno	Es indispensable para el proceso de la fotosíntesis y forma parte de vitaminas, proteínas, clorofila, ácidos nucleicos y enzimas. Se requiere para la respiración, los procesos de absorción iónica, multiplicación y diferenciación celular. Además, interactúa con otros elementos como P, S y K.
	Fósforo	Este elemento es imprescindible para los procesos de almacenamiento y transferencia de energía y la fijación simbiótica del nitrógeno atmosférico. Participa en reacciones de compuestos para la fotosíntesis, la división celular y la respiración.
	Potasio	Es esencial en procesos fisiológicos como fotosíntesis y crecimiento meristemático. Tiene funciones como activador enzimático para el metabolismo de proteínas y carbohidratos. Regula la apertura y cierre de estomas manteniendo el balance hídrico en la planta y contribuye a mejorar la resistencia de las plantas al ataque de insectos.
	Calcio	Hace parte de las paredes celulares y membranas de la planta, aportando a su estabilidad estructural y al fortalecimiento de los tejidos vegetales. Interviene en la absorción de iones y la división celular. Reduce el estrés generado por metales pesados y salinidad.
	Magnesio	Es el componente central de la clorofila y se necesita también para formación de proteínas, respiración, absorción de iones, captación y transporte del fósforo en la planta y almacenamiento y transferencia de energía.
	Azufre	Interviene en los procesos de fotosíntesis, respiración, fijación de nitrógeno, producción de aminoácidos necesarios para la formación de proteínas y compuestos útiles para la desintoxicación de algunos metales pesados.
Micronutrientes	Hierro	Este elemento es esencial para la fotosíntesis, respiración, síntesis de clorofila, asimilación de azufre, fijación biológica y asimilación de nitrógeno. Hace parte de proteínas, enzimas y metabolitos.
	Cloro	Es necesario para la activación de varias enzimas, el proceso de fotosíntesis, el equilibrio osmótico y la apertura de estomas para el intercambio de gases, además de participar en el transporte de electrones.
	Manganeso	Es importante como activador de varias enzimas. Cumple una función en la división de la molécula de agua y el sistema de evolución de O_2 en la fotosíntesis. También está involucrado en procesos de fotosíntesis, absorción de iones, respiración, control hormonal, síntesis de proteína y tolerancia al estrés.
	Boro	Tiene un rol importante en el metabolismo de proteínas y ácidos nucleicos, así como en la síntesis de carbohidratos y la fotosíntesis. Está asociado a la estabilidad de las membranas celulares y a la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico que facilita el proceso de fecundación.
	Zinc	Tiene funciones como componente de algunas enzimas y también como activador de algunas de ellas. Es importante para la síntesis de proteínas y de hormonas relacionadas con el crecimiento de las plantas.
	Cobre	Forma parte y es cofactor de varias enzimas. Participa en la fotosíntesis, respiración, regulación hormonal, fijación simbiótica del nitrógeno atmosférico por las leguminosas y el incremento de la resistencia de la planta a enfermedades.
	Níquel	Se requiere para el metabolismo del nitrógeno, al formar parte de la enzima ureasa que descompone la urea en amonio y CO_2 y puede impedir la intoxicación por acumulación de cantidades excesivas de urea en la planta. También se ha encontrado que ayuda en la prevención y reducción de hongos en trigo.
	Molibdeno	Es un componente de la enzima nitrogenasa que participa en la fijación simbiótica de nitrógeno atmosférico y nitrato reductasa que cataliza la reducción de los nitratos a nitritos.

el sustrato empleado. Para dos unidades cartográficas de suelo en el departamento de Antioquia, Venecia y Salgar, se evaluó la cantidad de nutrientes absorbidos por las plantas durante seis meses (Tabla 24). Las plantas desarrolladas en el suelo de la unidad Venecia crecieron más y, por lo tanto, acumularon una mayor cantidad de casi todos los nutrientes. Se presentó el siguiente orden en la absorción:

$$K > N > Ca > P > Mg > Fe > Mn > Zn > Cu > B$$

En otra investigación, se midió la extracción y partición de los nutrientes en los diferentes órganos de plantas con seis meses de edad para las condiciones del Huila. La materia seca total (10,4 g/planta) estuvo conformada en el 55% por las hojas, 24% el tallo y 21% las raíces. Para N, P, K, Ca, Mg, Mn y B la mayor acumulación de los nutrientes tuvo lugar en las hojas, mientras que para Fe, Zn y Cu el órgano de preferencia fue la raíz (Figura 21). El orden en la absorción de los nutrientes se conservó con relación al anterior estudio.

Durante la fase vegetativa, aproximadamente 650 días después de la siembra, la planta de café variedad Colombia presenta un crecimiento lento y, en razón de ello, extrae del suelo cantidades relativamente bajas de nutrientes, según las condiciones del sitio: 8,6 a 12,5 g de N, 0,6 a 2,7 g de P, 7,6 a 25,3 g de K, 3,9 a 10,6 g de Ca y 1,2 a 2,1 g de Mg. Al iniciar la fase reproductiva se incrementa la tasa de crecimiento y la acumulación de nutrientes, hasta alcanzar los siguientes valores 2.000 días después de la siembra (kg ha⁻¹): N 547, P 51, K 508, Ca 234 y Mg entre 59 y 117 (Riaño et al., 2004).

En una investigación realizada en el departamento del Huila, se determinó la acumulación de materia seca y de nutrientes en una plantación de café Variedad Castillo®, establecida con una densidad de 6.700 plantas/ha, durante los primeros cuatro años después de la siembra. Tanto la biomasa de los órganos vegetativos de la parte aérea, tallo, ramas y hojas, como la biomasa de los frutos presentó una tendencia creciente a

Tabla 24.
Materia seca de café (g/planta) y nutrientes acumulados (mg/planta) durante la etapa de almácigo en dos suelos de Antioquia. Tomado de Sadeghian y González (2014).

Materia seca y nutriente	Unidad cartográfica de suelo	
	Venecia	Salgar
Materia seca	7,88	6,11
N	157,60	72,66
P	29,94	20,15
K	211,18	137,99
Ca	35,46	34,19
Mg	20,49	15,87
Fe	22,11	7,67
Mn	1,23	0,91
Zn	0,32	0,24
Cu	0,15	0,17
B	0,13	0,16

través del tiempo (Figura 22), siendo mayor la representación de los órganos vegetativos; en este sentido, de la materia seca total alcanzada a los 48 meses, aproximadamente 35 t ha⁻¹, el 73% estuvo representado por las estructuras vegetativas y el 27% por los frutos (Figura 23). Este resultado revela una alta demanda de los nutrientes por parte de los órganos vegetativos en la obtención de cosechas que se consideran relativamente altas (más de 520 arrobas de café pergamino seco c.p.s. en el acumulado de tres cosechas) (Figura 24). La acumulación total de N y K en los órganos de la parte aérea de la planta, incluyendo los frutos, fue similar durante el tiempo de evaluación y alcanzó valores cercanos a 650 kg ha-año⁻¹. Con respecto al Ca, Mg, P y los micronutrientes, estos consiguieron las siguientes cantidades, aproximadamente: 240, 70, 55 y 30 kg ha-año⁻¹, respectivamente.

**Crecimiento del fruto y
acumulación de nutrientes**

Salazar et al. (1994) sugieren que para la variedad Colombia, el crecimiento del fruto se ajusta a un modelo sigmoideal con tres fases, la primera de tipo logarítmico que se extiende hasta los 60 días, la segunda exponencial que va hasta los 180 días, y la tercera, de



Figura 21. Acumulación y partición de nutrientes en plantas de café durante la etapa de almácigo bajo condiciones del departamento del Huila (unidad cartográfica de suelos La Cristalina). Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé, 2016, p. 94).

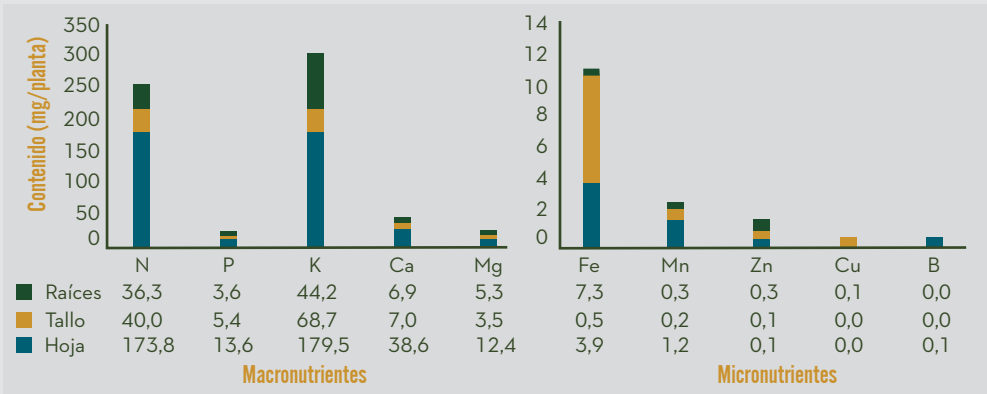


Figura 22. Materia seca acumulada en los órganos vegetativos (tallo, ramas y hojas) y frutos de café durante 48 meses. Adaptado de Cenicafe (2017, 2019).

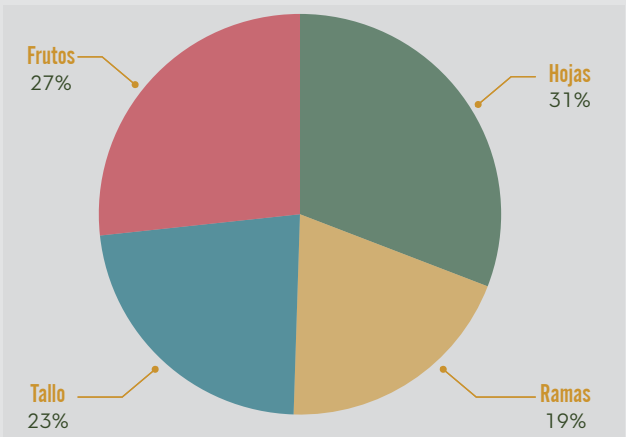
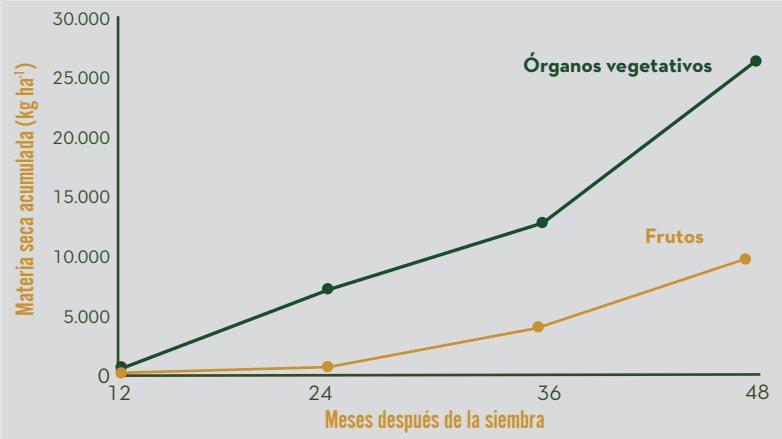


Figura 23. Distribución porcentual de la materia seca acumulada en los órganos vegetativos y reproductivos de café durante 48 meses. Adaptado de Cenicafe (2017, 2019).

estabilización, que ocurre hasta los 240 días. A su vez, Sadeghian y Salamanca (2015) indican que la acumulación de la materia seca en los frutos de café Variedad Castillo® se ajusta a un modelo sigmoideal doble y varía según la localidad (Figura 25). La información del anterior estudio permite distinguir las siguientes cuatro etapas: una inicial con poca ganancia en la biomasa del fruto (hasta los 60 a 90 días después del pico de la floración-DDPF), seguida por una expansión rápida (hasta los 90 a 120 DDPF), una fase de crecimiento desacelerado (hasta los 150 DDPF) y un cuarto estadio con un fuerte incremento en acumulación de la biomasa. En el momento de la madurez de la cosecha, aproximadamente 240 DDPF, se registran valores de la materia seca del

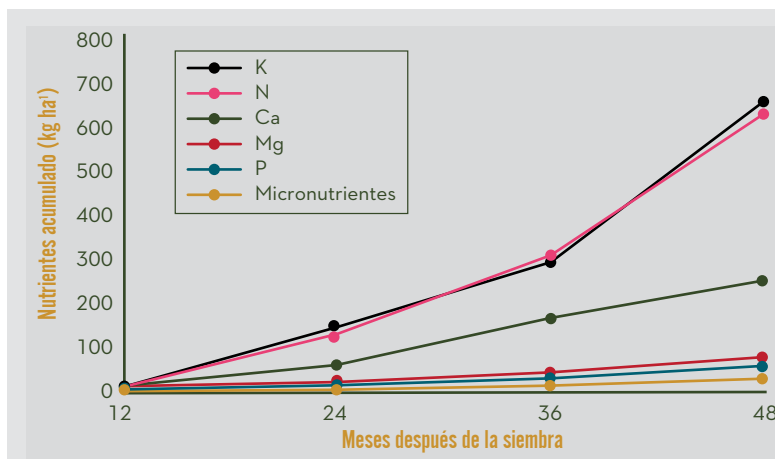


Figura 24.

Acumulación de nutrientes en los órganos vegetativos (tallo, ramas y hojas) y frutos de café durante 48 meses. Adaptado de Cenicafé (2017, 2019).

fruto entre 0,492 y 0,691 g; diferencias que pueden atribuirse a múltiples factores, siendo quizá más determinantes los componentes climáticos, en especial la lluvia.

Conforme avanza el crecimiento del fruto a través del tiempo, disminuye la concentración de los nutrientes en este órgano, como resultado del efecto de la dilución de los elementos en respuesta al aumento acelerado de su biomasa. Una muestra de este comportamiento se presenta para nitrógeno, fósforo y potasio en la Figura 26.

La acumulación de los nutrientes en el fruto a través del tiempo presenta una tendencia relativamente similar a la observada para la biomasa seca (Figura 27). La cantidad total de nutrientes almacenados en el fruto de café tiende a ser baja durante los primeros meses después de la floración, pero se incrementa posteriormente. De tal manera que durante los primeros 60 días se acumula menos del 15% de la cantidad total, a partir de los 60 días y hasta los 180 cerca de 60% y en los últimos dos meses previos a la cosecha el 25%.

En el momento de la cosecha, el K se caracteriza por ser el elemento más abundante en el fruto, seguido por N, Ca, P, Mg, S, Mn, Fe, B, Cu y Zn (Tabla 25), tendencia que puede presentar algunas variaciones según las condiciones del sitio.

En las Tablas 26 y 27 se presentan las concentraciones de macro y micronutrientes en las diferentes partes que componen el fruto de café variedad Colombia, reportadas por Sadeghian et al. (2006). En la almendra, el N fue el nutriente de mayor concentración, seguido por el K. Los porcentajes de Ca, Mg y P resultaron similares entre sí y diez veces menores que el del N, pero superiores a los del S. Aunque el Fe y Mn se caracterizaron por presentar los mayores promedios entre los micronutrientes, sus concentraciones fueron 450 veces menores que las del N. En la pulpa, el K se caracterizó por ser el nutriente predominante y el N ocupó el segundo lugar, seguido por el Ca, P y Mg. Entre los elementos menores, las concentraciones de Fe y B fueron las más altas. En el pergamino, en su orden, el N, K y Ca fueron los macronutrientes de mayor concentración y, en el segundo lugar, Mg, S y P. Con respecto a los micronutrientes, el Fe se destacó por presentar los niveles más altos, seguido por Mn, Cu, Zn y B. En el mucílago, los porcentajes del N y K fueron comparables, y mayores que el Ca, el cual a su vez exhibió una concentración más alta que los demás elementos secundarios.

En 5.625 kg de café cereza, equivalentes aproximadamente a 1.000 kg de café almendra o 1.250 kg de pergamino seco (c.p.s.), se encuentran cerca de 78 kg de nutrientes minerales, distribuidos así: almendra 35 kg,

Figura 25.

Acumulación de la materia seca en el fruto de café, como respuesta al tiempo transcurrido entre la floración y la cosecha, en cuatro Estaciones Experimentales (EE) de Cenicafé. Las líneas punteadas delimitan los estadios del desarrollo del fruto: i) crecimiento lento, ii) expansión rápida, iii) crecimiento desacelerado y iv) fuerte incremento en la acumulación de materia seca. Tomado de Sadeghian y Salamanca (2015).

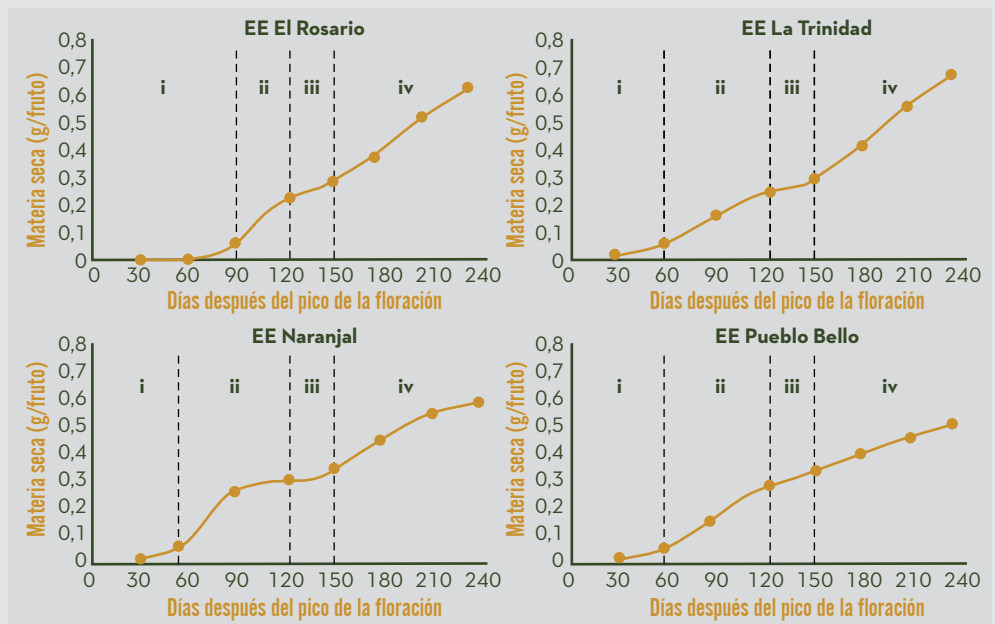
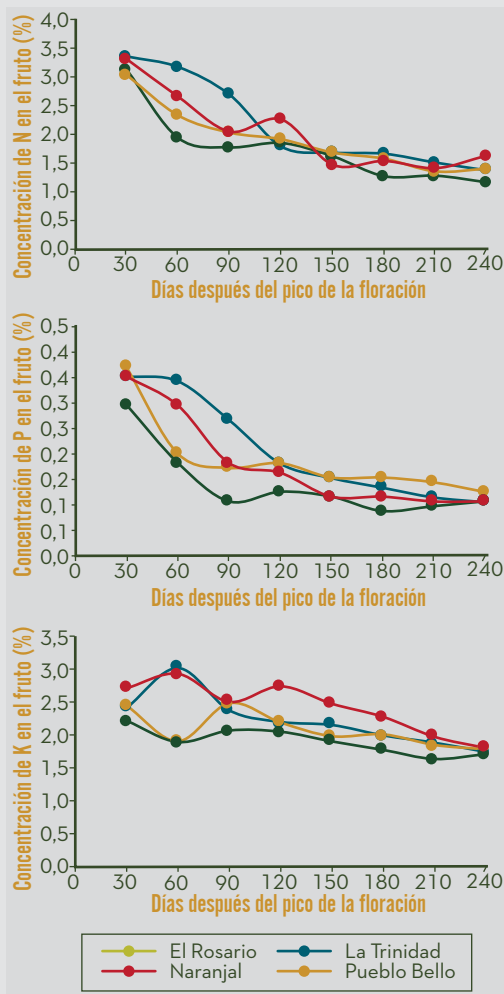


Figura 26.

Concentración de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en los frutos de café en función del tiempo transcurrido después del día pico de la floración en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé. Tomado de Sadeghian et al. (2012).



pulpa 37 kg, pergamino 2 kg y mucílago 4 kg. Estas cantidades representan la siguiente distribución porcentual: almendra 44,9%, pulpa 47,4%, pergamino 2,6% y mucílago 5,1% (Sadeghian et al., 2007).

Con relación al volumen de los macronutrientes removidos a través de la cosecha, se tienen los siguientes valores para 1.250 kg de c.p.s.: N 30,9 kg; P 2,3 kg (P_2O_5 5,18 kg); K 36,9 kg (K_2O 44,34 kg); Ca 4,3 kg (CaO 5,96 kg); Mg 2,3 kg (MgO 3,75 kg) y S 1,2 kg. La remoción de los micronutrientes corresponde a: Fe 107 g, Mn 61 g, B 50 g, Cu 33 g y Zn 18 g (Sadeghian et al., 2006). En las Figuras 28 y 29 se desglosan las anteriores cantidades para los macro y micronutrientes, respectivamente, de acuerdo a las partes que componen los frutos de café.

Con respecto a la almendra, cuyos compuestos determinan en buena medida la calidad física y organoléptica del café, pueden presentarse diferencias entre regiones, de acuerdo con la riqueza natural del suelo y las prácticas culturales, principalmente la fertilización. Un ejemplo de lo anterior puede observarse en la Tabla 28 para algunas muestras procedentes de dos localidades de Colombia.

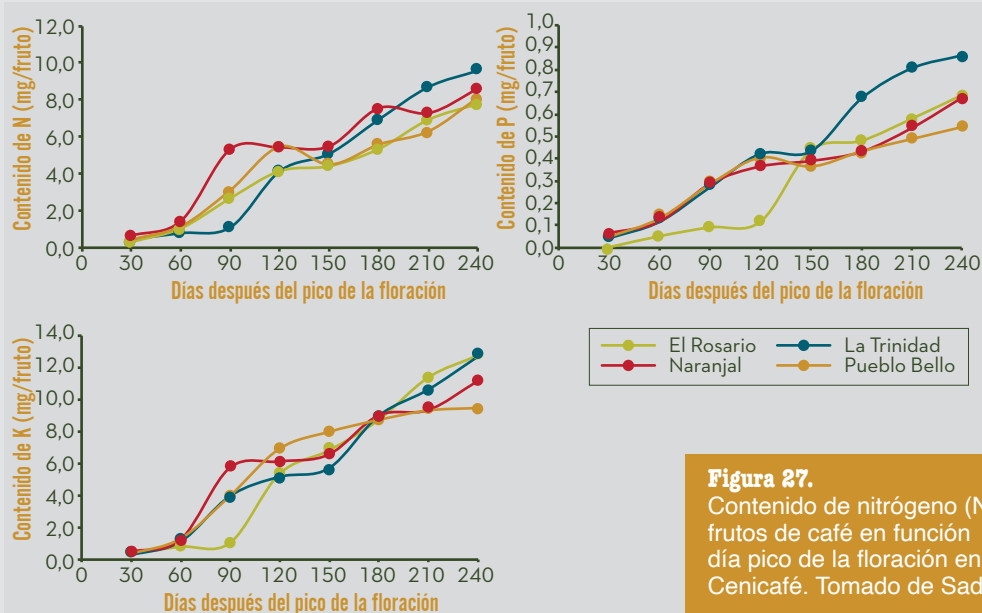


Figura 27. Contenido de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en los frutos de café en función del tiempo transcurrido después del día pico de la floración en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé. Tomado de Sadeghian et al. (2012).

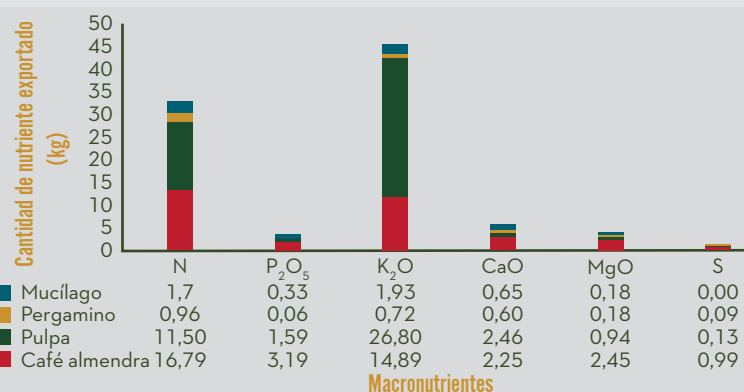


Figura 28. Cantidad de macronutrientes removidos por 1.000 kg de café almendra, según las partes que componen el fruto de café. Tomado de Sadeghian et al. (2006).

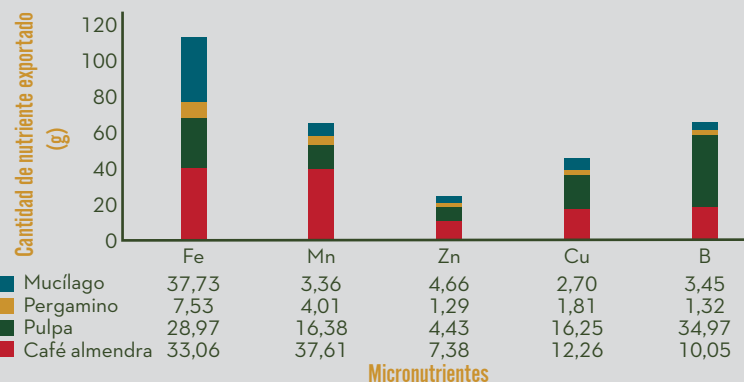


Figura 29. Cantidad de micronutrientes removidos por 1.000 kg de café almendra, según las partes que componen el fruto de café. Tomado de Sadeghian et al. (2006).

Tabla 25.

Cantidad acumulada de nutrientes (mínimo, máximo y promedio) en el fruto de café 240 días después del día pico de la floración. Valores promedio de cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé. Tomado de Sadeghian et al. (2012; 2013) y Sadeghian y Salamanca (2015).

Nutriente	Unidad	Cantidad acumulada de nutriente		
		Mínimo	Máximo	Promedio
Nitrógeno (N)	mg/fruto	7,78	9,61	8,54
Fósforo (P)	mg/fruto	0,54	0,87	0,71
Potasio (K)	mg/fruto	9,45	12,78	11,52
Calcio (Ca)	mg/fruto	0,84	1,10	0,96
Magnesio (Mg)	mg/fruto	0,37	0,46	0,41
Azufre (S)	mg/fruto	0,23	0,25	0,24
Hierro (Fe)	µg/fruto	7,87	13,97	11,78
Manganeso (Mn)	µg/fruto	14,07	34,45	27,42
Cobre (Cu)	µg/fruto	3,99	6,73	5,59
Zinc (Zn)	µg/fruto	2,76	3,33	3,03
Boro (B)	µg/fruto	3,44	11,98	9,03

Tabla 26.

Valores promedio e intervalos de confianza-IC ($p < 0,05$) de la concentración de macronutrientes en base seca en las diferentes partes del fruto de café variedad Colombia. Tomado de Sadeghian et al. (2006).

Parte del fruto	Parámetro	N	P	K	Ca	Mg	S
		(%)					
Café almendra	Promedio	1,89	0,16	1,39	0,18	0,17	0,11
	IC±	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01
Pergamino	Promedio	0,43	0,01	0,27	0,19	0,05	0,04
	IC±	0,03	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01
Pulpa	Promedio	1,71	0,10	3,30	0,26	0,08	0,02
	IC±	0,07	0,01	0,31	0,03	0,01	0,00
Mucilago	Promedio	1,36	0,12	1,28	0,37	0,09	0,00
	IC±	0,18	0,04	0,28	0,09	0,02	0,00

Tabla 27.

Valores promedio e intervalos de confianza-IC ($p < 0,05$) de la concentración de micronutrientes en base seca en las diferentes partes del fruto de café variedad Colombia. Tomado de Sadeghian et al. (2006).

Parte del fruto	Parámetro	Fe	Mn	Zn	Cu	B
		(mg kg ⁻¹)				
Café almendra	Promedio	37,15	42,25	8,29	13,78	11,29
	IC±	1,80	2,41	0,31	0,36	0,54
Pergamino	Promedio	33,47	17,81	5,74	8,06	5,87
	IC±	2,42	1,29	0,87	0,69	0,42
Pulpa	Promedio	42,98	24,30	6,58	24,10	51,87
	IC±	11,68	6,37	2,43	8,93	10,39
Mucilago	Promedio	301,87	26,91	37,26	21,63	27,59
	IC±	58,44	2,62	7,00	3,85	4,97

Tabla 28.

Concentraciones de nutrientes en diferentes muestras de café cereza, correspondientes a los departamentos del Quindío (Estación Experimental Paraguaicito) y Santander (Estación Experimental Santander). Tomado de Sadeghian et al. (2006).

Estación Experimental	Muestra	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Zn	Cu	B
		(%)						(mg kg ⁻¹)				
Paraguaicito	1	1,47	0,14	2,23	0,28	0,11	0,11	29	36	4	6	14
	2	1,47	0,10	2,00	0,31	0,12	0,06	27	36	4	3	16
	3	1,41	0,12	2,22	0,31	0,12	0,08	27	37	5	4	14
	4	1,48	0,10	2,15	0,36	0,11	0,08	23	51	4	4	16
	Promedio	1,46	0,12	2,15	0,32	0,12	0,08	27	40	4	4	15
San Antonio	1	1,01	0,10	2,43	0,24	0,09	0,11	35	22	6	10	9
	2	1,10	0,10	1,98	0,28	0,10	0,11	39	32	5	7	7
	3	1,38	0,12	2,26	0,23	0,11	0,11	30	15	6	6	5
	4	1,34	0,10	2,31	0,32	0,07	0,06	34	24	7	8	8
	5	1,20	0,12	2,18	0,32	0,11	0,05	31	36	6	10	8
	6	1,36	0,12	2,38	0,27	0,12	0,05	24	29	6	7	8
	Promedio	1,23	0,11	2,26	0,28	0,10	0,08	32	26	6	8	8



A photograph of a coffee plantation. In the foreground, a coffee bush is in focus, showing its dark green, glossy leaves and clusters of small, green coffee cherries. The ground is covered with dry, brown pine needles or mulch. In the background, more coffee bushes are visible, along with a line of trees and a cloudy sky. A semi-transparent yellow banner with white text is overlaid across the middle of the image.

Manejo de la acidez del suelo



En muchas de las regiones de Colombia donde se cultiva café se presentan limitaciones para el crecimiento de las plantas debido a la acidez del suelo, siendo la situación más crítica en algunas de ellas (Figura 30). La acidez tiene influencia en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, las cuales afectan el crecimiento de las raíces y, en consecuencia, la absorción de agua y nutrientes, con efectos negativos en la productividad de los cultivos.

En los suelos ácidos las concentraciones de aluminio (Al^{3+}) y manganeso (Mn^{2+}) solubles pueden alcanzar niveles que resultan tóxicos para las plantas; así mismo, se alteran las poblaciones y las actividades de los microorganismos que intervienen en la mineralización de la materia orgánica y la transformación de nitrógeno (N) y azufre (S). La disponibilidad de fósforo (P) se reduce, en razón de que forma compuestos insolubles con hierro ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$) y Al^{3+} , dejando de estar disponible para las plantas (Havlin et al., 2017).

Aunque la acidez del suelo ocurre de manera natural, se intensifica con la erosión y las prácticas culturales, particularmente la fertilización, disminuyendo de esta manera la fertilidad potencial del suelo. Los principales problemas están asociados con valores bajos del pH, toxicidad causada por Al^{3+} y Mn^{2+} , y deficiencias nutricionales, en especial calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y P.

Existen diferentes alternativas para abordar la problemática de la acidez; de ellas, la más común consiste en la adición de enmiendas, particularmente cales, práctica que se conoce como encalado o encalamiento.

Mediante el encalado se eleva el pH, se neutralizan los elementos que generan toxicidad y se proporcionan nutrientes como Ca^{2+} y Mg^{2+} . Puesto que la corrección de la acidez a través del empleo de cales propicia el crecimiento radical, se hace más eficiente la fertilización; en consecuencia, estas dos prácticas se consideran absolutamente complementarias.

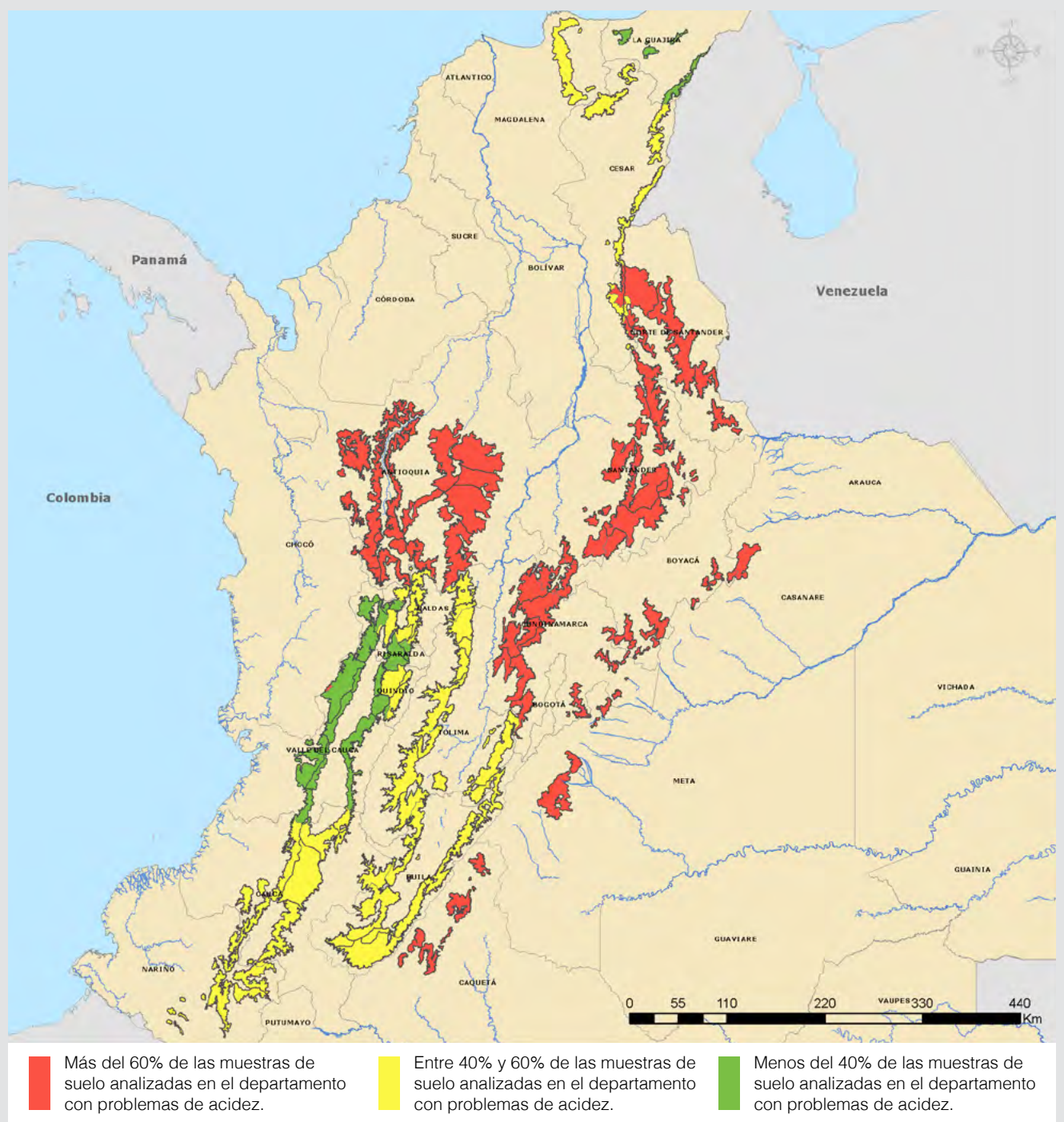
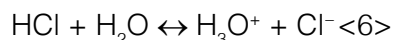


Figura 30. Condición de la acidez del suelo en la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Sadeghian (2016).

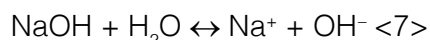
Concepto de ácido y base

Para un sistema acuoso el cual incluye al suelo, gracias al equilibrio que se establece entre la fase líquida y la fase sólida, una sustancia puede definirse como ácido o base de acuerdo con tres conceptos, postulados por Arrhenius, Brønsted-Lowry y Lewis (Zapata, 2004). Arrhenius, en 1884, definió como ácido a una sustancia que en solución acuosa produce protones (H^+ o H_3O^+), y como base a la sustancia que produce hidroxilos (OH^-). La limitación de este concepto radica en que se aplica solo a sustancias iónicas y considera que los H^+ y OH^- sólo provienen de procesos de disolución.

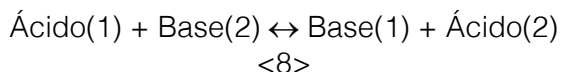
De acuerdo con Arrhenius, el ácido clorhídrico (HCl) es un ácido en razón de que libera protones en el agua, como se presenta en la Ecuación <6>.



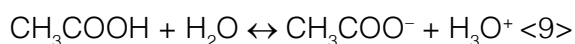
Como ejemplo de base para Arrhenius puede mencionarse al hidróxido de sodio (NaOH), sustancia que en agua se disocia, produciendo OH^- (Ecuación <7>).



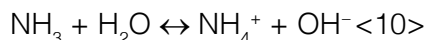
Según Brønsted y Lowry, 1923, el ácido es una especie química que en solución dona protones y la base la especie que recibe los protones. Esta definición puede representar de acuerdo con la Ecuación <8>.



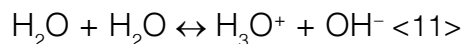
Un ejemplo de ácido, para Brønsted y Lowry, es la disociación de ácido acético en agua (Ecuación <9>).



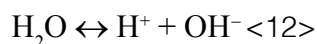
El ejemplo de base para Brønsted y Lowry es la formación de amonio (NH_4^+) y OH^- a partir de amoníaco (NH_3) (Ecuación <10>).



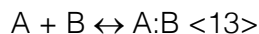
Al aplicar la definición de ácido y base de Brønsted y Lowry al agua, se obtendría la Ecuación <11>.



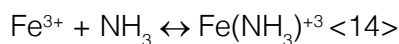
En esta reacción, una de las dos moléculas del agua actúa como ácido para donar un protón y al mismo tiempo como base para aportar hidroxilo, y la otra molécula de agua actúa como base, al aceptar el H^+ para forma H_3O^+ (Zapata, 2004). La reacción puede expresarse en la Ecuación <12> de manera simplificada.



De acuerdo con Sousa et al. (2007), el concepto planteado por Brønsted y Lowry es adecuado para comprender la acidez del suelo, definida por las reacciones de transferencias (dar y recibir protones H^+). Zapata (2004) dista del anterior criterio, pues considera que el concepto propuesto por Brønsted y Lowry es limitado en cuanto a que sólo se aplica a las sustancias que pueden ceder o aceptar protones. Por lo anterior, el concepto de Lewis para ácido y base es más amplio, pues puede aplicarse en las reacciones donde no se involucran protones ni hidroxilos. Para Lewis, un ácido es un átomo, molécula o ion que tiene un orbital vacante, no utilizado en un enlace covalente, por lo que puede aceptar un par de electrones. En el mismo sentido, una base es un átomo, molécula o ion que puede ceder un par de electrones. Lo dicho se puede representar de acuerdo con la Ecuación <13>.



Como ejemplo, en la reacción (Ecuación <14>).



El Fe^{3+} es un ácido, según Lewis, y el NH_3 es una base, y forman el complejo $Fe(NH_3)^{3+}$.

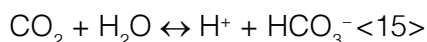


El origen de la acidez del suelo

Son diversas las causas asociadas a la acidez de los suelos, algunas ocurren de manera natural y otras se generan con las actividades antrópicas. Cuando las lluvias son elevadas, se intensifican los procesos de acidificación, debido a la pérdida de las bases intercambiables Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} por lavado (lixiviación), y su reemplazo por otros cationes de carácter ácido (principalmente Al^{3+}). La anterior condición se torna más crítica cuando los materiales que dan origen al suelo contienen bajos contenidos de bases intercambiables. Son ejemplo de ello los suelos dedicados al cultivo de café en los departamentos de Meta, Casanare y Caquetá. Una situación diferente ocurre en la zona cafetera del Valle del Cauca y parte de Risaralda (Figura 30).

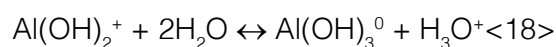
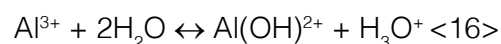
Otras causas de la acidificación de los suelos tienen que ver con la erosión, la meteorización de los minerales primarios, la descomposición de la materia orgánica, la oxidación del azufre, la nitrificación del amonio (NH_4^{+}) y la liberación de H^{+} por las raíces cuando absorben Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} . Adicionalmente, los aniones nitrato (NO_3^{-}), sulfato (SO_4^{-2}) y cloruro (Cl^{-}) que proceden de los fertilizantes orgánicos e inorgánicos se unen a las bases intercambiables de la solución del suelo y los arrastran más allá del alcance de las raíces, utilizando como vehículo el agua (Zapata, 2004, Foth & Ellis, 1997, Sousa et al., 2007).

Una vez que el dióxido de carbono (CO_2) del aire entra en contacto con el agua, se disocia según la siguiente reacción (Ecuación <15>):

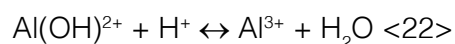


El H^{+} libre reacciona con los componentes del suelo y llega a ocupar sitios en el complejo de cambio, y el bicarbonato (HCO_3^{-}), puede unirse a los cationes de la solución para formar pares iónicos que se lixivian si la lluvia excede la evaporación. De acuerdo con Caires (2010), esta reacción es más importante en suelos con pH mayores de 5,2.

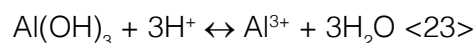
La remoción de los cationes de naturaleza básica del suelo por lixiviación, la erosión y la absorción por las raíces, están acompañadas del aumento de las formas intercambiables de H^{+} y Al^{3+} en el complejo de cambio y, en consecuencia, en la solución del suelo. El Al^{3+} presente en la solución sufre hidrólisis, generando mayor acidez, conforme se muestran las reacciones de las Ecuaciones <16>, <17>, <18> y <19> (Sousa et al., 2007):



Con la reducción del pH, se generan más aluminios trivalentes (Al^{3+}), los cuales se pasan a la fase de cambio, desplazando a las bases. Foth y Ellis (1997) describen la secuencia de las reacciones de protonación que ocurren con el incremento de la acidificación del suelo de la siguiente manera (Ecuaciones <20>, <21>, <22> y <23>):

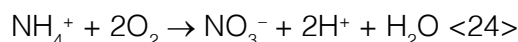


en resumen



Las anteriores secuencias de reacciones se convierten en un ciclo, en el que el Al^{3+} genera más acidez (H_3O^{+} o H^{+}) en presencia de agua y, al incrementar la acidez, se genera más Al^{3+} .

Durante la nitrificación, paso del ion amonio (NH_4^{+}) a nitrato (NO_3^{-}), realizada por bacterias de géneros *Nitrobacter* y *Nitrosomonas*, por cada NH_4^{+} se liberan dos H^{+} (Ecuación <24>).



La nitrificación es uno de los procesos más importantes en la acidificación de los suelos. Aunque esta sucede de manera natural en las fases finales de la mineralización de la materia orgánica del suelo y de los residuos orgánicos, su ocurrencia aumenta por la adición de fertilizantes amoniacales o aquellos que conllevan a la formación de este compuesto, por ejemplo, sulfato de amonio, nitrato de amonio y urea (Raij, 2011).

La acidez que generan los fertilizantes nitrogenados depende de la fuente de estos (Tabla 29); es así como el efecto acidificante de una unidad de N procedente de sulfato de amonio (SAM) y fosfato monoamónico (MAP) es dos veces más que la proporcionada por la urea y el nitrato de amonio; por lo tanto, se requiere de una mayor cantidad de cal expresada como carbonato de calcio (CaCO_3), para su neutralización. Adicionalmente, los fertilizantes compuestos, tanto los complejos granulados como aquellos que se obtienen mediante mezclas físicas, también generan acidez. Los primeros por contener en su formulación amonio y los últimos en razón de contener urea, DAP, MAP u otra fuente que contenga o genere amonio. Lo anterior se corroboró al comparar el efecto de dosis crecientes de urea frente al nitrato de amonio en la acidificación de un Andisol de la zona cafetera central de Colombia (Figura 31). La reducción en el pH, generada por la aplicación continuada de los fertilizantes

durante cuatro años, fue estadísticamente igual para las dos fuentes.

En una investigación conducida por Valencia et al. (1975), se corroboró el efecto acidificante de algunas fuentes de N en tres suelos de la zona cafetera de Colombia (Tabla 30). Los mayores incrementos de Al, Fe y Mn se registraron con el uso de sulfato de amonio, seguido por el nitrato de amonio y el fertilizante compuesto, resultado que afectó negativamente el crecimiento de las plantas. En este estudio se encontró que es posible contrarrestar la acidez generada por la urea mediante el uso de la cal e incrementar los contenidos de Ca y Mg intercambiables. De acuerdo con los resultados obtenidos se sugiere la aplicación de la cal para corregir la acidez del suelo, haciendo la salvedad en que el uso de la enmienda debe restringirse a suelos con valores de pH menores de 5,5.

La Figura 32 ilustra el efecto acidificante de dosis crecientes de N en las propiedades químicas del suelo, luego de cuatro años de aplicaciones de este nutriente. Con el suministro de 300 kg ha año^{-1} de N el pH se redujo 0,27 unidades, el Ca^{2+} 1,43 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, el Mg^{2+} 0,10 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y el K^+ 0,14 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, mientras que el Al^{3+} se incrementó en 0,46 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, pasando su participación en el complejo de cambio (saturación de aluminio) de 14% a 31%. Con respecto a la capacidad efectiva del suelo para el almacenamiento de cationes, CICE, disminuyó en 25%.

Tabla 29.
Acidez del suelo producida por los fertilizantes nitrogenados. Tomado de Havlin et al. (2017).

Fuente de fertilizante	Contenido de N (%)	Mol de H^+ por mol de N	CaCO_3 Equivalente ¹
Urea	46	1	3,6
Nitrato de amonio	34	1	3,6
Sulfato de amonio	21	2	7,2
Fosfato monoamónico	12	2	7,2
Fosfato diamónico	18	1,5	5,4

¹ Representa las libras de CaCO_3 necesarias para neutralizar la acidez que se genera por cada libra de N aplicado vía fertilizante.



Figura 31. Cambios en el pH, en respuesta a dosis de nitrato de amonio y urea. Información de la Disciplina de Suelos de Cenicafé, sin publicar.

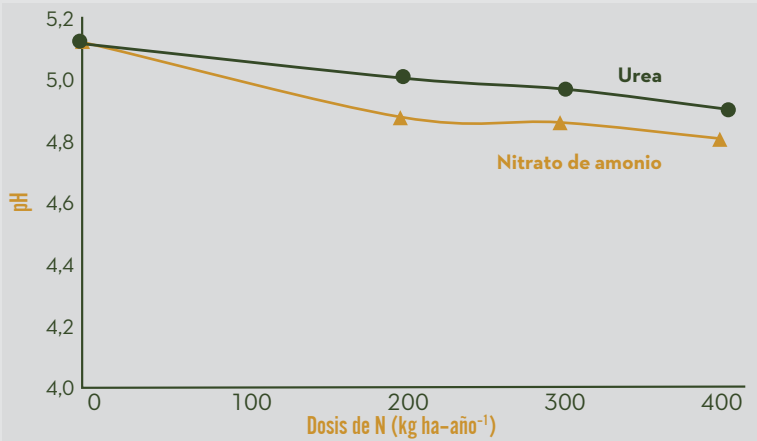


Tabla 30. Efecto de portadores de nitrógeno en las propiedades del suelo y la biomasa de café, en tres suelos de la zona cafetera de Colombia (Valencia et al., 1975).

Tratamiento	pH	Al	Ca	Mg	K	Fe	Mn	Biomasa fresca
		(cmol _c kg ⁻¹)			(mg kg ⁻¹)		(g/planta)	
Naranjal								
Testigo	5,5	0,20	5,6	1,2	1,20	171	16	30,3
Urea+Cal	5,5	0,05	16,7	0,5	0,06	175	34	76,8
12-12-17-2	4,5	1,30	3,5	0,7	0,80	318	31	101,8
Sulfato de amonio	3,7	4,60	0,5	0,1	0,04	365	12	16,8
Nitrato de amonio	3,9	2,00	0,6	0,1	0,04	300	18	33
Fundación Manuel Mejía								
Testigo	4,8	1,90	0,5	0,2	0,04	205	7	26
Urea+Cal	5,5	0,05	19,7	0,7	0,07	170	41	103,1
12-12-17-2	4,2	1,40	3,7	0,9	1,00	305	28	147,8
Sulfato de amonio	3,6	6,90	0,5	0,1	0,30	440	7	16,8
Nitrato de amonio	3,7	3,50	0,4	0,1	0,30	315	9	27,4
Piamonte								
Testigo	5,0	6,60	2,4	0,8	0,2	305	80	39,7
Urea+Cal	5,5	0,10	26,0	0,9	0,2	310	93	52,6
12-12-17-2	4,0	3,70	3,4	1,0	2,7	781	83	42,4
Sulfato de amonio	3,5	9,50	0,7	0,2	0,1	1076	69	25,8
Nitrato de amonio	3,2	9,80	0,5	0,3	0,1	729	60	31,5

Naranjal: cenizas volcánicas y textura franca. Fundación Manuel Mejía: cenizas volcánicas y textura franco arenosa. Piamonte: arcillolítica y textura arcillosa.

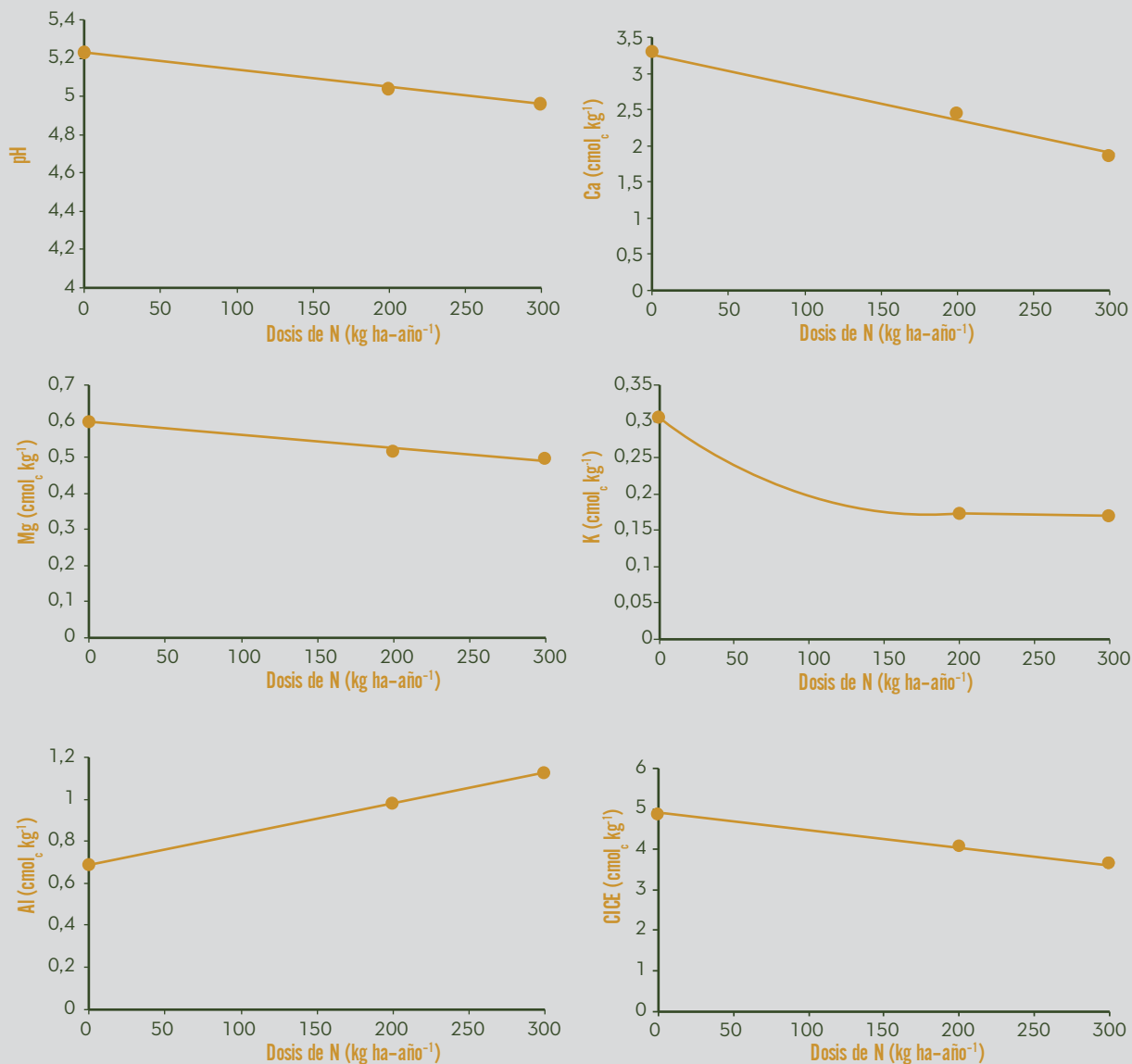


Figura 32.

Cambios en las propiedades químicas del suelo en respuesta a la fertilización nitrogenada (valores promedio de urea y nitrato de amonio) en la Estación Experimental La Trinidad (Líbano, Tolima). Tomado de Sadeghian (2016).

Medición de la acidez

La acidez del suelo puede medirse de las siguientes formas (Sousa et al., 2007):

- I. **Acidez activa.** Se refiere a la actividad de H^+ (o H_3O^+) en la solución del suelo, valorada mediante el pH.
- II. **Acidez intercambiabile.** Está representada, en su gran mayoría, por el Al^{3+} retenido en las cargas negativas de los coloides del suelo, mediante fuerzas electroestáticas. También puede incluir otros cationes de hidrólisis ácida como H^+ , Mn^{2+} y Fe^{2+}/Fe^{3+} , aunque en menor proporción.
- III. **Acidez no intercambiabile.** Hace referencia, principalmente, al H asociado mediante enlaces covalentes a las aristas de las arcillas y la materia orgánica (en su mayoría los grupos fenólicos). Este H no es intercambiabile, pero al aumentar el pH se incrementa la cantidad de cargas negativas por la liberación de los protones. Se calcula por la diferencia entre la acidez potencial y la intercambiabile.
- IV. **Acidez potencial.** Se refiere a las cantidades de formas intercambiabile y no intercambiabile de hidrógeno y aluminio.

La propiedad química del suelo por excelencia para valorar la acidez activa del suelo es el pH, la cual expresa la **actividad** de H^+ en una solución. El término actividad hace referencia a la concentración de iones H^+ libres en la solución y, dado que los valores de H^+ son relativamente bajos, se presentan en términos logarítmicos través de la Ecuación <25>.

$$pH = \log_{10} \frac{1}{(H^+)} = -\log (H^+) \quad <25>$$

En la escala del pH, la cual va de 0 a 14, un valor de 7,0 indica condiciones de neutralidad, es decir, igual número de H^+ y OH^- en la solución. A medida que se

incrementan los iones H^+ , el suelo se hace más ácido y el valor del pH disminuye; en contraste, con el aumento de la concentración de iones OH^- en la solución, el suelo se hace más básico y el valor del pH se incrementa.

A pH 7,0 la concentración molar de H^+ en la solución es 10^{-7} (0,0000001 mol de H^+ por litro), el inverso del 10^{-7} es 10.000.000 y el $\log_{10} 10.000.000 = 7,0$. Puesto que la escala del pH es logarítmica, el aumento o la reducción en una unidad representa diez veces más o menos H^+ ; por lo tanto, un suelo con pH = 6,0 tiene 10 veces más H^+ que un suelo con pH = 7,0; un suelo con pH = 5,0 tiene 100 veces más H^+ que un suelo con pH = 7,0 y un suelo con pH = 4,0 tiene 1.000 veces más H^+ que un suelo con pH = 7,0.

Relación entre el pH del suelo y los cationes intercambiabile

La cantidad de Al^{3+} , Ca^{2+} y Mg^{2+} en la fase intercambiabile, así como la CICE y los porcentajes de saturación de Al^{3+} y de bases de cambio, guardan una relación estrecha con la acidez activa del suelo (Figura 33). Cuando el pH es menor que 5,0, se espera que los niveles de Al^{3+} estén por encima de 1,0 cmol_c kg⁻¹ y para valores de pH mayores a 5,0 por debajo de este valor; si el pH es 5,5 o más, se considera inexistente la forma Al^{3+} , razón por la cual los laboratorios normalmente no lo determinan analíticamente.

Conforme al aumento del pH, por ejemplo, en respuesta al encalamiento, se incrementan los niveles de Ca^{2+} , Mg^{2+} y, eventualmente, K^+ , resultado que se refleja en el porcentaje de la saturación de las bases intercambiabile con respecto a la CIC. Adicionalmente, la mayoría de los suelos de la zona cafetera son de carga variable o carga dependiente del pH; lo cual quiere decir que el incremento del pH

se traduce en el aumento de la CICE. Este fenómeno tiene implicaciones considerables en la fertilidad del suelo y la eficiencia de la fertilización, pues entre más ácido el suelo habrá menor CICE (disminución en la capacidad para retener o almacenar cationes), más Al^{3+} ocupando los sitios de intercambio, menos participación de las bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+}) en la CICE y más susceptibilidad de estos para perderse por lavado.

El anterior mecanismo, considerado de suma importancia para la conservación de las bases intercambiables (Sadeghian et al., 2015; Sadeghian, 2016), se corroboró para el K, empleando un Oxisol de la zona cafetera del departamento del Meta, Colombia. Inicialmente se incubó el suelo durante dos meses con cuatro dosis de dolomita (0; 2,5; 5,0 y 10,0 g dm^{-3} de suelo), procedimiento que aumentó el pH y la CICE (Figura 34). Posteriormente, mediante la técnica de isotermas de adsorción, se aplicó a cada tratamiento de cal cuatro concentraciones de K (0, 25, 50 y 100 mg L^{-1}) y se midieron los cambios de este elemento en la fase intercambiable (Figura 35). Pudo corroborarse que los incrementos del pH, generados por la aplicación de la cal, contribuyen a una mayor retención de K.

Dos de las propiedades importantes del suelo relacionadas con la acidez son el poder tampón o búfer y la resiliencia. La primera tiene que ver con la resistencia que el suelo exhibe para dejar modificar alguna propiedad química y la segunda hace referencia a la capacidad que este tiene para recuperar su estado inicial luego de haber cesado la acción de un agente al que había estado sometido. Entre los factores que determinan el poder de tampón se encuentran el material parental, el contenido y tipo de arcilla, el contenido de la materia orgánica y la presencia de óxidos e hidróxidos de Fe y Al (Fassbender, 1987). Un ejemplo de la resiliencia fue observado en una investigación desarrollada por dos años en 41 lotes cafeteros (11 departamentos); en donde, el pH del suelo tuvo un incremento promedio de 0,29 unidades cuando se dejó de aplicar N (240 kg ha $^{-1}$ año $^{-1}$) (Sadeghian, 2003).

Implicaciones de la acidez en el crecimiento del café

Ante condiciones de acidez ($\text{pH} < 5,0$ y $\text{Al}^{3+} > 1,0$) se afecta el crecimiento normal de las raíces del café; condición que reduce la absorción de los nutrientes y el desarrollo de la parte aérea de la planta (Figura 36). Se ha demostrado que, en los suelos derivados de cenizas volcánicas de Colombia, caracterizados por ser ricos en materia orgánica, la concentración de Al^{3+} en la solución es baja (Ortiz et al., 2004), lo cual explica la poca probabilidad de encontrar sintomatologías de su toxicidad; sin que ello no implique reducción en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

La acidez del suelo afecta el crecimiento del café en todas las etapas del cultivo. Cuando el suelo es ácido para el café, la planta crece menos; lo mismo ocurre si la reacción del suelo se torna más alcalina (pH mayor de 5,5). Ejemplos de lo anterior se muestran para la etapa de almácigo (Figura 37) y en el establecimiento de los cafetales (Figura 38).

Manejo de la acidez del suelo

Son diversas las estrategias para enfrentar los problemas de acidez, entre las que se encuentra, disponer de genotipos tolerantes, el uso de microorganismos (por ejemplo, las micorrizas ayudan a las plantas en la absorción de fósforo), aumentar el contenido de la materia orgánica del suelo, controlar la erosión, aplicar abonos orgánicos y el empleo de enmiendas inorgánicas.

Entre estas estrategias, la más divulgada, y quizá la de mayor efectividad, es el manejo de la acidez del suelo mediante la aplicación de cales (productos clasificados entre las

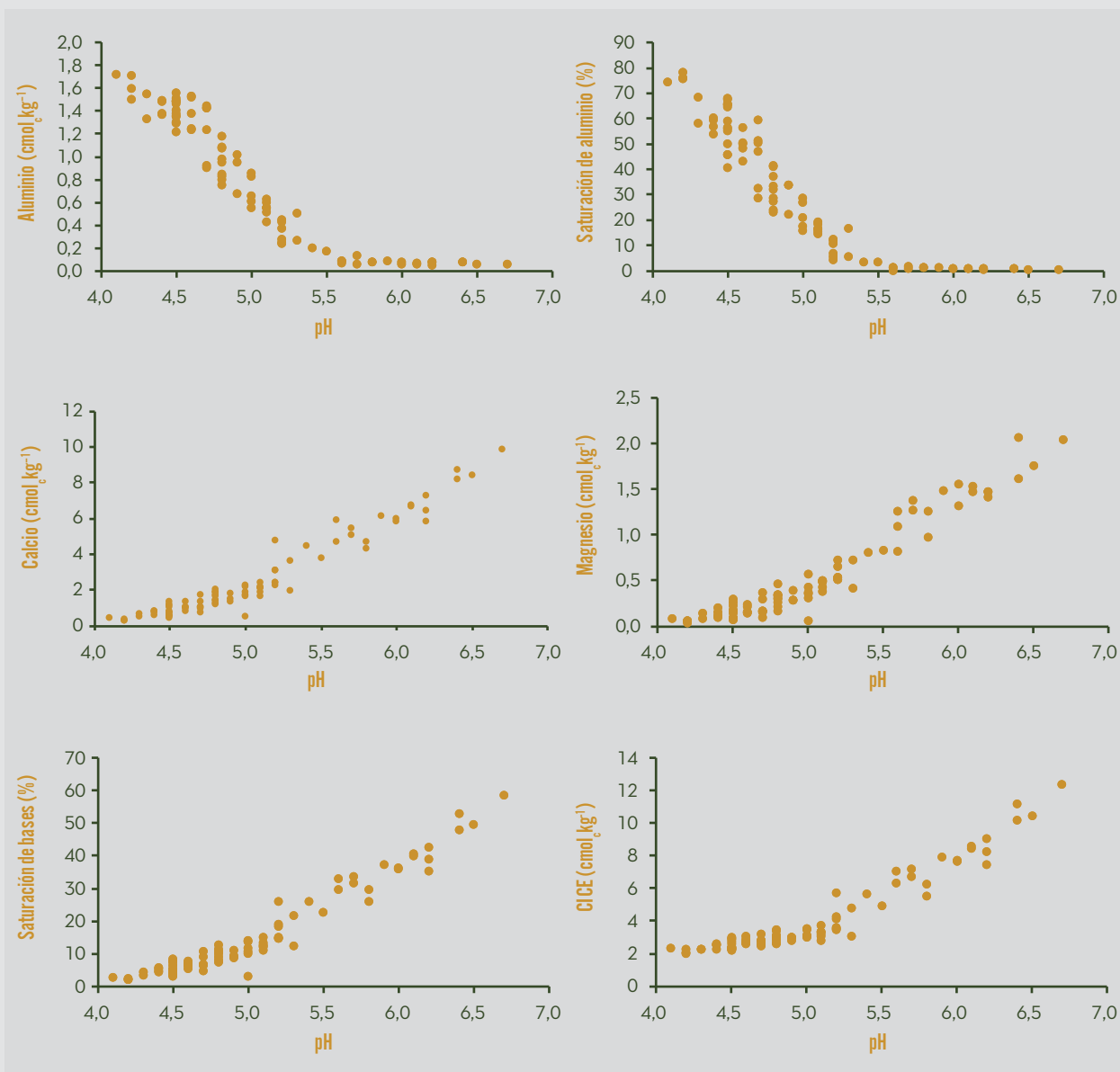


Figura 33. Contenidos de Al, Ca, Mg intercambiables y CICE en función del pH en un Andisol de la zona cafetera de Colombia.

enmiendas inorgánicas), principalmente carbonatos de calcio (CaCO_3) y/o de magnesio (MgCO_3); esto sin descartar otros materiales encalantes como óxidos e hidróxidos. En cuanto a los silicatos, su efecto no es del todo claro, pues a pesar de la divulgación por parte de las casas comerciales, los resultados de los análisis de laboratorio hasta ahora no indican ventajas frente a los carbonatos (Díaz-Poveda y Sadeghian, 2020).

Los efectos del encalado van más allá de reducir la acidez (Figura 39). Malavolta (1993) cita algunos de estos:

- ♦ Elimina la toxicidad de aluminio y de manganeso.
- ♦ Proporciona calcio y magnesio.
- ♦ Incrementa la actividad de los microorganismos encargados de la mineralización de la materia orgánica del suelo y, en razón de ello, aumenta la disponibilidad de nitrógeno, fósforo, azufre y boro, entre otros.
- ♦ Incrementa la actividad de las bacterias que fijan el N atmosférico.
- ♦ Mejora la eficiencia de los abonos, en particular los nitrogenados, potásicos y fosfóricos.
- ♦ Contribuye al aumento de la productividad y reduce los costos de producción.
- ♦ Debido a su efecto prolongado (dos a cuatro años), el encalamiento es “una verdadera inversión”.

Como se ilustra a continuación, los carbonatos de calcio y magnesio, en presencia de agua, reaccionan liberando iones hidroxilo y bicarbonato (OH^- y HCO_3^- , respectivamente) que son los receptores de protones (H^+), los cuales neutralizan la acidez. El ion OH^- se une al H^+ para formar agua y el HCO_3^- reacciona con el H^+ para formar CO_2 y H_2O (Ecuaciones <26>, <27>, <28> y <29>).

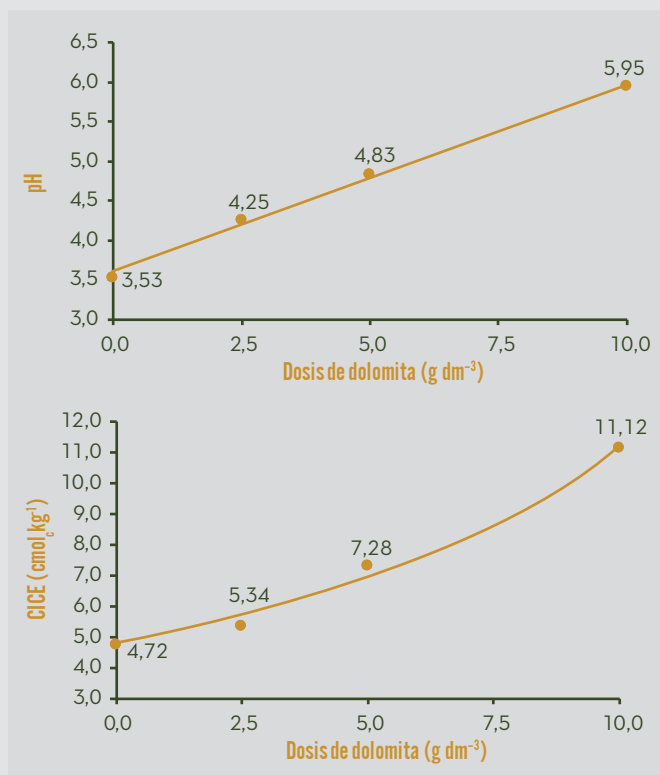


Figura 34.

Cambios en el pH y la CICE en respuesta al encalado en un Oxisol de la zona cafetera del departamento del Meta.

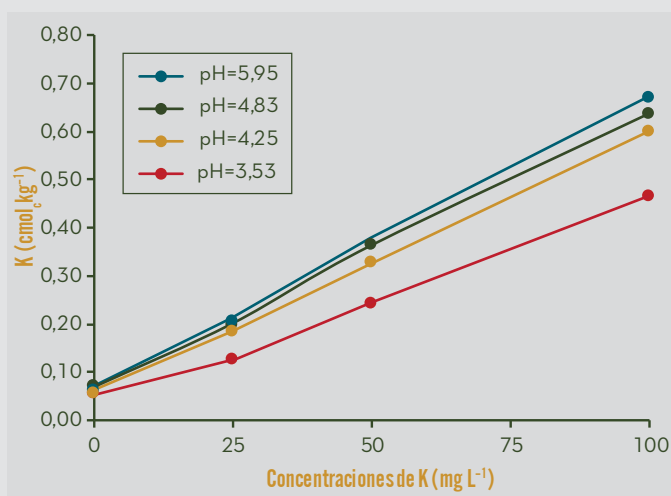
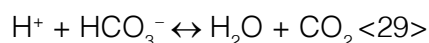
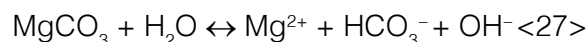
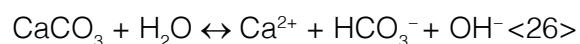


Figura 35.

Adsorción de K^+ en la fase intercambiable en un Oxisol de la zona cafetera del Meta, en respuesta a variaciones del pH y concentraciones de potasio.

Figura 36.

Síntomas de toxicidad por aluminio en la parte aérea (izquierda) y en las raíces (derecha) de café. Tomado de Sadeghian (2016).



Adicionalmente, los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} procedentes de las enmiendas desplazan a cationes con carácter ácido (H^+ y Al^{3+}) del complejo de cambio; posteriormente, el Al^{3+} se une con tres hidroxilos (OH^-) y se precipita como $\text{Al}(\text{OH})_3$, forma en la cual no es tóxico para las plantas (Caires, 2010).

En ocasiones se tiene la creencia de que la acidez se corrige por la aplicación de calcio, lo cual es incorrecto. En los materiales encalantes son los iones hidroxilo (OH^-) y bicarbonato (HCO_3^-), generados en la reacción, los que ejercen esta función y no el calcio. Después de la aplicación de la cal al suelo, el anión CO_3^{2-} , considerado una base fuerte, es el principal responsable por la hidrólisis del agua y la formación del ion OH^- , el cual neutralizará la acidez activa (H^+) del suelo. Fertilizantes como el nitrato de calcio no modifican el pH ni controlan el aluminio intercambiable. Diferentes estudios sugieren que el yeso agrícola (sulfato de calcio dihidratado— $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), además de proporcionar Ca y S, puede neutralizar el Al^{3+} , sin que se modifique el pH del suelo. Un primer paso de una serie de reacciones que se involucran en este proceso

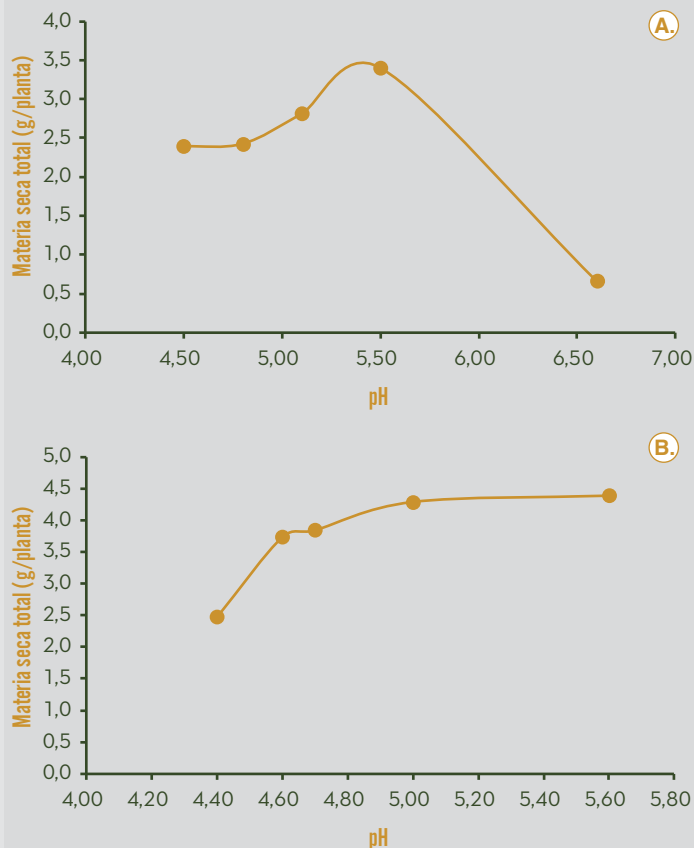


Figura 37.

Materia seca del café durante la etapa de almácigo en respuesta a los cambios del pH en un Inceptisol (A.) y Andisol (B.) de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Sadeghian y Díaz-Marín (2020B).

consiste en la disociación de CaSO_4 en Ca^{2+} y SO_4^{2-} , posteriormente, el Ca^{2+} desplaza al Al^{3+} en el complejo de cambio y el SO_4^{2-} se une con el Al^{3+} para formar AlSO_4^+ , ion que no es tóxico para las plantas; adicionalmente, el Al^{3+} puede precipitarse como oxi-hidróxido. Cabe aclarar que la incapacidad del yeso para neutralizar la acidez activa se debe a que el anión SO_4^{2-} es una base débil y no posee el poder para disociar el agua y producir OH^- (Sousa et al., 2007).

Durante los últimos años el empleo de yeso para el manejo de la acidez se ha masificado en países como Brasil, especialmente para el control del Al^{3+} en profundidades mayores a las que alcanza el efecto de la cal (por debajo de los 20 a 30 cm). Para las condiciones de Colombia, donde se cuenta con poca información sobre el tema, se ha demostrado que la aplicación continuada y superficial de bajas dosis de yeso en café (hasta 350 kg ha-año⁻¹) puede reducir el Al^{3+} en la fase de cambio (González & Sadeghian, 2006).

En una investigación, desarrollada con tres suelos de la zona cafetera de Colombia, se determinó el efecto de la incorporación de dosis altas de yeso (5 y 15 g dm⁻³,

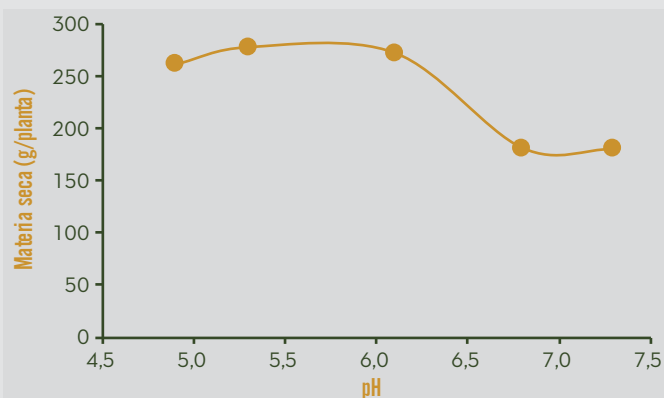


Figura 38.

Materia seca de café durante la fase de establecimiento en respuesta a las variaciones del pH del suelo. Adaptado de Suárez de C. y Rodríguez (1956).

equivalentes a 10 y 30 t ha⁻¹, estimación realizada para una profundidad de 20 cm) en las propiedades químicas del suelo (Sadeghian, 2012). Con el uso de la enmienda se detectaron incrementos en la conductividad eléctrica y los contenidos de Ca^{2+} , entre tanto, los valores del pH y Al^{3+} permanecieron sin cambios significativos

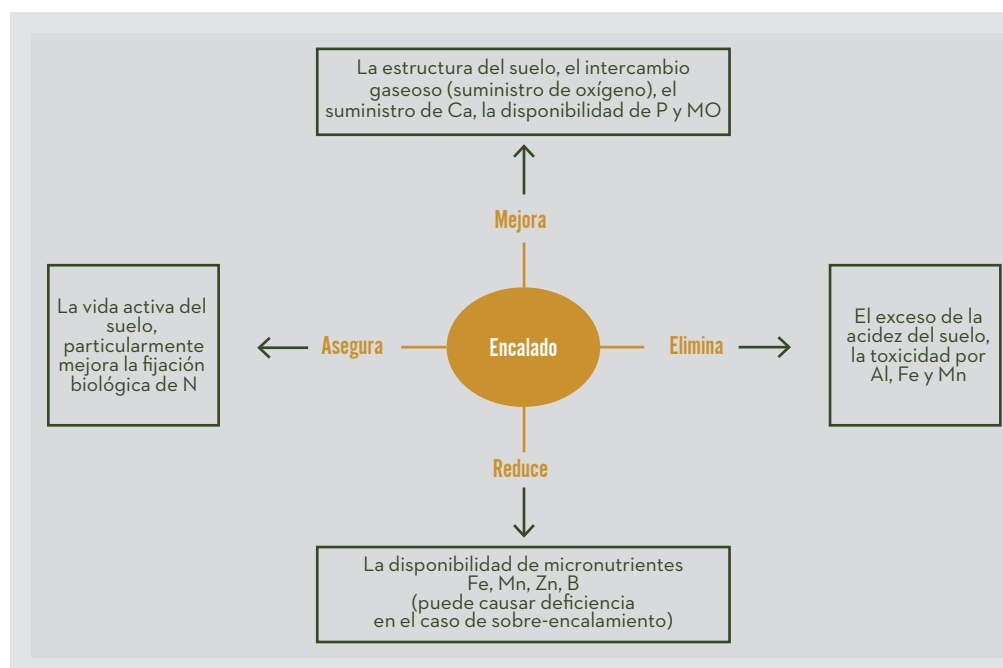


Figura 39.

Efecto del encalado en las propiedades del suelo. Tomado de Roy et al. (2006).

(Tabla 31). La presencia de Al^{3+} intercambiable, luego de la aplicación de yeso, puede relacionarse con imprecisiones de la metodología analítica del laboratorio, pues como lo indican Ortiz et al. (2004), se estarían extrayendo del suelo otras formas del elemento diferentes a la intercambiable; por ejemplo, las formas precipitadas de Al con el ion sulfato procedente del yeso.

En la actualidad la recomendación del yeso en Colombia va dirigida al aporte de Ca y S antes que a la neutralización de la acidez; en conformidad con lo anterior se recomiendan dosis equivalentes a 350 kg ha-año⁻¹, aplicados superficialmente (Sadeghian, 2008a).

Calidad de las enmiendas

De acuerdo con su composición química, pureza, finura de las partículas y contenido de humedad, los materiales encalantes varían en su eficiencia para neutralizar la acidez y proporcionar nutrientes.

Humedad (H)

Se refiere a la cantidad de agua contenida en el material y se expresa en porcentaje. Son preferibles productos con contenidos de humedad menor de 2%.

Poder de neutralización (PN)

Este parámetro, valorado analíticamente en el laboratorio, hace referencia a la capacidad potencial o teórica de un correctivo para neutralizar la acidez de los suelos. El método consta de dos fases, en la primera reacciona una muestra del producto con suficiente ácido clorhídrico y, en la segunda fase, se mide el ácido remanente; posteriormente, por diferencia, se calcula la cantidad del ácido neutralizado por el correctivo. El PN de una enmienda depende tanto del contenido de neutralizantes presentes como de su naturaleza química. Cada material neutralizante, carbonatos, óxidos e hidróxidos de Ca y Mg, tiene una determinada capacidad de neutralización (Tabla 32), la cual se expresa en relación con la capacidad de CaCO_3 (cal agrícola), tomado como referente. Por ejemplo, 100 kg de óxido de calcio (CaO)

Tabla 31. Valores promedio y desviación estándar (D.E.) de las propiedades químicas del suelo, en respuesta a la aplicación de yeso en tres unidades cartográficas de suelos de la zona cafetera de Colombia. Tomado de Sadeghian (2012).

Dosis de yeso (t ha ⁻¹) [*]	C.E. (dS m ⁻¹)		pH		Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)		Al ³⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.
Unidad Chinchiná								
0	1,54	0,40	3,90	0,18	1,43	0,28	2,55	0,30
10	2,01	0,12	4,13	0,05	10,45	1,77	2,33	0,17
30	2,07	0,10	4,08	0,05	26,63	3,98	2,50	0,22
Unidad Timbío								
0	1,01	0,03	4,40	0,08	4,48	0,28	1,38	0,10
10	1,37	0,03	4,38	0,05	10,30	0,88	1,25	0,24
30	1,60	0,04	4,43	0,05	31,35	15,17	1,53	0,13
Unidad Doscientos								
0	0,88	0,18	4,63	0,05	8,20	0,37	0,75	0,06
10	1,66	0,16	4,68	0,17	14,25	0,91	0,50	0,16
30	1,70	0,14	4,60	0,08	28,30	5,23	0,58	0,10

Dosis equivalentes a 0, 1 y 3 g dm⁻³ de Ca.

tienen una acción equivalente a 179 kg de CaCO_3 y 100 kg de dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) una acción equivalente a 108 kg de CaCO_3 .

Equivalente químico (EQ)

También conocido como valor de neutralización (VN), permite conocer la capacidad que tiene una cal, expresada en porcentaje equivalente de CaCO_3 , para neutralizar la acidez activa (H^+) del suelo a partir de sus contenidos de Ca y Mg. Es importante aclarar que este parámetro puede aplicarse sólo a los materiales que tienen poder para aumentar el pH, específicamente óxidos, hidróxidos y carbonatos; por lo tanto, no tiene sentido calcular el EQ para enmiendas como el yeso agrícola o mezcla de productos que carecen de poder para neutralizar la acidez activa.

El EQ puede expresarse como óxidos o carbonatos de Ca y Mg (Ecuaciones <30> y <31>).

$$\text{EQ CaCO}_3 = \text{CaO (\%)} \times 1,79 + \text{MgO (\%)} \times 2,48 \text{ <30>}$$

$$\text{EQ CaCO}_3 = \text{CaCO}_3 (\%) \times 1,0 + \text{MgCO}_3 (\%) \times 1,19 \text{ <31>}$$

Eficiencia granulométrica (EG)

Por su naturaleza, los materiales encalantes son de baja solubilidad; por ejemplo, para el CaCO_3 la solubilidad es de $0,014 \text{ g L}^{-1}$ a 25°C

y para MgCO_3 de $0,106 \text{ g L}^{-1}$ a 25°C (Alcarde, 1992). En razón de ello, es necesario que las partículas que los componen sean finas, así tendrán una mayor superficie específica y más área de contacto para reaccionar y neutralizar la acidez. Lo anterior tiene relación con la granulometría de las partículas, propiedad que determina la velocidad de reacción de un material, y se estima a través del parámetro conocido como la Eficiencia Granulométrica (EG). La distribución porcentual del tamaño de las partículas de las enmiendas se determina pasando el material por tamices con diferentes aperturas; en este sentido, la unidad comúnmente empleada es mesh, la cual se refiere al número de orificios por pulgada. Las partículas retenidas en una malla con orificios de 2,36 mm (mesh<8) presentan una Eficiencia Relativa (ER) de cero, sin efecto residual para la corrección de la acidez, mientras que las partículas que atraviesan los orificios menores de 0,25 mm (mesh>60) poseen una ER del 100% (Tabla 33).

De acuerdo con Alcarde (2005), en el caso de la acidez, la fracción mayor de 2 mm (retenida en el tamiz número 10) no tiene un efecto residual considerable en la corrección de la acidez, el 80% de la fracción 10–20 (2,00 a 0,84 mm) y el 40% de la fracción 20–50 (0,84 a 0,30 mm) seguirán actuando en el suelo más lentamente después de un período de tres meses, y la fracción menor de 50 (menos de 0,30 mm) reacciona totalmente en ese período de tiempo.

Tabla 32.

Composición y poder de neutralización (PN) de algunos materiales neutralizantes de la acidez en relación con CaCO_3 . Tomado de Havlin et al. (2017).

Material neutralizante	Fórmula	Porcentaje de calcio	Porcentaje de magnesio	PN
Carbonato de calcio	CaCO_3	40		100
Óxido de calcio	CaO	71		179
Hidróxido de calcio	Ca(OH)_2	54		138
Dolomita	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	22	13	108
Carbonato de magnesio	MgCO_3		29	119
Óxido de magnesio	MgO		60	248



La EG de una muestra se calcula mediante el promedio ponderado de las ER de cada tamiz (Sousa et al., 2007). En la Figura 40 puede verse la distribución de tamaño de partículas de una dolomita. Se aprecia una alta representación de partículas gruesas, cuya reactividad será nula a corto y mediano plazo.

Poder relativo de neutralización total (PRNT)

Valora de manera integral la calidad de una enmienda a partir de la eficiencia granulométrica, poder de neutralización y el contenido de humedad (Ecuación <32>).

$$PRNT = \frac{EG \times PN}{100} \times \frac{(100 - H)}{100} <32>$$

Para el caso del cultivo de café, Malavolta (1993) recomienda que la cal empleada tenga un PRNT mínimo de 75%.

La selección de la fuente encalante depende de las características del suelo y la disponibilidad y el costo de los materiales. En la mayoría de los casos la acidez está acompañada de bajos contenidos de magnesio, razón por la cual la caliza dolomítica es la mejor opción, pero ante una elevada disponibilidad de este elemento en el suelo, Mg²⁺ mayor de 0,9 cmol_c kg⁻¹, podrá emplearse la cal agrícola.

Investigaciones recientes en materia de la calidad de las enmiendas revelan que

las rocas fosfóricas que se procesan en el país tienen bajo poder de neutralización y su contenido de fósforo soluble es casi inexistente (Díaz y Sadeghian, 2020). Con respecto a las Escorias Thomas, a pesar de contener 10% de fósforo disponible, en la actualidad su costo relativo no justifica la inversión; por ejemplo, si se quiere proporcionar 50 kg de P₂O₅, cantidad de fósforo recomendada para cafetales en la etapa de producción, será necesario aplicar 500 kg ha⁻¹ de este material y, en el ejercicio económico, resulta más favorable emplear 500 kg ha⁻¹ de dolomita como enmienda y 100 kg de los fertilizantes DAP o MAP como fuente de fósforo.

Hoy día, en el mercado nacional existen productos que resultan de la mezcla de diferentes materiales; sin embargo, su efectividad y costos pueden ser objeto de revisión. En algunos casos es posible prepararlos en la finca según los requerimientos; un ejemplo frecuente es la mezcla de caliza dolomítica y yeso. Estas alternativas pueden ser adecuadas, siempre y cuando las materias primas sean de buena calidad y su aplicación se enmarque dentro de un plan adecuado del manejo de la fertilidad del suelo.

Efecto del encalado en las propiedades del suelo

Uno de los trabajos pioneros en materia del efecto del encalado en cafetales fue desarrollado por Suárez y Rodríguez (1956), quienes valoraron el efecto de la aplicación de dosis crecientes de cal apagada (1,0 a 10,0 t ha⁻¹) en la corrección de la acidez. Las cantidades aplicadas lograron incrementar el pH en 2,4 unidades, pasando de 4,9 a 7,3 (Figura 41). La tendencia observada fue de tipo creciente, observándose los mayores aumentos con dosis de 5,0 t ha⁻¹, con la cual se logró un pH igual a 6,8. El incremento de Ca²⁺ intercambiable se dio de manera proporcional a las cantidades suministradas

Tabla 33.
Eficiencia relativa de las diferentes fracciones granulométricas de los materiales encalantes. Adaptado de Espinosa y Molina (1999).

Número de malla (Mesh)	Tamaño de orificios (mm)	Eficiencia relativa (%)
<8	>2,38	0
8-20	2,38-0,84	20
20-40	0,84-0,42	40
40-60	0,42-0,25	60
>60	<0,25	100



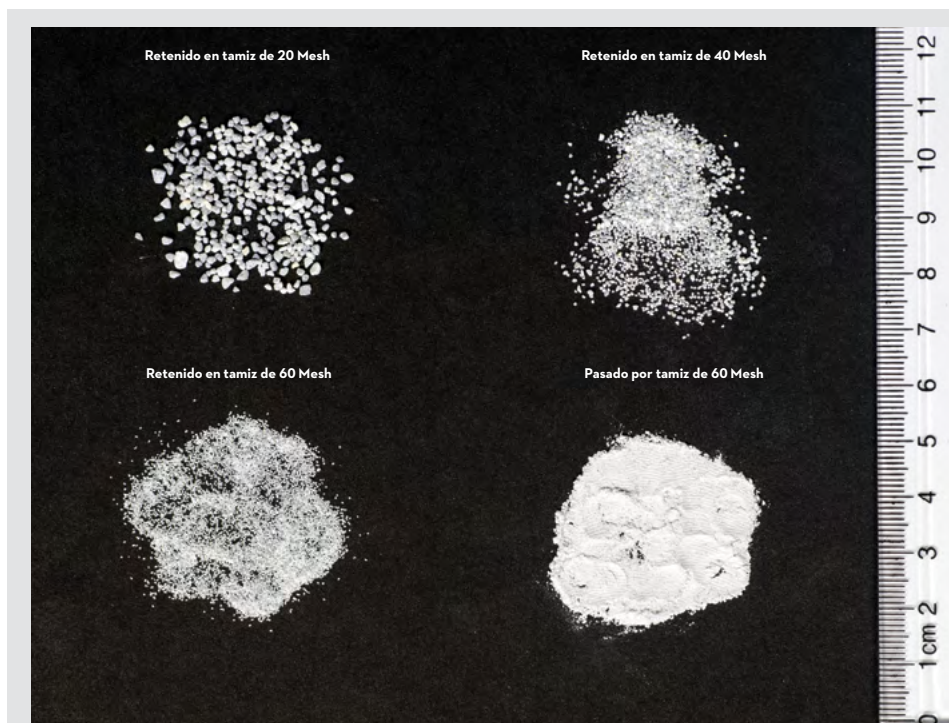


Figura 40.
Distribución de tamaño de partículas
de una dolomita.

de cal, pasando de 4,1 a 38,3 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, lo cual indica que, por cada tonelada del material de encalado, el Ca^{2+} se incrementó en 3,42 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Puede esperarse que una parte del Ca analizado no corresponda realmente a la fracción intercambiable, y que más bien corresponda a residuos del material sin reaccionar.

Con el objetivo de determinar el efecto del encalamiento en cafetales establecidos, Valencia y Bravo (1981) midieron los cambios químicos en el suelo, generados por la aplicación de 250 y 500 g/planta de cal apagada, hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), en una plantación renovada por zoca. Luego de cinco años continuos de encalamiento, el pH y el calcio se incrementaron en conformidad a las dosis aplicadas, hasta alcanzar valores que se consideran indeseables para café (Tabla 34); en contraste, los niveles hierro y aluminio disminuyeron con el aumento en las dosis. Los autores consideran que los cambios provocados por la cal justifican su uso en los cafetales.

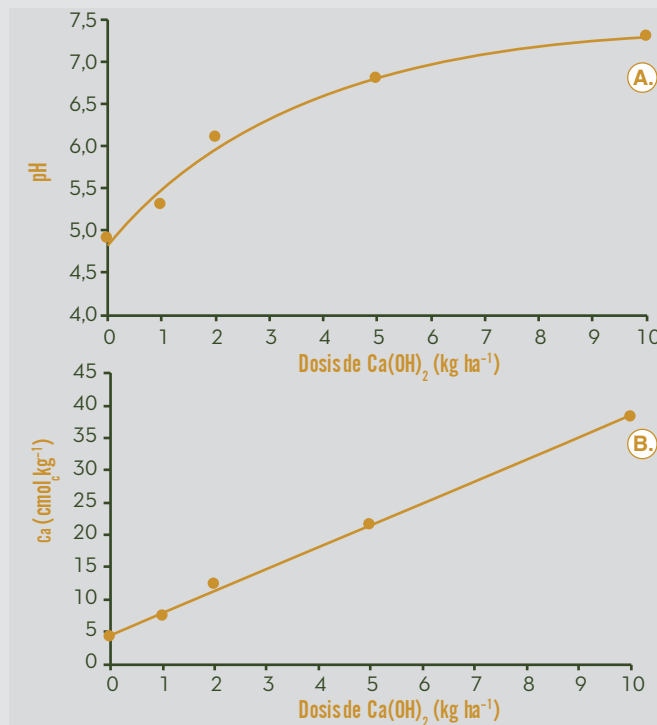


Figura 41.
Cambios en el pH (A.) y calcio intercambiable (B.) en respuesta a la aplicación de cal apagada —hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)— en un suelo Fulvudands (unidad Chinchiná). Mediciones realizadas después de seis meses de aplicados los tratamientos. Adaptado de Suárez y Rodríguez (1956).

Tabla 34.

Efecto de la aplicación de hidróxido de calcio en las propiedades químicas de un cafetal establecido. Tomado de Valencia y Bravo (1981).

Dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (g/plantá)	pH	Al	Ca	Mg	K	Fe
	(cmol _c kg ⁻¹)					
0	4,3	2,7	1,6	0,6	0,6	765
250	5,6	0,2	8,0	1,2	0,7	496
500	6,3	0,0	12,4	1,4	0,9	348

Los cambios que genera en la fertilidad del suelo la incorporación de la cal antes de la siembra de café pueden persistir durante varios años. Esto fue corroborado por Cenicafé (2017, página 138) al determinar el efecto residual de la dolomita en un suelo Andisol (Andic Dystropepts) de la zona central de Colombia. La corrección de la acidez del suelo, asociada al aumento del pH y la neutralización de Al^{3+} , así como el aumento en los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , persistía luego de dos años (Figura 42).

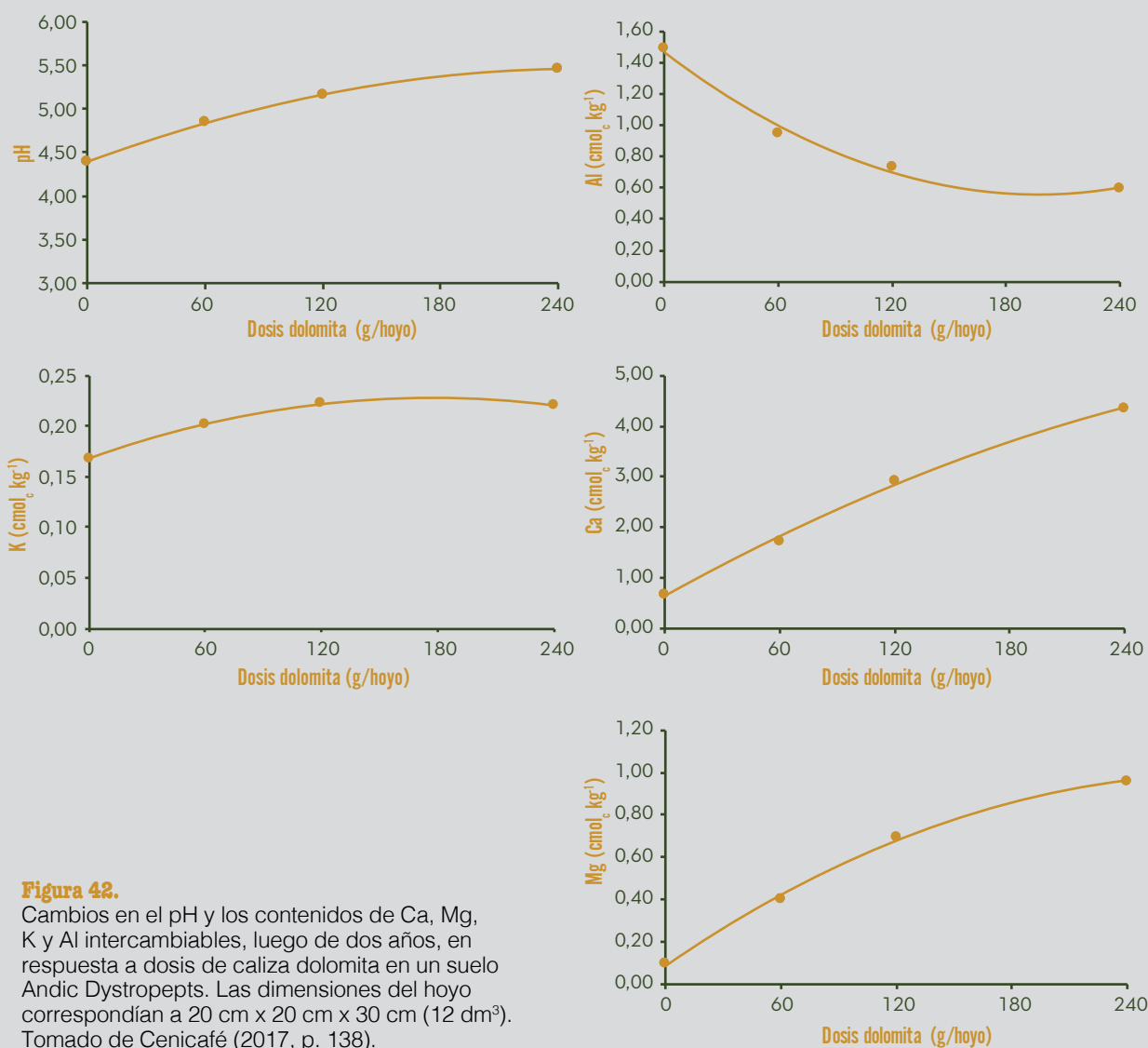


Figura 42.

Cambios en el pH y los contenidos de Ca, Mg, K y Al intercambiables, luego de dos años, en respuesta a dosis de caliza dolomita en un suelo Andic Dystropepts. Las dimensiones del hoyo correspondían a 20 cm x 20 cm x 30 cm (12 dm³). Tomado de Cenicafé (2017, p. 138).

Las aplicaciones de las enmiendas calcáreas pueden ocasionar efectos diferenciales en los suelos, según las propiedades químicas, físicas y mineralógicas de estos. En la Figura 43 se presentan los cambios por la incorporación de una enmienda calcárea (46,6% de CaO y 8,1% de MgO) en dos suelos contrastantes, un Inceptisol (Typic Dystropepts) y un Andisol (Pachic Melanudands). Se aprecia una resistencia más alta del Andisol para generar cambios en el pH y Al^{3+} , respuesta que, en este caso particular, podría atribuirse a un mayor contenido de materia orgánica y CIC.

Las restricciones que existen para la incorporación de la cal después de la siembra de café obligan a que la enmienda se aplique de manera superficial; sin embargo, los resultados de esta práctica tienen su mayor influencia en los primeros 10 cm de profundidad. En una investigación de Cenicafe (2018) se midió el aumento en el pH a través del perfil en un suelo Typic Melanudans de la región cafetera central de Colombia. Los tratamientos, fundamentados en dosis crecientes de dolomita, se habían aplicado superficialmente en toda el área de la plantación dos años antes de la evaluación. Los mayores incrementos en el pH se presentaron en los primeros 5 cm del suelo, seguidos por la profundidad de 5 a

10 cm (Figura 44). El aumento logrado con la aplicación de la dosis más baja, 800 kg ha^{-1} , fue de 0,52 unidades en los primeros 5 cm, y de 0,86 unidades con 4.000 kg ha^{-1} (Figura 45), resultado que revela una mayor magnitud en el incremento del pH por unidad de enmienda aplicada con la dosis más baja. La evidencia del mayor efecto de la cal en las capas más superficiales sugiere que la evaluación del efecto del encalamado mediante el muestreo de suelo debe enfocarse en los primeros 10 cm. Con base en el promedio de las cuatro profundidades evaluadas en este estudio pueden esperarse los siguientes incrementos en el pH cuando se toman muestras de suelos de 0 a 20 cm, luego de haber realizado un encalamiento:

Dosis de dolomita (kg ha^{-1})	Incremento promedio del pH de 0 a 20 cm de profundidad
800	0,20
1.600	0,21
2.400	0,34
3.200	0,38
4.000	0,44

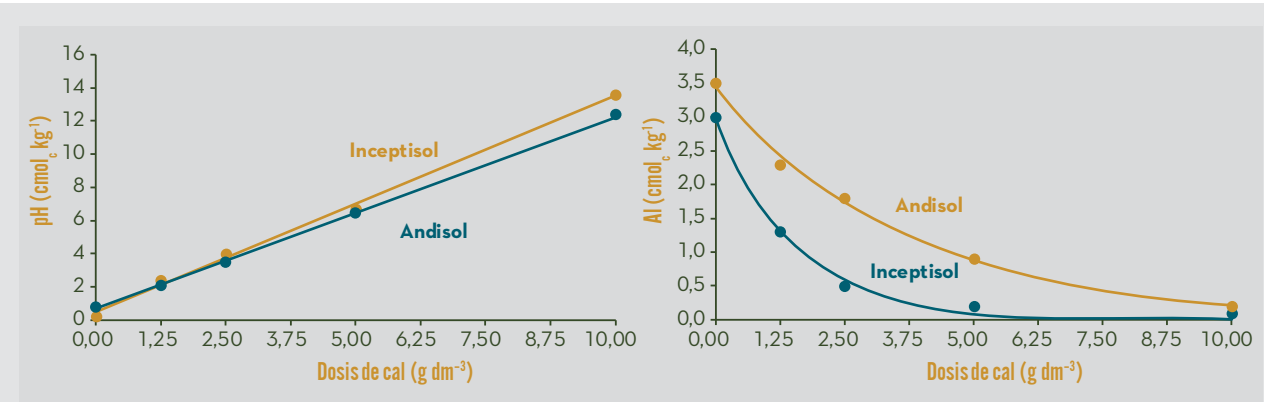


Figura 43. Cambios en el pH y aluminio intercambiable de un Andisol (Pachic Melanudands) y un Inceptisol (Typic Dystropepts) en respuesta al encalamiento. Adaptado de Sadeghian y Díaz (2020A).

Figura 44.

Cambios en el pH a través de la profundidad del suelo en respuesta a dosis de dolomita. Tomado de Cenicafé (2018, p. 123).

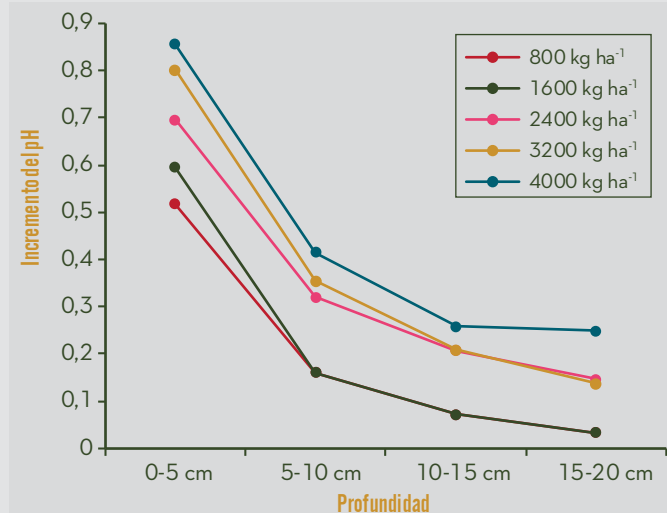
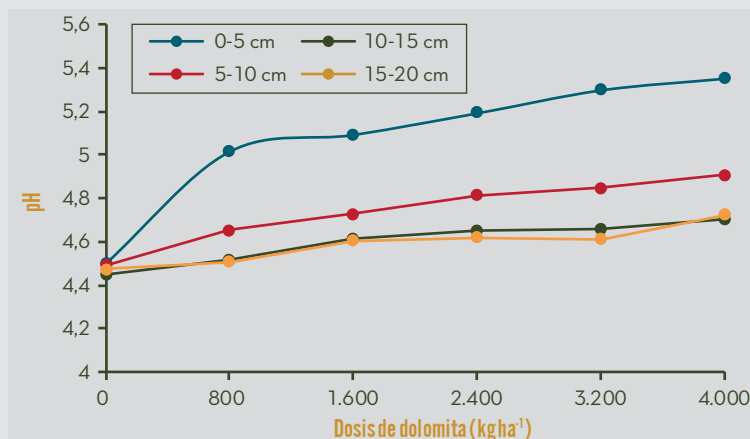


Figura 45.

Cambios en el pH a través de la profundidad del suelo en respuesta a dosis de dolomita. Tomado de Cenicafé (2018, p. 123).

Respuesta del café al encalado

El efecto de la aplicación de la cal es efectivo siempre y cuando existan condiciones de acidez en el suelo. Cuando el pH es mayor de 7,0, la cal no reacciona y, debido a ello, no corregirá la acidez y tampoco será una fuente de calcio. Adicionalmente, la aplicación

de un material correctivo de la acidez puede ocasionar efectos disímiles en las plantas, según el tipo de suelo. En la Figura 46 puede verse el crecimiento de café durante la etapa de almácigo, en respuesta al suministro de cal en un Andisol y un Inceptisol de Colombia. En el Andisol, con un pH=5,0, el crecimiento de las plantas se vio favorecido con dosis bajas de cal (1,25 y 2,50 g dm⁻³), sin que el sobre-encalamiento generara consecuencias negativas. En el Inceptisol, con un pH=4,5, la cantidad requerida para alcanzar el mayor crecimiento fue mayor (5,0 g dm⁻³), pero el suministro de la dosis más alta se tradujo en una menor biomasa. Las diferencias detectadas por el sobre-encalamiento pueden estar relacionadas con diversas causas, entre ellas la disimilitud en el poder búfer de los suelos y los desbalances nutricionales generados por el encalado.

En ocasiones, con el uso de abonos orgánicos se corrige parcialmente la acidez del suelo; en contraste, cuando la acidez es alta, resulta más favorable para el crecimiento de las plantas el uso de enmiendas calcáreas junto con la aplicación de abonos orgánicos y fósforo. Un ejemplo de lo anterior se presenta para la etapa de almácigo (Figura 47).

En suelos ácidos, la incorporación de cal al suelo del hoyo antes de la siembra favorece el crecimiento de las plantas. En una investigación desarrollada en el municipio de Andes

(Antioquia), se demostró que la aplicación de 60 g de caliza dolomítica en el hoyo contribuye a la obtención de plantas con mayor diámetro del tallo y longitud de ramas (Figura 48). La baja dosis requerida se atribuyó a la pedregosidad del terreno, condición que reduce el volumen efectivo del suelo en el hoyo donde se va a neutralizar la acidez.

La aplicación de cal apagada durante la fase de establecimiento de café ha demostrado ser eficaz para elevar el pH y aportar calcio; sin embargo, un exceso de este material puede traducirse en una reducción del crecimiento de café (Figura 49), en especial cuando el pH del suelo se encuentra cerca de 5,0.

Uno de los aspectos a tener en cuenta al momento de incorporar la cal al suelo del hoyo en donde se sembrará el colino de café es el tamaño del hoyo; consideración relacionada con el volumen del suelo objeto de la corrección de acidez. Recomendaciones al respecto han sido consignadas en el Boletín Técnico de Cenicafe 32 (Sadeghian, 2008a).

En un Andisol con acidez para café ($\text{pH}=4,4$ y $\text{Al}^{3+}=1,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), se evaluó el efecto de la dolomita en hoyos relativamente pequeños ($20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, con un volumen de 12 dm^3). Pese al tamaño del hoyo, la corrección de la acidez del suelo antes de la siembra tuvo efectos positivos en la primera cosecha (Figura 50). Como era de esperarse, la dosis requerida fue baja (60 g/hoyo) con respecto a las cantidades que se sugieren para hoyos más grandes.

Entre las fuentes para la corrección de la acidez se encuentran aquellas que proporcionan fósforo. Dados los requerimientos de este elemento durante la etapa de establecimiento, los caficultores emplean rocas fosfóricas, cuya respuesta se ha puesto en duda recientemente en razón de análisis efectuados a estos materiales. Con el fin de aportar elementos de juicio para seleccionar fuentes apropiadas que pudieran ser empleadas en la siembra de café, se realizaron pruebas de incubación y ensayos en el campo. Pudo corroborarse que la corrección de la acidez

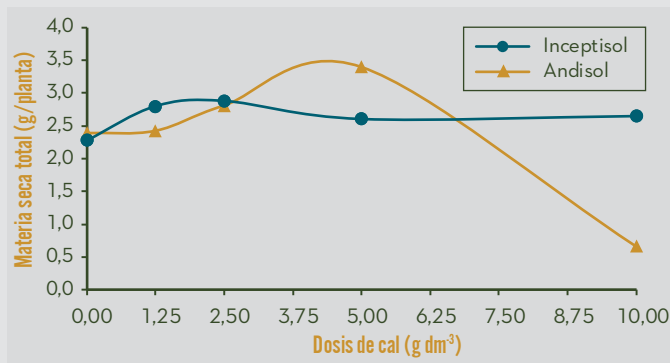


Figura 46.

Materia seca de café durante la etapa de almácigo en respuesta al suministro de cal en un Andisol y un Inceptisol de la región cafetera de Colombia. Tomado de Sadeghian y Díaz (2020B).

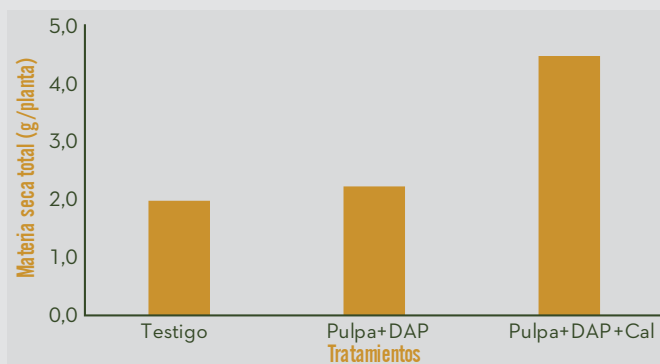


Figura 47.

Crecimiento de café durante la etapa de almácigo en respuesta a pulpa de café, fósforo y cal en Cajibío (Cauca). El tratamiento testigo corresponde a suelo solo. Tomado de Sadeghian (2016).

por la roca fosfórica es muy baja cuando se compara con la dolomita (Figura 51). Al comparar el efecto de la incorporación de estos materiales al suelo antes de la siembra, se encontró que la producción obtenida con la dolomita durante la primera cosecha fue más alta con respecto al testigo y la roca fosfórica, resultado que se relaciona tanto con la acción correctiva de la dolomita como con su aporte en magnesio (Figura 52). Cabe resaltar que los tres tratamientos recibieron aportes de fósforo.

Figura 48.

Diámetro del tallo y longitud de la rama de café con 12 meses de edad en respuesta a dosis de cal en la siembra. Tomado de Sadeghian (2016).

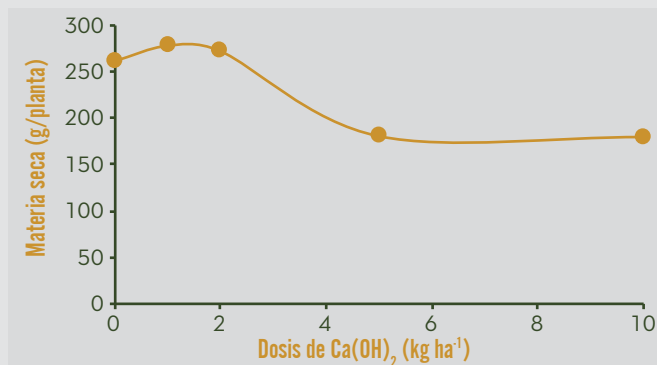
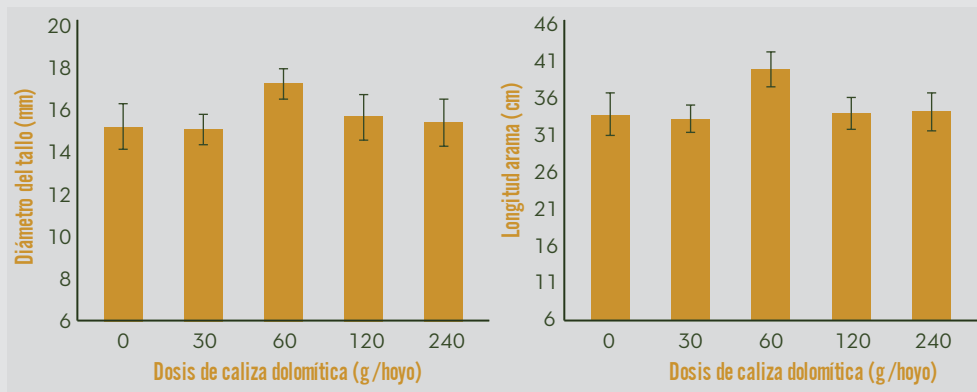


Figura 49.

Materia seca de un cafetal joven establecido en un suelo de la serie 10 (Chinchiná) con pH 4,9, en respuesta a la aplicación de cal apagada (hidróxido de calcio). Adaptado de Suárez y Rodríguez (1956).

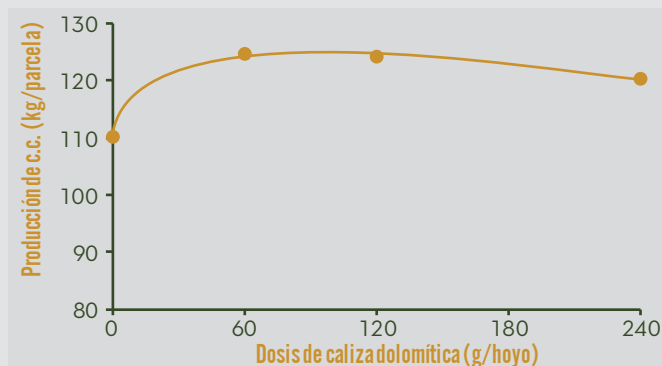


Figura 50.

Producción de café cereza (c.c.), primera cosecha, obtenida, en respuesta a la incorporación de la dolomita al suelo de un hoyo con dimensiones 20 cm x 20 cm x 30 cm (12 dm^3). Tomado de Cenicafé (2018, p. 122).

Han sido pocas las investigaciones desarrolladas en torno al encalamiento de cafetales durante la etapa de producción en Colombia. En el estudio conducido durante cinco años por Valencia y Bravo (1981), la aplicación anual de 250 y 500 g/planta de cal apagada [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], con y sin fertilización química (12-12-17-2), no afectó la producción de café ni el porcentaje de pasilla (Figura 53). Los resultados obtenidos en este trabajo pueden tener su origen en las altas cantidades suministradas.

La Figura 54 ilustra la respuesta del café en producción al suministro de dosis bajas de cal agrícola ($340 \text{ kg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$) en las Estaciones Experimentales El Rosario (Antioquia) y San Antonio (Santander). En las dos localidades se registraron incrementos de la producción en cantidades equivalentes al 15%.

En una investigación reciente, desarrollada en un Andisol ácido de la región central cafetera de Colombia, se determinó la respuesta de café en producción al encalamiento con el uso de dolomita, esparcida de manera homogénea en toda el área cultivada a los 12 meses después de la siembra. La aplicación de la enmienda tuvo efectos en la producción de la segunda cosecha; al respecto, con 2.400 kg ha^{-1} se obtuvo el promedio más alto (Figura 55). Al expresar la producción en función del pH del suelo, en muestras tomadas hasta 20 cm de profundidad, los mayores rendimientos se

presentaron cuando esta propiedad alcanzó valores cercanos a 4,9.

Una consecuencia del encalado es el aporte de Ca y Mg, elementos que logran enriquecer la fase intercambiabile y la solución del suelo, sitio desde el cual son absorbidos por las raíces de las plantas. En respuesta a este mecanismo pueden elevarse las concentraciones de Ca y Mg en los tejidos vegetales, como se muestra en la Figura 56. Lo anterior deja sin fundamento la creencia de que únicamente los fertilizantes solubles como el nitrato de calcio y magnesio aportan estos nutrientes.

Criterios para corregir la acidez

Se han propuesto diferentes indicadores del suelo o criterios para determinar los requerimientos de cal en los diversos cultivos, sin que exista en la actualidad un consenso frente al tema. Algunas propuestas buscan neutralizar el Al^{3+} y elevar el pH hasta cierto valor, mientras que otros se enfatizan en la corrección de las deficiencias de Ca y Mg, en el aumento de la saturación de bases intercambiables o en una combinación de las anteriores.

Para cultivos cuyo rango adecuado de pH supera el valor de 5,5, no tendría sentido emplear una recomendación del encalamiento basada en la neutralización de Al^{3+} , pues la toxicidad de este elemento se limita a valores de pH menores de 5,5. Ahora bien, de acuerdo con Sadeghian (2013), para el cultivo de café tanto el pH, el Al^{3+} y el porcentaje de saturación de Al^{3+} pueden emplearse para determinar los requerimientos de cal, pues existe una alta correlación entre estos. Pese a lo anterior, y dado que en ocasiones el análisis de laboratorio sobrevalora el contenido del Al^{3+} , particularmente en los Andisoles (Ortiz et al., 2004), se ha optado por utilizar el valor del pH para sugerir la dosis de la cal, la cual puede ajustarse con base en el contenido de Ca^{2+} intercambiabile; este último debido al efecto del Ca^{2+} como nutriente, y por ser este un indicador de la CICE, dada su relación con

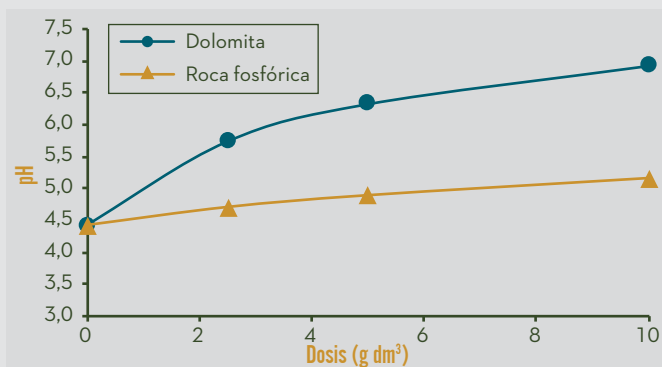


Figura 51.

Cambios en el pH en respuesta a la aplicación de dolomita y roca fosfórica. Prueba de incubación realizada en un suelo de la unidad Oriente (Antioquia) durante dos meses. Adaptado de Cenicafé (2018).

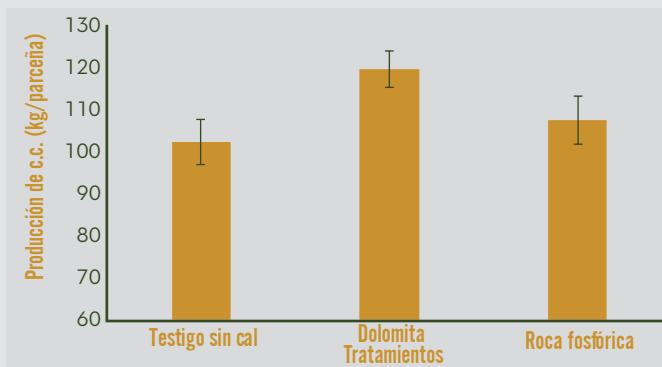


Figura 52.

Producción de café cereza (c.c.), en respuesta a la aplicación de dolomita y roca fosfórica. Tomado de Cenicafé (2020).

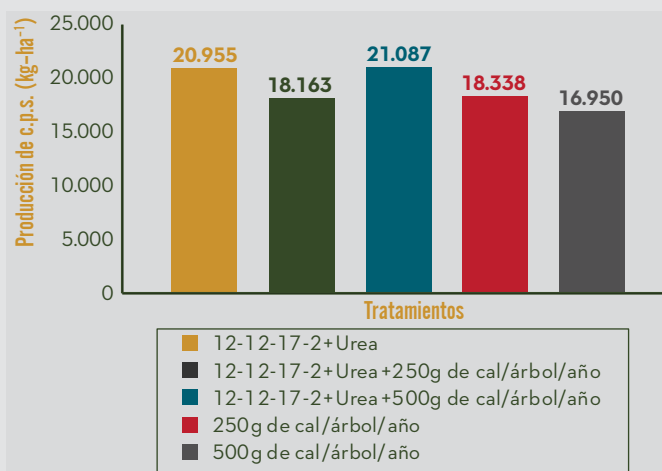


Figura 53.

Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta de a encalado y fertilización. Tomado de Valencia y Bravo (1981).

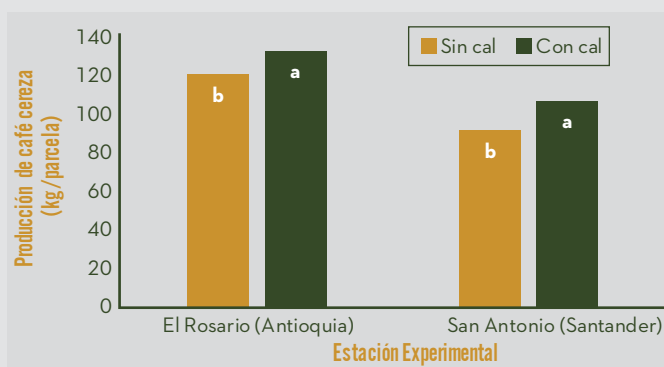


Figura 54.

Producción del café cereza en respuesta al suministro de cal en dos Estaciones Experimentales de Cenicafé durante el año 2003. Tomado de Sadeghian (2016). Letras distintas indican diferencias según la prueba Dunnnett al 5%.

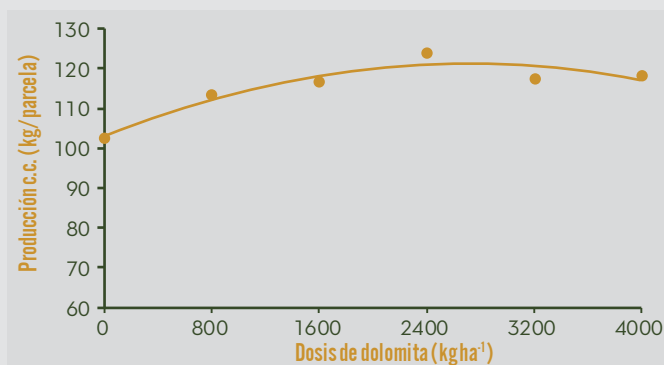


Figura 55.

Producción de café cereza (c.c.) durante la segunda cosecha en respuesta a la dolomita. Tomado de Cenicafé (2018, p. 124).

otros cationes, principalmente H^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} y Mg^{2+} intercambiables.

Con el propósito de generar indicadores que puedan servir de guía para definir las dosis de enmiendas será necesario calibrar los resultados del análisis de suelos con respecto a la respuesta del cultivo en términos de producción. Un ejemplo del procedimiento en mención se presenta en la Figura 57, de acuerdo con la información obtenida a partir de un experimento de encalamiento en la siembra. Al expresar la producción de café cereza en

función del pH del suelo, logran asociarse los mayores rendimientos con valores cercanos a 5,0. En la misma dirección, contenidos de Al^{3+} mayores a $1,0 \text{ cmol kg}^{-1}$ o en su defecto, porcentajes de saturación de Al^{3+} superiores al 30%, pueden tomarse como niveles a partir de los cuales el rendimiento de cultivo se reduce significativamente. Con respecto a la saturación de bases, calculada a partir de la Capacidad de Intercambio Catiónico-CIC $[(Ca+Mg+K)*100/CIC]$, valores mayores del 20% parecen ser adecuados.

Consideraciones prácticas para el manejo de la acidez del suelo

A continuación, se plantean algunas consideraciones para mejorar la efectividad del encalamiento.

- ♦ La efectividad de la cal depende tanto de la dosis y la fuente empleada, como de la finura y la forma de aplicación.
- ♦ La cal no es soluble, por lo tanto, su efectividad está dada por la manera en que se aplique. Es mucho más eficaz si se incorpora al suelo; práctica que sólo se puede efectuar al momento de la siembra, pues de lo contrario pueden ocasionarse daños a las raíces y favorecer la erosión.
- ♦ Cuando no se mezcla de manera homogénea la cal con el suelo antes de la siembra, se forman capas o películas de cal que no son efectivas (Figura 58). Esto también sucede al espolvorear el producto a las paredes del hoyo.
- ♦ Es necesario tener en cuenta el tamaño del hoyo en el que se siembra el colino con el fin de ajustar la dosis de la cal, determinada mediante el análisis de suelos.
- ♦ Es preferible hacer hoyos grandes (30 cm x 30 cm x 30 cm), especialmente en los suelos donde se presenta una acidez alta. Esto permitirá controlar la acidez en un mayor volumen de suelo.

- ♦ El efecto de las aplicaciones superficiales se limita principalmente a los primeros 5 o 10 cm; sin embargo, se espera que las aplicaciones continuadas tengan efecto en mayores profundidades.
- ♦ Después de la siembra se hace necesario esparcir la cal de manera homogénea en la zona de raíces (el plato del árbol). Si el cultivo no ha alcanzado su máximo desarrollo, el área de aplicación debe ampliarse, teniendo en cuenta el crecimiento futuro (Figura 59).
- ♦ Es necesario retirar la mayor cantidad de hojarasca antes de encalar, pues el exceso de hojas afecta la uniformidad de la aplicación de la cal (Figura 60).
- ♦ Cantidades de cal menores a las requeridas son menos efectivas y el sobre-encalamiento afecta negativamente el crecimiento de las plantas, generando deficiencias de algunos elementos, principalmente de hierro y manganeso, lo que se conoce como clorosis calcárea. Los problemas de sobredosis son muy difíciles de resolver en razón de la alta residualidad de la cal.
- ♦ La frecuencia del encalamiento puede variar entre uno y dos años. Al efectuar esta labor en la siembra, se recomienda una nueva aplicación 10 a 12 meses después. Durante la fase reproductiva la frecuencia es de dos años; esto a menos que se realice un nuevo análisis de suelo que sugiera una nueva aplicación.
- ♦ Se recomienda llevar a cabo el encalamiento aproximadamente dos meses antes o después de fertilizar. Esta labor puede realizarse en períodos secos, pues en ocasiones las lluvias dificultan la aplicación de las enmiendas; pese a lo anterior, es necesario tener presente que para las reacciones que conllevan a la corrección de la acidez se requiere de humedad.
- ♦ El fraccionamiento de la dosis recomendada de cal puede reducir su efectividad y resultar antieconómico por

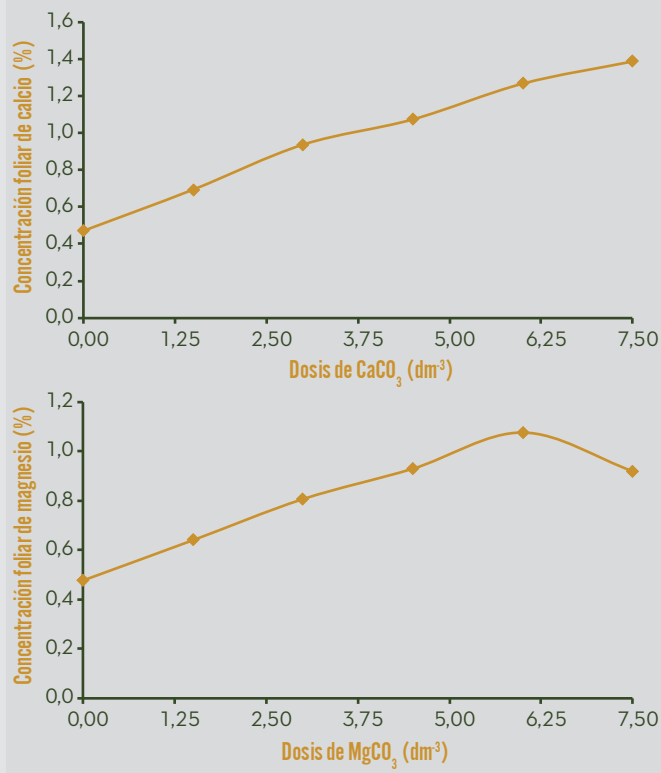


Figura 56.

Concentración foliar de calcio y magnesio en respuesta a la aplicación de carbonato de calcio y carbonato de magnesio. Tomado de Cenicafé (2016, p. 97).

los costos (limpieza del plato del árbol y la aplicación).

- ♦ Es posible aplicar una mezcla de cales, otras enmiendas y ciertos fertilizantes, por ejemplo, óxido de magnesio y yeso. En contraste, la cal no debe mezclarse con fertilizantes nitrogenados ni fosfóricos.
- ♦ Cuando quiere corregirse la acidez, no debe reemplazarse la cal por fertilizantes solubles como nitrato de calcio o productos comercializados como cales líquidas.

En las Tablas 35, 36 y 37 se consignan las dosis de cal que actualmente se recomienda para las etapas de levante, después del zoqueo y producción, respectivamente.

Figura 57.

Producción de café cereza (c.c.) en función del pH, Al^{3+} , porcentaje de saturación de Al^{3+} y porcentaje de saturación de bases intercambiables, obtenidos para un Andisol de la zona cafetera de Colombia. Los análisis corresponden a muestras de suelo tomadas en el hoyo de la siembra en un experimento de encalamiento. Tomado de Cenicafé (2018, p. 122).

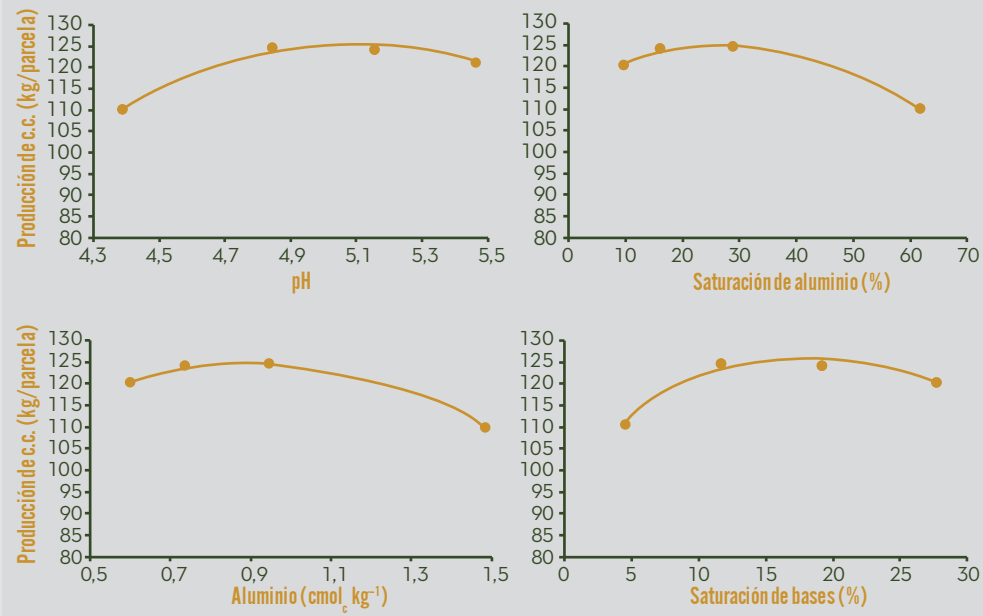


Tabla 35. Dosis de cal agrícola para la siembra y 12 meses después, de acuerdo con el pH y los contenidos de calcio intercambiable.

pH	Dosis de cal agrícola por hoyo* o plato del árbol (g)		
	Ca≤ 1,5	1,5<Ca≤3,0	Ca>3,0
	(cmol _c kg ⁻¹)		
pH≤4,0	120	100	80
4,0<pH≤5,0	100	80	60
5,0<pH≤5,5	40	0	0

*Con dimensiones de 30 cm x 30 cm x 30 cm.

Tabla 36. Recomendaciones para el encalamiento de los cafetales después de la zoca con base en el pH y los contenidos de calcio intercambiable.

pH	Dosis de cal agrícola en gramos por planta		
	Ca≤ 1,5	1,5<Ca≤3,0	Ca>3,0
	(cmol _c kg ⁻¹)		
pH≤4,0	140	120	100
4,0<pH≤5,0	120	100	80
5,0<pH≤5,5	40	0	0

Tabla 37. Dosis de cal agrícola para la etapa de producción de café, con base en el pH del suelo y el contenido de calcio intercambiable.

pH	Dosis de cal (kg ha ⁻¹) cada dos años		
	Ca≤ 1,5	1,5<Ca≤3,0	Ca>3,0
	(cmol _c kg ⁻¹)		
pH≤4,0	1.400	1.200	1.000
4,0<pH≤4,5	1.200	1.000	800
4,5<pH≤5,0	1.000	800	600
5,0<pH≤5,5	400	0	0



Figura 58.
Capas o películas de cal por una aplicación incorrecta.



Figura 59.
Aplicación homogénea de la cal en la zona actual y futura de raíces.



Figura 60.
La presencia de hojarasca afecta la uniformidad de la aplicación.



Nitrógeno, fósforo y potasio



Nitrógeno

El nitrógeno (N), junto con el potasio (K), son los dos nutrientes más requeridos por el café durante todas las etapas de desarrollo del cultivo. La extracción total de N de la variedad Colombia® durante los primeros 5,5 años después de la siembra en el campo llega a representar cerca de 550 kg ha⁻¹ (Riaño et al., 2004). Investigaciones con la Variedad Castillo® demuestran que esta cantidad puede alcanzar 650 kg ha⁻¹ a los 4 años de establecimiento. En cuanto a la remoción por la cosecha, se estima que, por cada 1.000 kg de café almendra, equivalentes a 1.250 kg de café pergamino seco (c.p.s.), se exportan del suelo 31 kg de N y, por lo tanto, en los cafetales a plena exposición solar, donde las producciones frecuentemente superan los 5.000 kg ha-año⁻¹, las cantidades removidas llegan a representar más de 120 kg ha-año⁻¹ (Sadeghian et al., 2006).

El nitrógeno ha sido señalado como el nutriente más limitante para la producción de café en Colombia y el único que no debe excluirse de los planes de fertilización (Sadeghian, 2008a). Una investigación desarrollada en 32 localidades de Colombia, 20 cultivos al sol y 12 bajo semisombra, reveló que, al suspender el suministro de N, la producción no se afecta de manera significativa durante el primer año, sino a partir del segundo año de evaluación (Figura 61). La reducción del rendimiento es mayor en plantaciones a plena exposición solar y alcanza, en promedio, más del 45% a los cuatro años (Figura 62). Este hecho pone de manifiesto la relevancia que tiene la aplicación de N en la producción de los cafetales tecnificados, en especial aquellos que se cultivan a plena exposición solar.

Materia orgánica: **fuentes de nitrógeno en el suelo**

La principal fuente de N para las plantas en el suelo es la materia orgánica (MO), la cual a través del proceso de mineralización dispone cantidades variables del elemento, según las

Figura 61.

Valores promedio de producción de café pergamino seco (c.p.s.), obtenida con y sin la aplicación de nitrógeno (N) durante cuatro años en cafetales al sol (20 plantaciones) y bajo semisombra (12 plantaciones). Tomado de Sadeghian (2011).

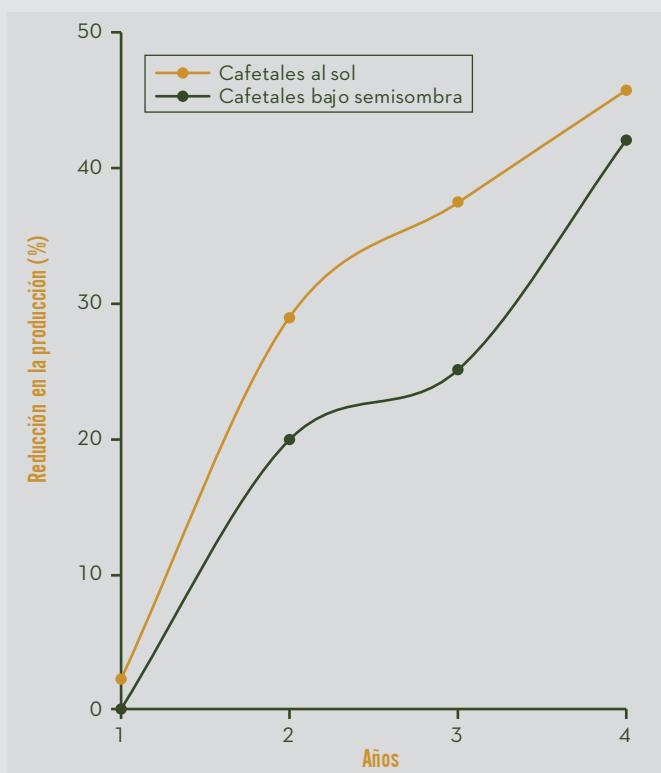
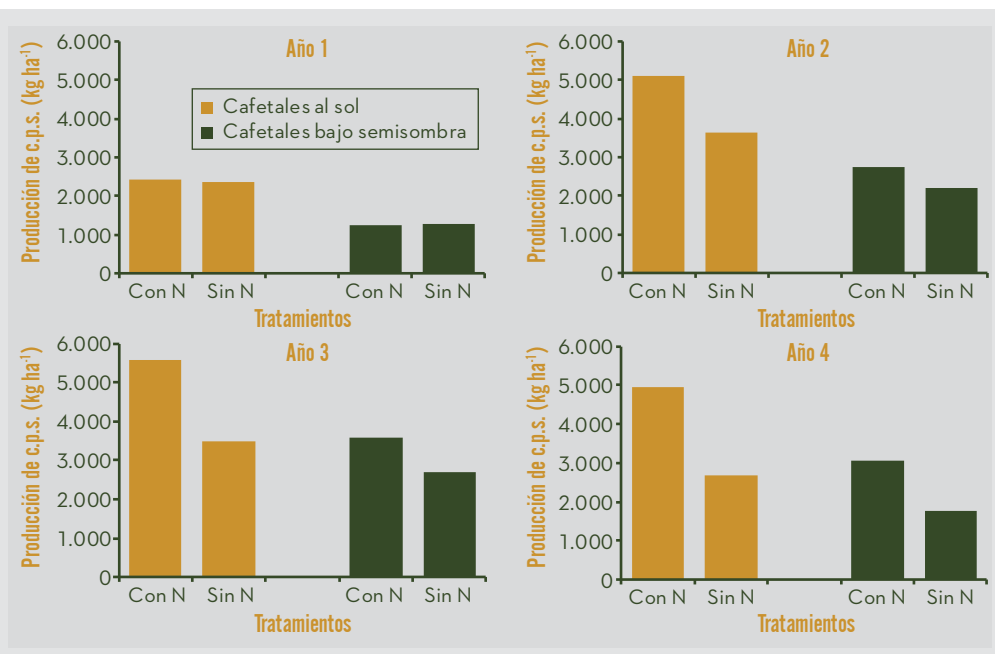


Figura 62.

Reducción en la producción de café al sol y bajo semisombra a través del tiempo, en respuesta a la omisión de la fertilización nitrogenada. Adaptada de Sadeghian (2011).

condiciones predominantes (suelo y clima). De acuerdo con las mediciones realizadas en dos localidades de la zona cafetera de Colombia, los suelos pueden proveer entre 8,0 y 40,0 kg ha⁻¹ de N cada mes (Cenicafé, 2007). Si no ocurrieran aportes de materiales orgánicos al suelo, la mineralización se traduciría en el agotamiento de la MO con el paso del tiempo. Afortunadamente, a través del crecimiento constante de las raíces y el ingreso de restos de plantas y otros organismos, se incorporan permanentemente al suelo residuos que reabastecen los contenidos de este componente. Lo anterior constituye, de esta manera, un mecanismo para mantener la fertilidad del suelo en lo que respecta al N.

En un estudio de calibración de análisis de suelos pudo explicarse mediante la Ecuación <33> el rendimiento relativo de café en función de la MO del suelo (Sadeghian, 2011):

$$\text{Rendimiento relativo (\%)} = -20,77 + 11,11 \text{ MO} - 0,31 \text{ MO}^2 \quad (R^2 = 0,65) \quad <33>$$

De acuerdo con esta expresión matemática, ante niveles muy bajos de MO (menor de 4%), la producción de café se reduce

en 80% si no se realizan aplicaciones de N durante tres años seguidos; si la MO es cercana al 8%, la reducción será del 50%; con valores entre 16% y 20% de MO, se presentará una disminución del 20%. Contenidos de MO superiores al 20%, sugieren una reducción en la tasa de mineralización como consecuencia de una menor temperatura y, por lo tanto, menor disponibilidad de N. Puesto que en esta investigación el rendimiento máximo no alcanzó el 100% después del primer año de evaluación, puede afirmarse que siempre será necesario proporcionar N a los cafetales, pues aún con niveles elevados de MO, existe la probabilidad de respuesta a su aplicación, aunque en menor magnitud.

Dosis y fuentes de nitrógeno

Se espera que el suministro de N durante la etapa de establecimiento contribuya al crecimiento inicial del cultivo y a la formación de estructuras vegetativas que soportan la primera producción. Los reportes de una investigación conducida por Mestre (2000) indican que la aplicación de dosis crecientes del elemento (0, 40 y 80

g/planta) durante el primer año en el campo, sólo generó efectos significativos en la producción en dos de las siete localidades donde se llevó a cabo el experimento, al respecto, en ambos casos la respuesta se ajustó a un modelo cuadrático.

A su vez, Hernández y Suárez (2002) determinaron el efecto de la época de inicio de la aplicación de N en nueve localidades de la zona cafetera colombiana, de las cuales, Sadeghian (2010), presenta los resultados de tres de ellas (Figura 63). Cuando se inició el suministro de N a los seis meses después de la siembra, la producción en la primera cosecha se redujo apenas en 2% (Figura 64); sin embargo, a medida que se atrasó en más de seis meses esta labor, la producción experimentó descensos sucesivos hasta del 40% (testigo sin N), reducción que puede representar más de 1.000 kg ha⁻¹ de c.p.s. La falta de respuesta a los dos meses estaría relacionada con los aportes de N provenientes del sustrato del almácigo, particularmente la pulpa de café.

En ocho localidades de la zona cafetera de Colombia se evaluó el efecto del suministro

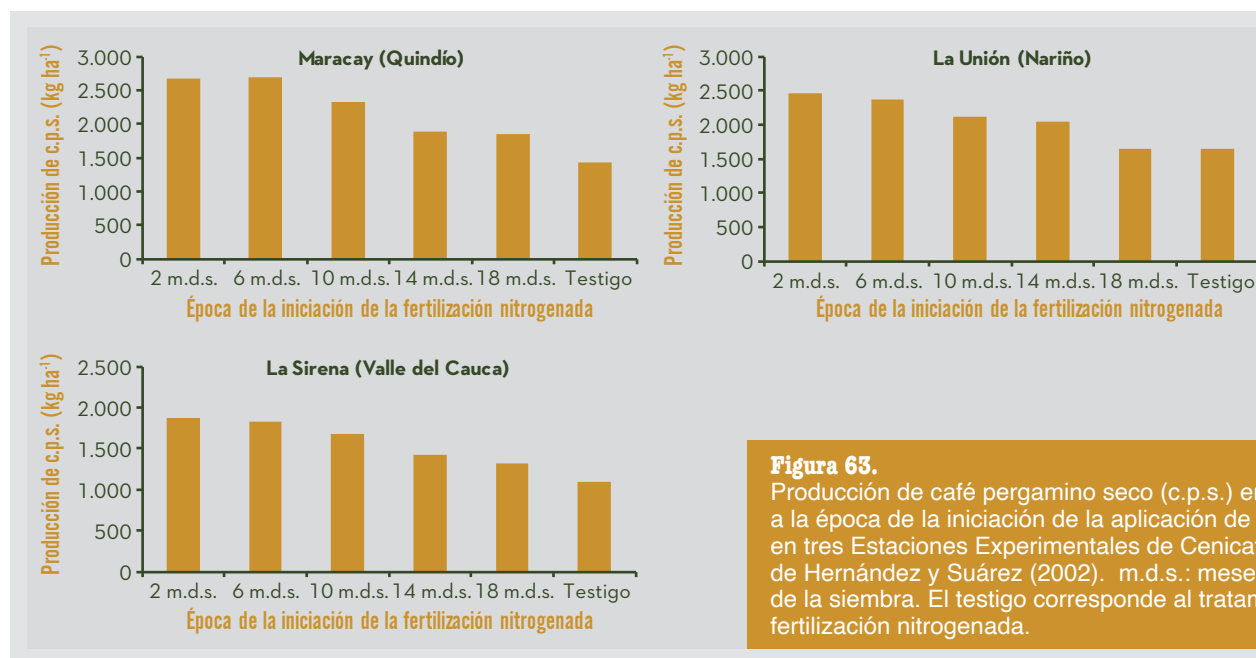


Figura 63. Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta a la época de la iniciación de la aplicación de nitrógeno en tres Estaciones Experimentales de Cenicafé. Adaptado de Hernández y Suárez (2002). m.d.s.: meses después de la siembra. El testigo corresponde al tratamiento sin fertilización nitrogenada.

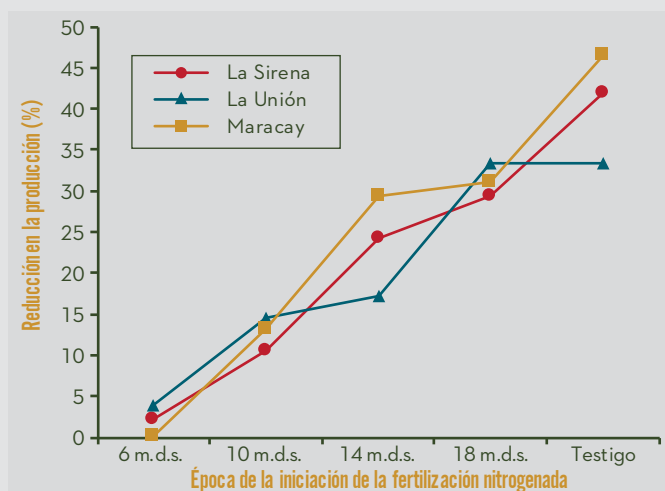


Figura 64.

Reducción en la producción de café en respuesta a la época de la iniciación de la aplicación de nitrógeno. Adaptado de Hernández y Suárez (2002). m.d.s.: meses después de la siembra.

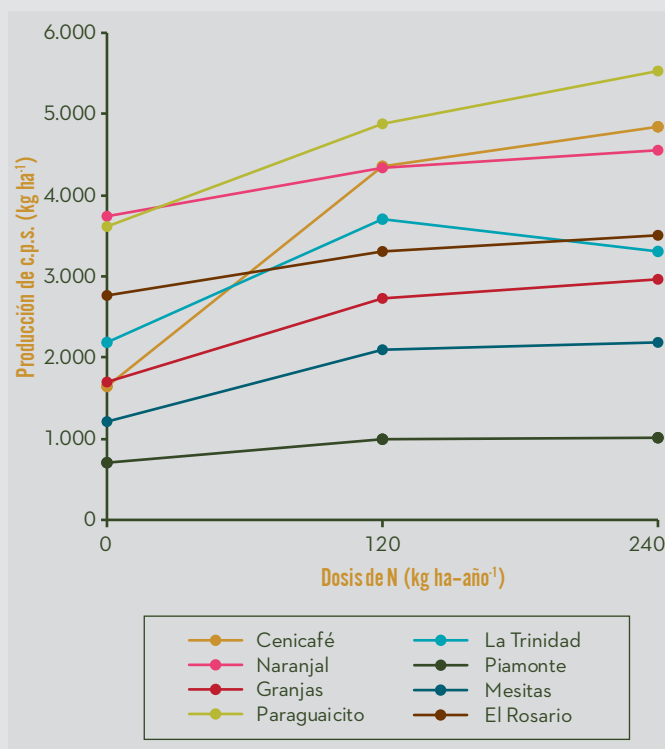


Figura 65.

Valores promedio de producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta a la aplicación de nitrógeno. Adaptado de Uribe y Mestre (1976).

de N durante la etapa de producción en las variedades Caturra y Borbón, establecidas con bajas densidades de siembra. Las dosis aplicadas de 0, 120 y 240 kg ha-año⁻¹, generaron respuestas positivas en todos los sitios, aún en aquellos con alto contenido de MO del suelo (Figura 65). Mediciones foliares realizadas en los mismos campos experimentales, mostraron que las concentraciones de N se incrementan en conformidad a las dosis, siendo mayor el efecto en algunas localidades (Figura 66). De acuerdo con las ecuaciones obtenidas, las dosis de N necesarias para alcanzar la producción máxima en cada localidad, estuvieron entre 116 y 270 kg ha-año⁻¹ (Mestre, 2000).

Se ha demostrado que para cultivos de la variedad Colombia, establecidos en altas densidades de siembra (10.000 plantas/ha), pueden ser suficientes 300 kg ha-año⁻¹ de N (Figura 67), resultado que concuerda con lo obtenido para la Variedad Castillo® (Figura 68). Esta dosis es independiente de la fuente que se use, bien sea nitrato de amonio, urea o urea Entec® (Figura 69), siempre y cuando se suministren las mismas dosis del elemento. Lo anterior replantea la percepción de que los fertilizantes compuestos que contienen como fuente nitrato y amonio —clasificados comúnmente dentro de los complejos granulados— son más eficientes. También se ha demostrado que la urea Entec® (3,4-dimetilpirazol fosfato), empleada para inhibir la nitrificación del amonio, no contribuye a mejorar la eficiencia de la aplicación de N en café. Con respecto a la concentración foliar de N, la producción máxima del cultivo se logra generalmente con valores cercanos al 2,6% (Figura 70).

Rendón y Sadeghian (2018) determinaron la relación del Índice Relativo de Clorofila (IRC), medido con el equipo SPAD-502, y el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (IVDN), estimado mediante el equipo *GreenSeeker* con cinco dosis de N (0, 150, 225, 300 y 375 kg ha-año⁻¹) en café Variedad Castillo® durante la etapa

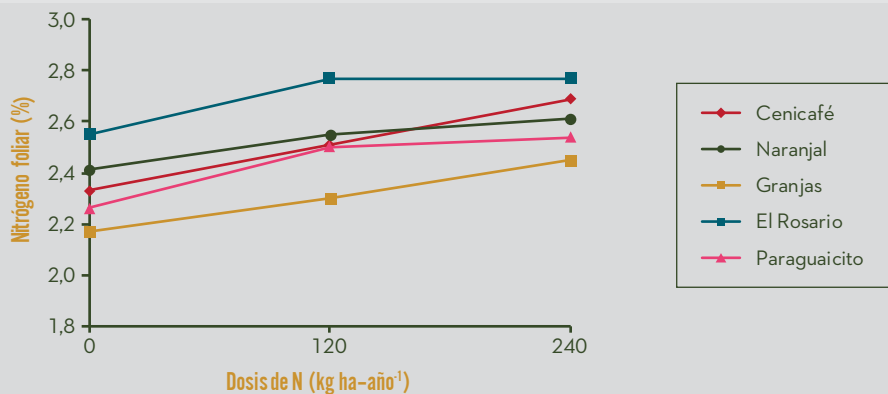


Figura 66. Concentraciones foliares de nitrógeno en función de dosis del elemento. Adaptado de Valencia y Arcila (1977).

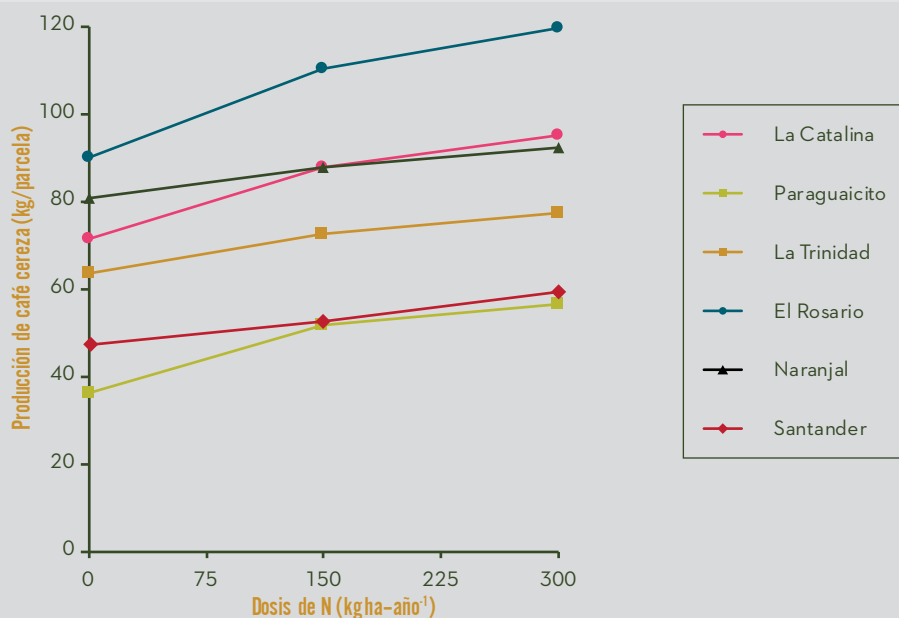


Figura 67. Producción de café cereza (c.c.), variedad Colombia, en respuesta a la aplicación de nitrógeno. Adaptado de Sadeghian (2005).

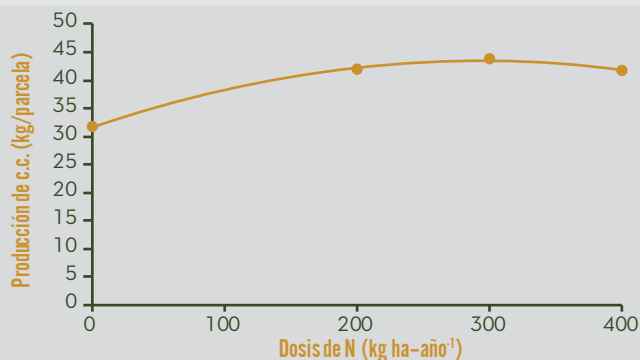
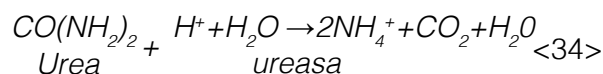


Figura 68. Producción de café cereza (c.c.) en respuesta a dosis de nitrógeno en la Estación Experimental El Rosario (Venecia, Antioquia). Tomado de Cenicafé (2012, p. 40).

de producción. Las lecturas con el SPAD no permitieron determinar con exactitud la necesidad de realizar ajustes a la fertilización nitrogenada; a su vez, los valores promedio de IVDN disminuyeron con el incremento de la edad del cultivo, expresando el vigor de las plantas. Aunque la producción acumulada presentó una respuesta de tipo lineal con respecto a las dosis de N, la diferencia entre la dosis de 300 y 375 kg fue baja (Figura 71).

Pérdidas de nitrógeno por volatilización y lixiviación

Dos de las consideraciones en la eficiencia de la aplicación de N tienen que ver con la volatilización y la lixiviación, aspectos que se relacionan, entre otros, con el tipo de fertilizante. Aunque la volatilización ocurre independiente de la fuente de N, su magnitud es mayor para la urea. Cuando esta fuente entra en contacto con la superficie del suelo, se hidroliza para formar amonio (NH_4^+) por acción de la enzima ureasa, mediante la siguiente reacción (Ecuación <34>):



Posteriormente, se favorece la formación de amoníaco (NH_3), que luego se libera a la atmósfera, generando la pérdida del elemento (Ecuación <35>), así:



La magnitud de la pérdida depende del clima (temperatura, lluvia y viento), el suelo (pH, CIC, MO) y el manejo del fertilizante (forma de aplicación y dosis).

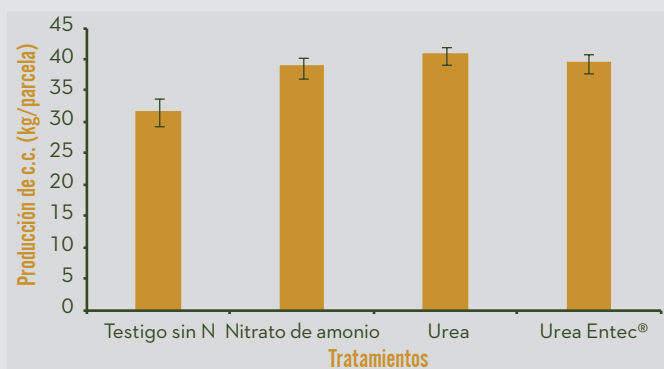


Figura 69.

Producción de café cereza (c.c.), obtenida en respuesta a tres fuentes de nitrógeno en la Estación El Rosario (Venecia, Antioquia). Valores promedio de tres dosis de cada fuente (100, 200 y 400 kg ha-año⁻¹).

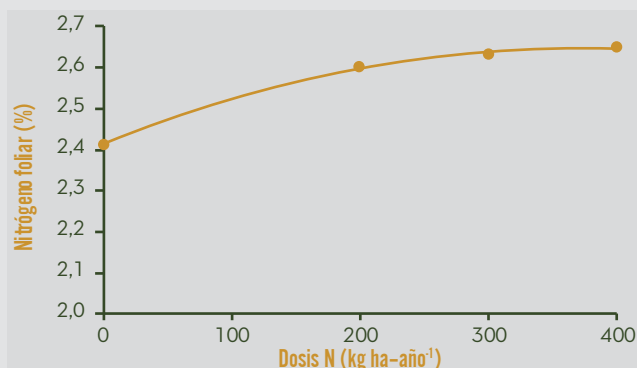


Figura 70.

Concentración foliar de nitrógeno en respuesta a la fertilización nitrogenada. Datos obtenidos en la Estación Experimental El Rosario (Venecia, Antioquia). Tomado de Cenicafé (2014, p. 45).

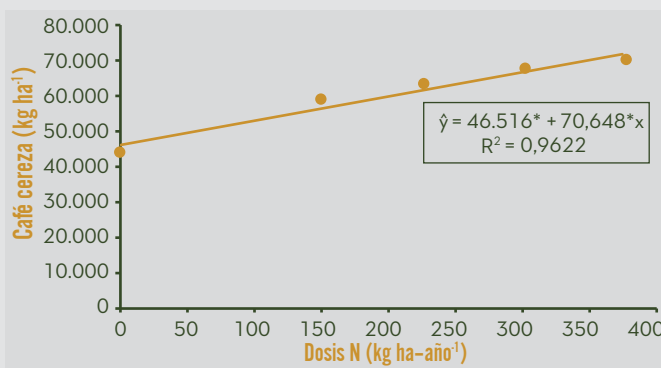


Figura 71.

Producción acumulada de café cereza en respuesta a dosis de nitrógeno, obtenida en la Estación Experimental Paraguaicito (Buenavista, Quindío). Tomado de Rendón y Sadeghian (2018).

Cuando se aplican dosis relativamente altas de N, las pérdidas por volatilización pueden variar entre 30% y 35% del total suministrado, lo anterior cuando se emplea urea prilled durante la etapa de producción de café (Figura 72). En este caso, las mayores pérdidas ocurren durante los primeros cinco días después de la aplicación (entre 23 y 27%) (Leal et al., 2007).

Cuando se emplea urea prilled durante la etapa de establecimiento de café, se puede perder por volatilización cerca del 28%, mientras que, al emplear otras fuentes, como el sulfato de amonio, las pérdidas no superan el 2% (González & Sadeghian, 2012b).

Con el fin de generar alternativas para mitigar la volatilización de N, se han evaluado diferentes fuentes, dosis y formas de la aplicación del elemento (González et al., 2015); al respecto, las pérdidas se reducen con la incorporación de la urea al suelo, así mismo, al emplear urea granular en vez de urea *prilled* (debido al mayor tamaño de partículas de la primera), y con la aplicación de la urea en disolución o mediante la mezcla urea y SAM (Figura 73). Otro mecanismo consiste en disminuir la dosis de la urea por unidad de área (Figura 74), lo cual se logra mediante una mayor dispersión de los granos del fertilizante. Se sabe también que un contenido adecuado de humedad en el suelo aminora la magnitud del fenómeno; de allí que la aplicación se realice al iniciar las épocas de lluvia y no durante las temporadas secas. Una recomendación que se da de manera general para evitar la volatilización de los fertilizantes nitrogenados consiste en evitar su mezcla con cales; al respecto, se demostró que la urea aplicada sobre una superficie recién encalada se volatiliza de manera similar a cuando se aplica sin presencia de cal (Figura 75).

En cuanto a las pérdidas por lixiviación, se ha demostrado que existen diferencias entre los suelos de la zona cafetera de Colombia (Figura 76), en particular debido a su mineralogía de arcilla, contenido de MO y pH, antes que a la textura del suelo (Arias et al., 2009). Con respecto a las fuentes, se han registrado mayores pérdidas al emplear SAM, seguido por nitrato de amonio y, por último, la urea (González & Sadeghian, 2012a) (Figura 77).

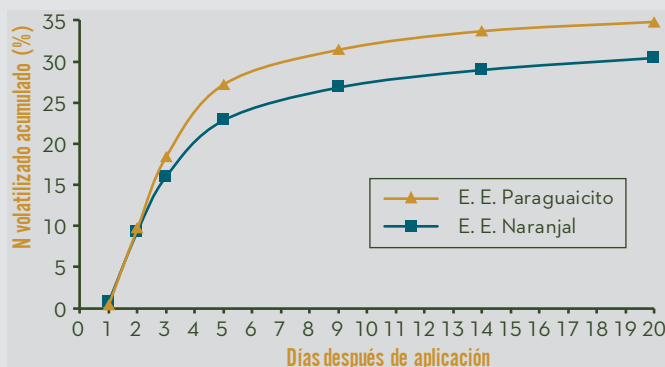


Figura 72. Pérdida acumulada de N por volatilización a través del tiempo en dos Estaciones Experimentales de Cenicafe. Tomado de Leal et al. (2007).

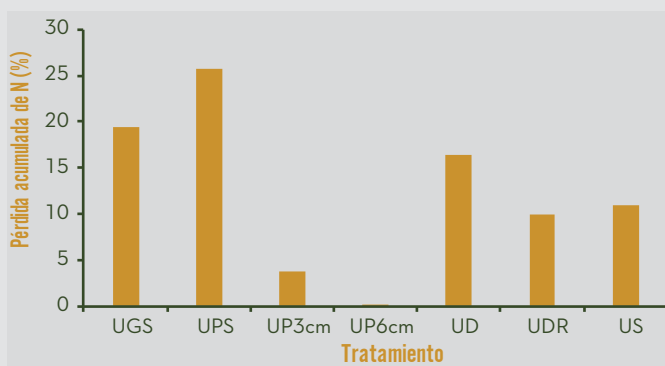


Figura 73. Volatilización de N a partir de algunas alternativas de manejo. UGS: Urea granular aplicada en la superficie, UPS: Urea *prilled* aplicada en la superficie, UP3cm: Urea *prilled* incorporada a 3 cm de profundidad, UP6cm: Urea *prilled* incorporada a 6 cm de profundidad, UD: Urea disuelta en agua, UDR: Urea en dosis reducida, US: Urea 2/3 y SAM 1/3. Adaptado de González et al. (2015).

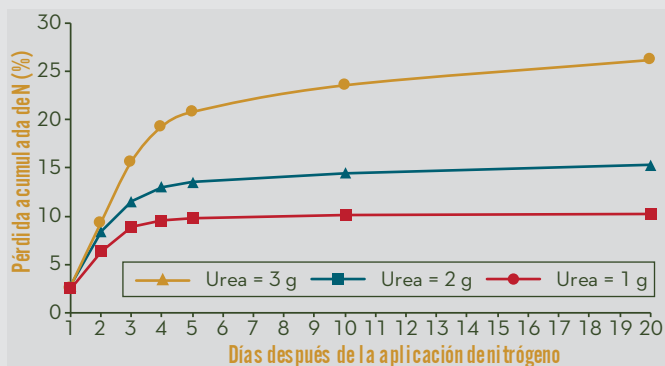


Figura 74. Pérdidas de nitrógeno por volatilización en respuesta a dosis de la urea. Tomado de González et al. (2015).

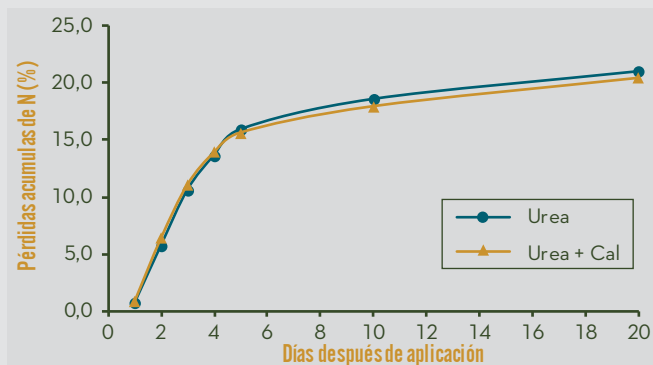


Figura 75. Pérdidas de nitrógeno por volatilización a través de tiempo, en respuesta a la aplicación de la urea con y sin encalamiento. Tomado de González et al. (2015).

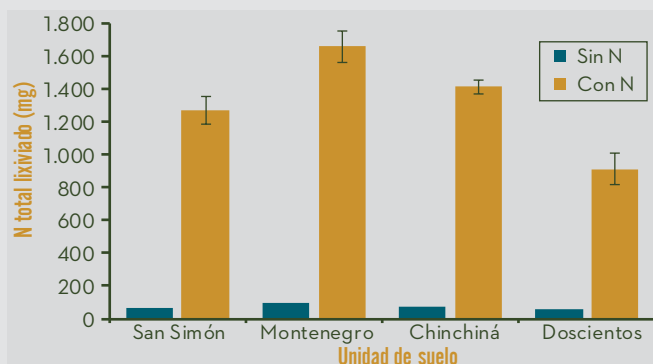


Figura 76. Pérdida de nitrógeno por lixiviación, generada por la aplicación de la urea, en cuatro unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Tomado de Arias et al. (2009).

El balance entre las pérdidas por volatilización y lixiviación determinan, en buena medida, la eficiencia de la fertilización con N. En el caso de la volatilización, son mayores las pérdidas por la urea, pero tratándose de la lixiviación, las fuentes nítricas, tales como nitrato de calcio, nitrato de magnesio y nitrato de amonio, presentan más pérdidas. En consecuencia, la producción de café será la misma cuando se emplee urea o nitrato de amonio, como se muestra en la Figura 69. Lo anterior también se corroboró al comparar la producción obtenida a partir de la mezcla de fertilizantes simples (urea, DAP y KCl) y el fertilizante complejo granulado 17-6-18-2, el cual contiene tanto N nítrico como amoniacal (Sadeghian et al., 2007a) (Figura 78).

Fósforo

De los macronutrientes primarios, el fósforo (P) es el menos absorbido por las plantas de café durante todas las etapas fenológicas; incluso, las cantidades acumuladas son menores a las del calcio y comparables con las del magnesio (Riaño et al., 2004). Durante los siguientes 2.000 días luego de la siembra en el campo, la variedad Colombia extrae aproximadamente 51 kg ha⁻¹ de este nutriente y, con respecto a la Variedad Castillo®, se estiman 55 kg ha⁻¹ durante los primeros cuatro años.

Un fruto de la Variedad Castillo® llega a acumular entre 0,54 y 0,87 mg de P, según

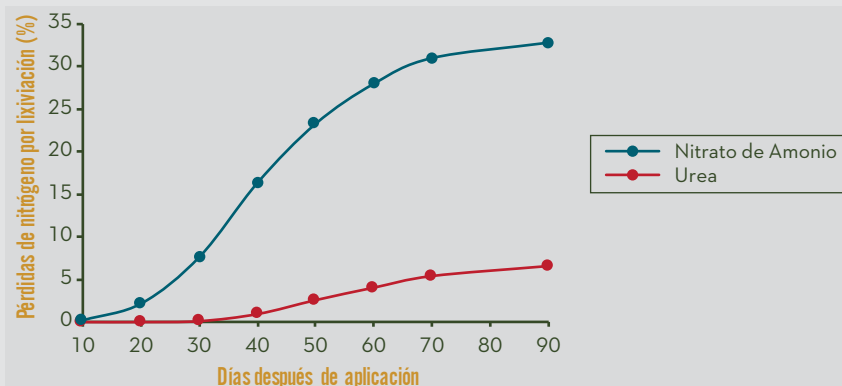


Figura 77. Pérdidas de nitrógeno por lixiviación a través del tiempo, en suelo de la unidad Chinchiná. Tomado de González y Sadeghian (2012a).

la biomasa alcanzada al momento de la cosecha, la cual depende de las condiciones predominantes del sitio (Sadeghian et al., 2012). En promedio, la cantidad de P exportado a través de la cosecha es de 2,3 kg por cada 1.000 kg de café almendra, es decir, 100 arrobas de c.p.s. (Sadeghian et al., 2007b). Durante la formación del fruto, las concentraciones foliares de P presentan algunas variaciones a través del tiempo, sin que se puedan asociar estos cambios con la movilización del elemento en el proceso del llenado de fruto (Figura 79).

El fósforo en el suelo

En muchos de los suelos de la zona cafetera de Colombia, la disponibilidad de fósforo es relativamente baja (Sadeghian & Duque, 2017), condición que tiene su causa en el origen de los mismos y las particularidades en la dinámica del elemento. Los Andisoles presentan un alto poder de fijación de P; por ejemplo, los suelos de la unidad Chinchiná pueden retener entre 1.500 y 3.000 mg kg⁻¹ de este elemento (López, 1960). Resultados parcialmente similares han sido reportados para las unidades cartográficas Fresno, Chinchiná, Montenegro, Fondesa, Quindío y Malabar (1.900, 1.800, 1.300, 1.200, 1.100 y 600 mg kg⁻¹, respectivamente) (Bravo & Gómez, 1974).

En un estudio desarrollado con suelos procedentes de 14 departamentos de Colombia, se hallaron valores de la capacidad máxima de fijación de P entre 233 y 3.181 mg kg⁻¹ (Figura 80), los cuales se correlacionaron positivamente con los contenidos de MO y de arcillas amorfas. Aunque los Andisoles retuvieron una mayor cantidad de P, el grado de la afinidad por el elemento varió entre estos, resultado que confirma lo obtenido por los otros autores (Díaz & Sadeghian, 2018).

En contraste con lo anterior, algunos suelos de la zona cafetera de Colombia ofrecen baja retención de P, como ocurre en muchas áreas cultivadas en el departamento del Huila. Este hecho sugiere que, al suministrar el nutriente

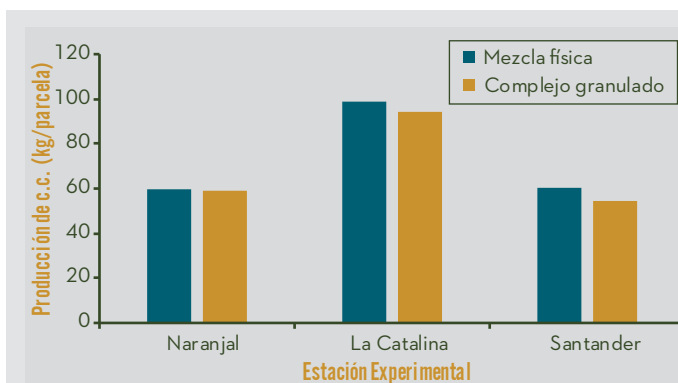


Figura 78. Producción de café cereza (c.c.) en respuesta a la aplicación de fertilizantes compuestos en mezcla física y complejo granulado, en tres Estaciones Experimentales de Cenicafé. Tomado de Sadeghian et al. (2007a).

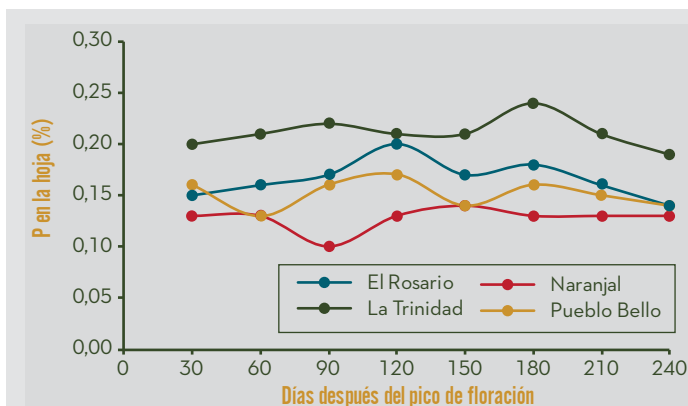


Figura 79. Concentraciones foliares de fósforo en función del tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé. Valores observados en el tercero o cuarto par de hojas de las ramas productivas de café, tomado de Sadeghian et al. (2012).

vía fertilización, la mayor parte quedará disponible para las plantas; adicionalmente, en el estudio que dio origen a los anteriores resultados pudo identificarse a la MO y al porcentaje de saturación de aluminio como las propiedades que más contribuyen a la fijación de P, mientras que con el aumento de las bases intercambiables ocurre lo contrario. En suelos ácidos, donde se presentan bajos

contenidos de calcio, magnesio y potasio en la fase intercambiable, y predominio de aluminio, se encontró una mayor fijación de P (Figura 81).

Con respecto a la lixiviación, se ha demostrado que en suelos derivados de cenizas volcánicas las pérdidas son insignificantes (menos del 1%) y, en los demás suelos, aún en los arenosos, como los de la unidad San Simón, no superan el 10% (Arias & Sadeghian, 2011) (Figura 82). Una parte considerable del nutriente aplicado se queda en los primeros 5 cm, sin alcanzar profundidades mayores a 15 cm.

La concentración de P en la solución es muy baja con respecto a los demás aniones presentes, incluso, puede que no se detecte en los análisis de laboratorio (Hincapié & Henao 2008). En concordancia, se reportan valores más bajos de fosfatos con respecto a cloruros, nitratos, nitritos y sulfatos, aún después de haber aplicado este nutriente (Sadeghian, 2012) (Figura 83). Lo anterior explica la aparición de los síntomas de deficiencias de P durante los años de evento climático La Niña, a pesar de haberlo incluido en los planes de fertilización. Aunque las pérdidas de P por lixiviación son bajas, la solución del suelo puede quedarse desprovista a consecuencia de las constantes lluvias (Sadeghian et al., 2015).

Dosis y fuentes de fósforo

La respuesta al suministro de fósforo guarda una relación inversa con la edad de la planta. Durante la etapa de almácigo, cuando el sistema radical es incipiente, hay una alta respuesta a la fertilización localizada de P, pues así se eleva considerablemente el contenido del nutriente en el área cercana a la raíz, especialmente en los primeros 5 a 10 cm de profundidad (Arias & Sadeghian, 2011). Un efecto similar puede obtenerse al incorporar suficiente fertilizante al suelo (Figura 84). Referente a las fuentes fertilizantes, los fosfatos mono y diamónico (MAP y DAP) generan mayor acidez residual que otras fuentes que no contienen N amoniacal, por ejemplo, los superfosfatos simples y triples (Ávila et al., 2010).

Para la etapa de establecimiento, sólo se reporta respuesta significativa para dos de las siete localidades en donde se evaluó el efecto de la aplicación de P (0, 40 y 80 g/planta de P_2O_5); al respecto, la relación encontrada entre la producción y la cantidad de P aplicada, se ajustó a un modelo cuadrático (Mestre, 2000).

Con respecto a la fase reproductiva, el suministro de dosis crecientes de P de 0, 120 y 240 kg ha-año⁻¹ de P_2O_5 , evaluado para las variedades Caturra y Borbón, ha tenido efectos significativos en casos aislados y de poca magnitud (Figura 85). La efectividad de la aplicación de fósforo ha sido corroborada en las concentraciones foliares del elemento, sin que ello se refleje en la producción, aún en los sitios donde el nivel de P en las hojas es bajo (Valencia & Arcila, 1977) (Figura 86). En cuanto a la interacción con otros elementos, se sabe que la fertilización nitrogenada reduce las concentraciones foliares de P (Valencia & Arcila, 1977; Sadeghian, 2011); de allí las medidas que deben tenerse en cuenta, en particular la racionalización en el uso de N y la aplicación de P en suelos deficientes en este nutriente.

En seis Estaciones Experimentales de Cenicafé, Uribe (1983) evaluó la respuesta de café variedad Caturra a la aplicación de las siguientes combinaciones de P y pulpa descompuesta, durante cuatro a cinco cosechas: i) fertilizante del grado 12-6-22, ii) fertilizante 12-0-22, iii) fertilizante 12-6-22 + 17% de pulpa y iv) fertilizante 12-0-22 + 17% de pulpa. Los fertilizantes químicos se aplicaron a razón de 200 y 600 g/planta en el primero y segundo año, lo que corresponde a 900 y 2.666 kg ha-año⁻¹, respectivamente. La pulpa se adicionó descompuesta y con 12% de humedad. Sólo en algunos casos, el fósforo tuvo un efecto positivo en la producción de café, pero este fue de baja magnitud (Figura 87). En ninguna de las localidades la pulpa descompuesta influyó en la producción, comportamiento que se relacionó con las bajas dosis utilizadas (aproximadamente 100 g/planta al año).

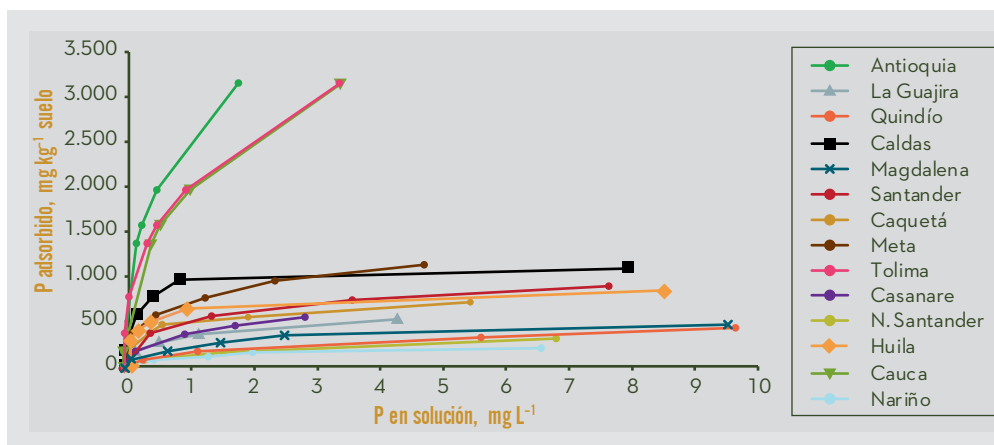


Figura 80. Isotermas de adsorción de P en suelos representativos de la zona cafetera de Colombia. Tomado de Díaz y Sadeghian (2018).

Referente a la sombra, los resultados obtenidos durante cuatro cosechas en 20 cafetales al sol y 12 bajo semisombra, no revelaron efecto de la aplicación de P (Figura 88), sólo en suelos con niveles del elemento menores de 10 mg kg^{-1} disminuyó el rendimiento de manera parcial.

Potasio

Los requerimientos de potasio (K) en café son altos y comparables con los de nitrógeno. Como es de esperarse, en la fase vegetativa del cultivo la extracción de este elemento es baja, aproximadamente 25 g/planta , pero, conforme avanza en el tiempo se incrementa, hasta alcanzar valores cercanos a los 500 kg ha^{-1} , una vez finalizada la cuarta cosecha, es decir, 5,5 años después de la siembra en el campo (Riaño et al., 2004). Para la Variedad Castillo® se presentan valores hasta de 800 kg ha^{-1} a los 60 meses después de establecimiento en el campo (Cenicafé, 2020, p.129).

En el fruto, particularmente en la pulpa, el K es el elemento predominante (Sadeghian et al., 2007b), que la convierte después de la cosecha y beneficio del grano, en un excelente abono para suplir las necesidades nutricionales de las plantas durante todas las etapas de su desarrollo, en especial el almácigo. Una vez transcurridos 60 a 90 días de la antesis, se presenta una alta

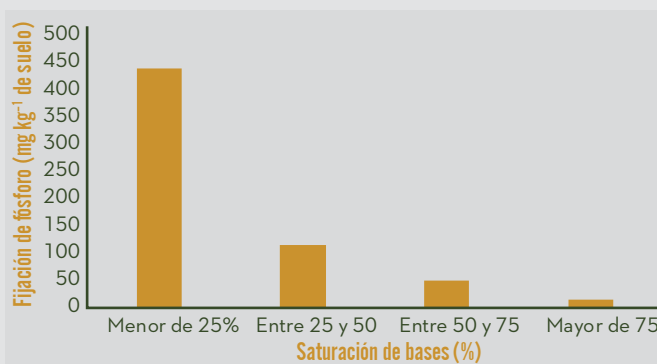


Figura 81. Fijación de fósforo en función del porcentaje de saturación de bases intercambiables. Tomado de Sadeghian et al. (2019).

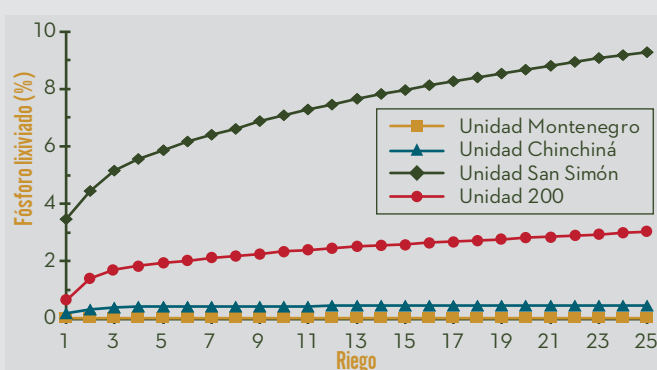


Figura 82. Pérdidas acumuladas de fósforo por lixiviación, en cuatro unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Riegos realizados cada cuatro días. Tomado de Arias y Sadeghian (2011).

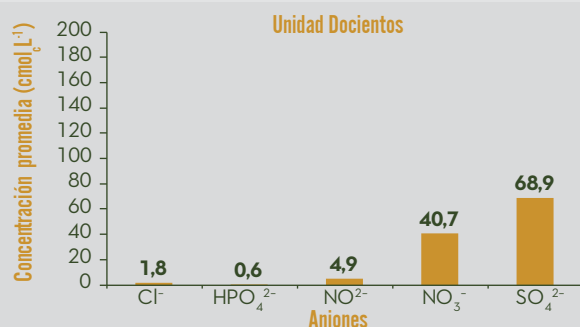


Figura 83.

Valores promedio de las concentraciones de aniones en la solución de tres suelos de la zona cafetera de Colombia (n=27). Tomado de Sadeghian (2012).

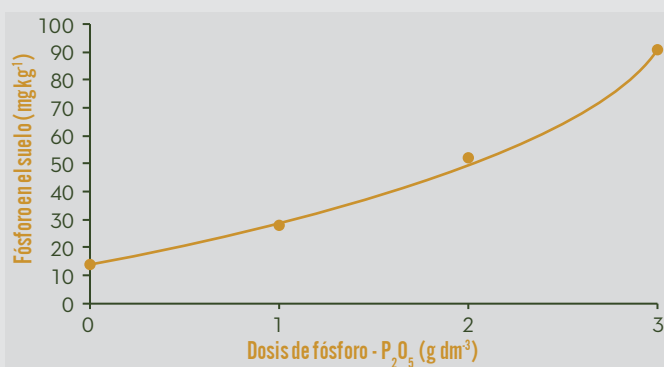
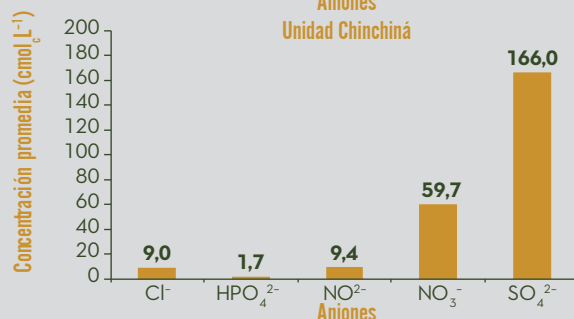
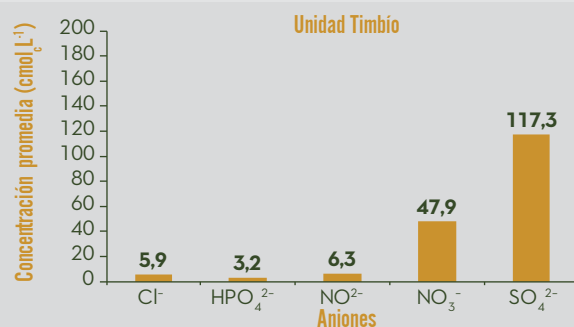


Figura 84.

Contenido de fósforo del suelo en función de la dosis del elemento, incorporado en un Andisol del departamento de Cauca. Datos de la Disciplina de Suelos, sin publicar.

demanda de K por el fruto, parte de la cual se satisface con las reservas contenidas en el tallo y las hojas, principalmente las más próximas al fruto; sin embargo, puede ocurrir una movilización de este elemento desde las hojas más nuevas (tercero o cuarto par), que se traduce en la reducción de su concentración (Figura 89).

Potasio en el suelo

Los suelos de la zona cafetera de Colombia presentan una alta variabilidad en sus contenidos de K, en especial las fracciones disponibles, es decir, el intercambiable y el que se encuentra en la solución. Con respecto al K intercambiable, en los departamentos de Boyacá, Caquetá, Casanare, Magdalena, Meta, Norte de Santander y Putumayo, más del 80% de las muestras analizadas durante los últimos años presentan contenidos bajos y medios de esta fracción. Para Antioquia, Caldas, Cesar, Chocó, Cundinamarca, Huila, Valle del Cauca y Tolima esta condición ocurre entre el 60% y 80% de los casos y, con respecto al Cauca, La Guajira, Nariño, Quindío y Risaralda, entre el 30% y 60% (Sadeghian & Duque, 2017).

Diversas causas definen la cantidad de K en la fase de cambio, entre ellas, el origen y el tipo del suelo. Los Andisoles pertenecientes a las unidades Chinchiná (Caldas) y Fresno (Tolima) se distinguen por una cantidad muy baja de sitios específicos para retener el K⁺, mientras que en las unidades Líbano (Tolima) y Montenegro

(Quindío), la capacidad de almacenamiento de este catión es más alta, al igual que la unidad Malabar (Quindío) y los Inceptisoles de las unidades Chinchiná (Quindío) y Parnaso (Valle) (Henao & Delvaux, 1998).

En la Figura 90 se presenta la capacidad de 14 unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia para retener el K^+ en la fase intercambiable. Esta capacidad se relaciona estrechamente con la CICE, pues conforme al aumento de esta propiedad, se incrementa la adsorción de K^+ (Sadeghian et al., 2015). La CICE, entre otras variables, depende del pH, así lo corroboran los resultados obtenidos en 75 perfiles de suelos derivados de cenizas volcánicas (Tabla 38). En suelos con valores de pH entre 4,80 y 5,50 (37 perfiles), el K intercambiable varió entre 0,02 a 0,29 $cmol_c kg^{-1}$, en tanto que para valores de pH de 5,60 a 6,00 (38 perfiles) el rango fluctuó entre 0,07 y 2,20 $cmol_c kg^{-1}$.

La aplicación de K en suelos poco selectivos por el elemento se traduce en incrementos reducidos en la fase de cambio, mientras que en aquellos suelos con preferencia por este nutriente ocurre lo contrario; resultado que se verificó al aplicar dosis crecientes de K en siete Estaciones Experimentales de Cenicafé (Figura 91). De acuerdo con la ecuación obtenida por Sadeghian y Álvarez (2011), por cada kilogramo de K (K_2O) aplicado, se presenta un incremento de 0,00105 $cmol_c kg^{-1}$ del elemento (Ecuación <36>):

$$K \text{ intercambiable } (cmol_c kg^{-1}) = 0,132 + 0,00105 \text{ dosis de } K_2O (kg^{-1} ha^{-1} año^{-1}) <36>$$

Con base en los resultados que se presentan en la Figura 91, este valor puede fluctuar entre 0,001 y 0,003 $cmol_c kg^{-1}$.

A su vez, la concentración de K^+ en la solución del suelo tiene una estrecha relación con su contenido en la fase intercambiable, la cual se enriquece con la fertilización. A medida en que el suelo retiene más K^+ , crece su concentración en la solución y se incrementa la absorción del elemento por la planta (Henao & Hernández, 2002; Sadeghian, 2012). Sin embargo, y

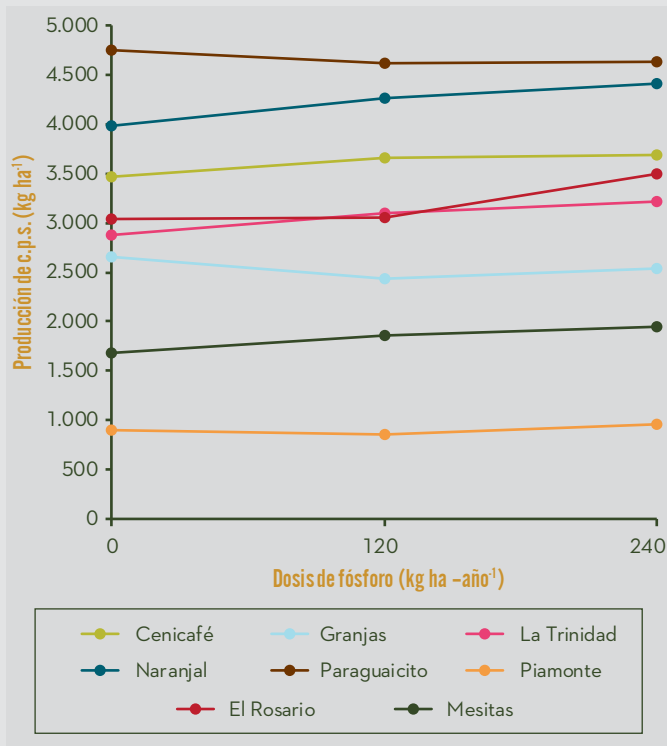


Figura 85. Valores promedio de producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta a la aplicación de fósforo en ocho localidades de Colombia. Adaptado de Uribe y Mestre (1976).

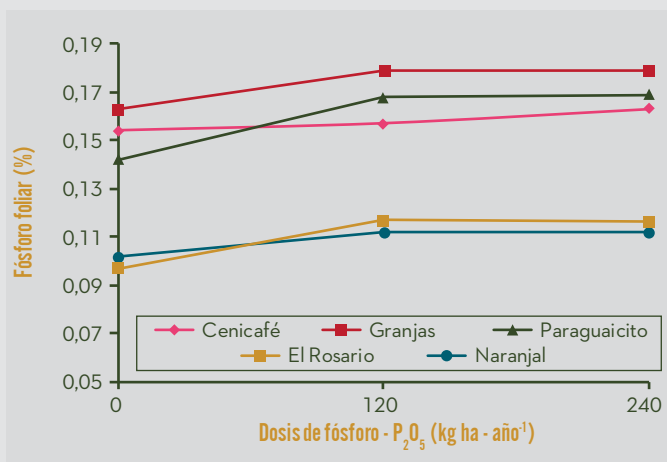


Figura 86. Concentraciones foliares de fósforo en respuesta a dosis del elemento en cinco localidades de Colombia. Adaptado de Valencia y Arcila (1977).

Figura 87.
Producción de café
pergamino seco (c.p.s.), en
respuesta a la pulpa de café
descompuesta y la fertilización
química con y sin fósforo,
en cinco sitios de Colombia.
Adaptado de Uribe (1983).

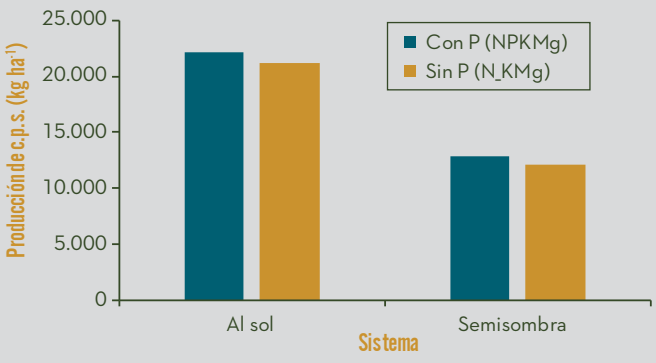
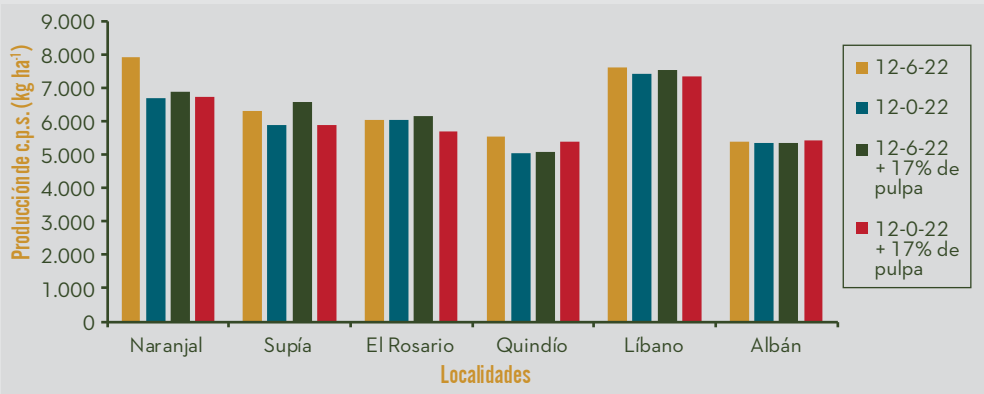


Figura 88.
Producción de café cereza (c.c.) en respuesta al suministro
de fósforo. Valores promedio de cuatro cosechas para
20 plantaciones al sol y 12 bajo semisombra. Tomado de
Sadeghian (2009).

dadas las diferencias que existen entre los
suelos para retener el K⁺ en la fase de cambio,
ocurren disimilitudes en la concentración de
K⁺ en la solución del suelo y en las hojas de
café (Figura 92).

La fertilización nitrogenada constituye
una de las causas de la pérdida de K⁺,
particularmente cuando se emplean fuentes
que contienen amonio o aquellos fertilizantes
que generan este ion. Para sistemas de café
al sol y bajo semisombra se ha evidenciado
que la fertilización potásica contribuye a
incrementar los niveles de K⁺, mientras que
la aplicación de los fertilizantes nitrogenados
los reduce (Figura 93), consecuencia
que se traduce en una disminución en la

Tabla 38.
Rangos de K intercambiable, según valores de pH, en suelos derivados de cenizas volcánicas de la zona cafetera
de Colombia. Tomado de Luna y Suárez (1978).

Departamento	K intercambiable (cmol _e kg ⁻¹)	
	pH 4,80 a 5,50	pH 5,60 a 6,00
Antioquia	0,09-0,25	0,19-0,40
Caldas	0,02-0,2	-
Cundinamarca	0,09-0,14	0,18-2,20
Nariño	0,06-0,18	0,09-0,78
Quindío	0,09-0,29	0,07-1,20
Risaralda	0,02-0,20	-
Tolima	0,15-0,24	-
Valle del Cauca	0,05-0,20	0,11-0,90

concentración de K foliar (Sadeghian, 2011). La magnitud en las pérdidas del K⁺ depende de las propiedades del suelo y las dosis de N suministradas, como se muestra en la Figura 94 para dos suelos de la zona cafetera de Colombia.

La pérdida de K⁺ por lixiviación ha sido uno de los aspectos a tener en cuenta para buscar alternativas conducentes a mejorar la eficiencia de fertilización con este nutriente. Se ha demostrado que la magnitud de la lixiviación depende de la mineralogía de los suelos y la CICE, antes que la textura (Sadeghian & Arias, 2018). Otro problema asociado es la acidez, cuyo manejo a través del encalamiento contribuye a una mayor retención de K⁺ (Sadeghian, 2016).

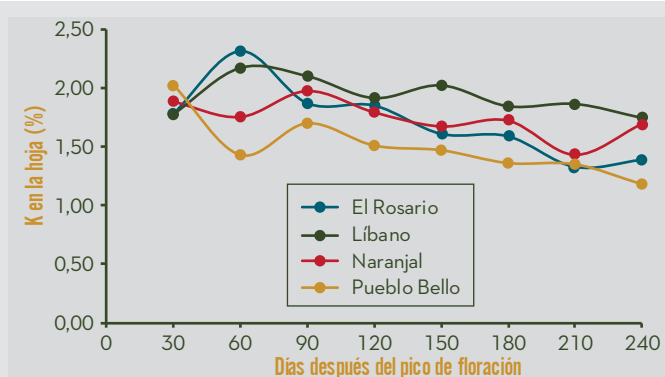


Figura 89. Concentraciones foliares de potasio en función de tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé. Valores observados en el tercero o cuarto par de hojas de las ramas productivas de café. Tomado de Sadeghian et al. (2012).

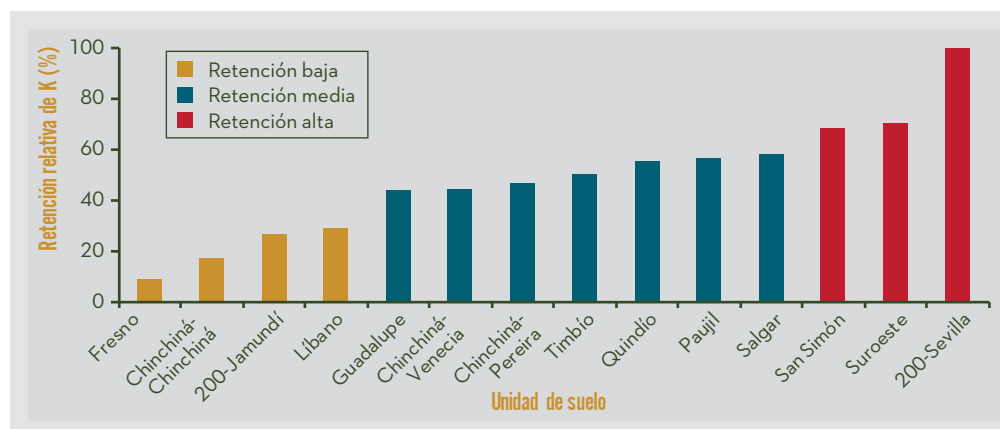


Figura 90. Retención relativa de potasio en 14 unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Sadeghian (2012). Se toma como referente (100%), la unidad 200 en Sevilla (Valle del Cauca).

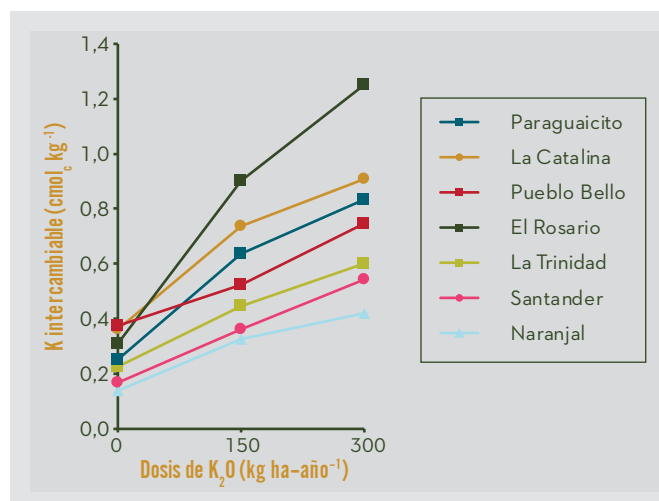


Figura 91. Potasio intercambiable en respuesta a dosis del elemento en siete Estaciones Experimentales de Cenicafé.

Figura 92.

Efecto de la aplicación de potasio (K) en la concentración del elemento en la solución del suelo (A.) y en las hojas de café durante la etapa de almácigo (B.), en tres unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Sadeghian (2012).

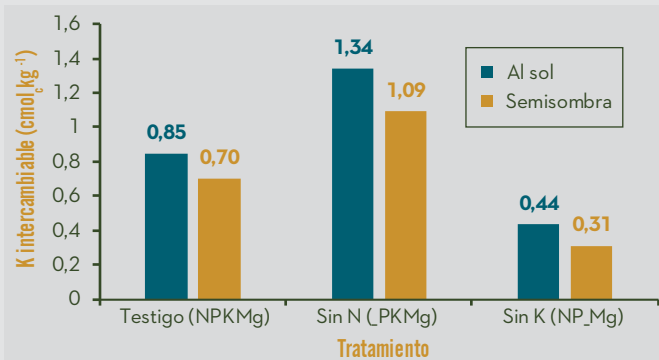
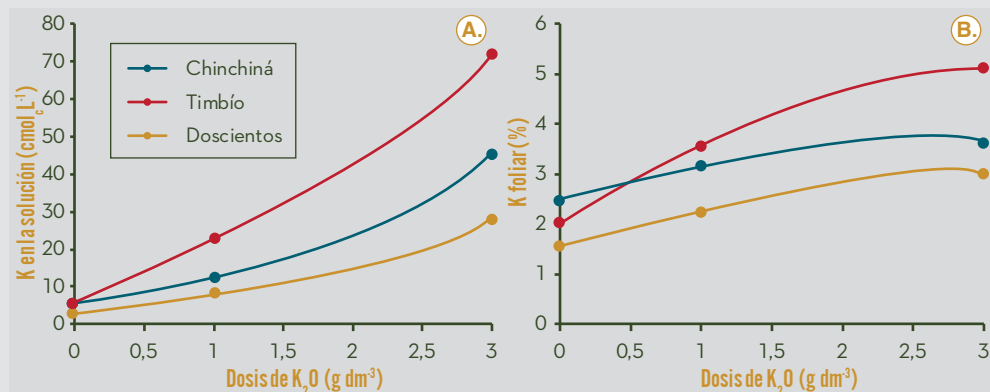


Figura 93.

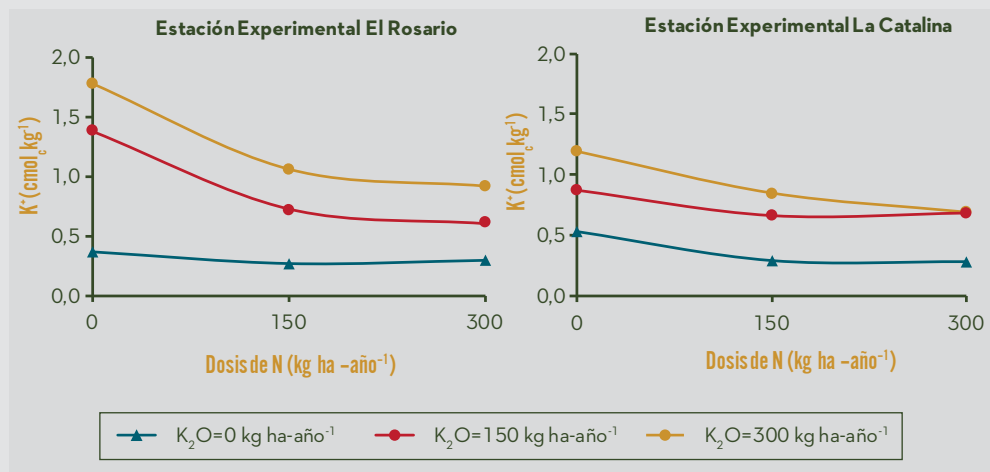
Potasio intercambiable en función de la fertilización nitrogenada y potásica. Valores promedio de 12 plantaciones bajo semisombra y 20 al sol. Tomado de Sadeghian (2009).

Para condiciones de laboratorio, se reportan pérdidas entre 30% y 97% de la cantidad aplicada (Sadeghian & Arias, 2018) (Figura 95). Pese a lo anterior, se ha comprobado que, una cantidad importante de K lixiviado, es retenido en el subsuelo y, por lo tanto, no se pierde totalmente para el cultivo de café, cuando se realizan aplicaciones de este elemento (Gómez et al., 1982), comportamiento que también fue corroborado por Hincapié y Henao (2008), quienes detectaron pérdidas muy bajas de K⁺ en el campo (Figura 96).

Diferentes estrategias para reducir las pérdidas de K⁺ por lixiviación han sido estudiadas, entre ellas, las fuentes fertilizantes. Al respecto, se ha demostrado

Figura 94.

Contenido de potasio intercambiable (K⁺) en respuesta a la aplicación de nitrógeno suministrado como urea en dos Estaciones Experimentales de Cenicafé.



que las mayores pérdidas pueden presentarse al emplear KCl y nitrato de potasio “prilled” o estándar. Cuando se utiliza el sulfato de potasio, las cantidades lixiviadas se reducen, en respuesta a la menor solubilidad de esta fuente (Figura 97).

Dosis y fuentes de potasio

La respuesta del café a la fertilización con K depende de la fertilidad del suelo y los requerimientos del cultivo, los cuales se incrementan al pasar de la fase de establecimiento a la productiva. Los resultados obtenidos para la etapa de crecimiento vegetativo sugieren que la fertilización potásica no afecta la producción de café (Mestre, 2000; Hernández & Suárez, 2002). Pese a lo anterior, las plantas pueden manifestar síntomas de deficiencias desde temprana edad, cuando se establecen en suelos con bajos contenidos de este elemento, caso en el que la fertilización con este nutriente puede realizarse de manera anticipada a la época indicada en la recomendación (antes de los 10 meses después de la siembra en el campo).

Una condición diferente a la fase de establecimiento se presenta para la etapa de producción. Con base en la frecuencia y la magnitud de la respuesta al suministro de los nutrientes, el K ocupa el segundo lugar después del N (Sadeghian, 2009); al respecto, en suelos muy deficientes pueden presentarse reducciones de la producción mayores del 30%.

Los resultados obtenidos para las variedades Borbón y Caturra, establecidas en bajas densidades de siembra, indican respuesta significativa a la fertilización potásica (Figura 98), en particular cuando son bajos los niveles del nutriente en el suelo (Uribe & Mestre, 1976). La estimación realizada para estas condiciones, sugiere aplicar dosis entre 53 y 240 kg ha-año⁻¹ de K₂O (Mestre, 2000). Aunque el incremento en la dosis del fertilizante potásico aumenta las concentraciones foliares del elemento, la magnitud de la respuesta presenta variaciones en las localidades (Figura 99).

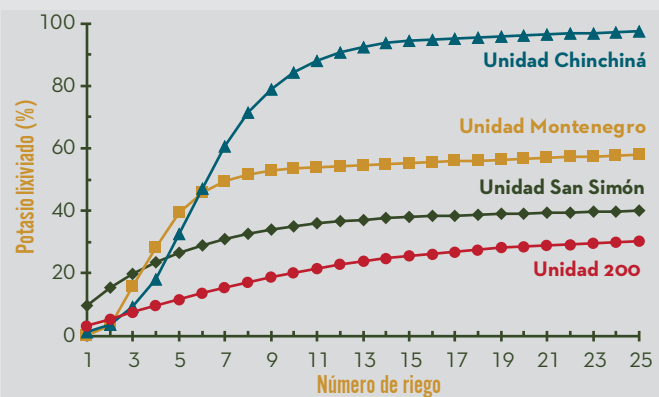


Figura 95.

Pérdidas acumuladas de potasio por lixiviación, en cuatro unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Tomado de Sadeghian y Arias (2018). Riegos realizados cada 4 días.

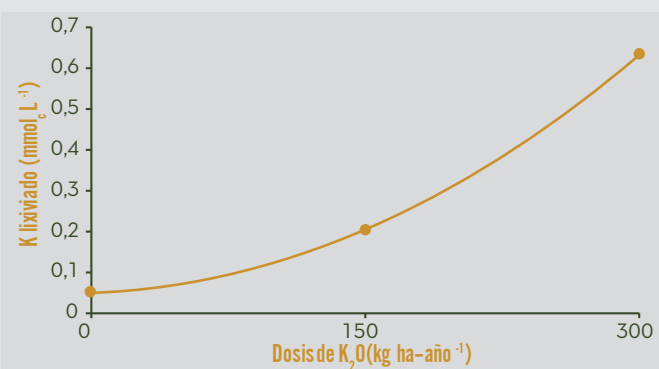


Figura 96.

Concentración de potasio (K) en las aguas de percolación, en respuesta a la fertilización con dosis crecientes de KCl (promedio de tres muestreos, realizados a los 21, 49 y 105 días después de la fertilización). Adaptado de Hincapié y Henao (2008).

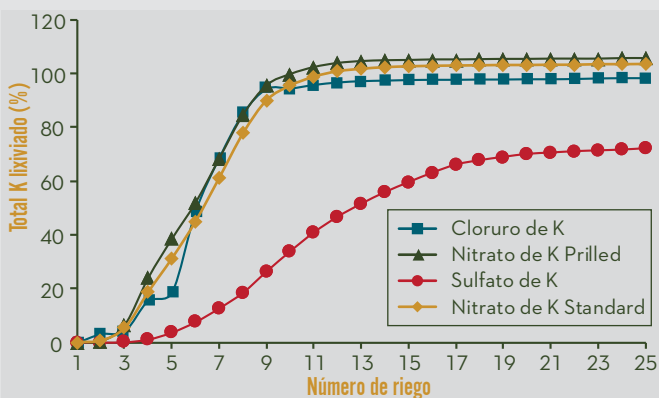


Figura 97.

Pérdidas de potasio (K) por lixiviación a partir de cuatro fuentes. Tomado de Suárez y Carrillo (1984).

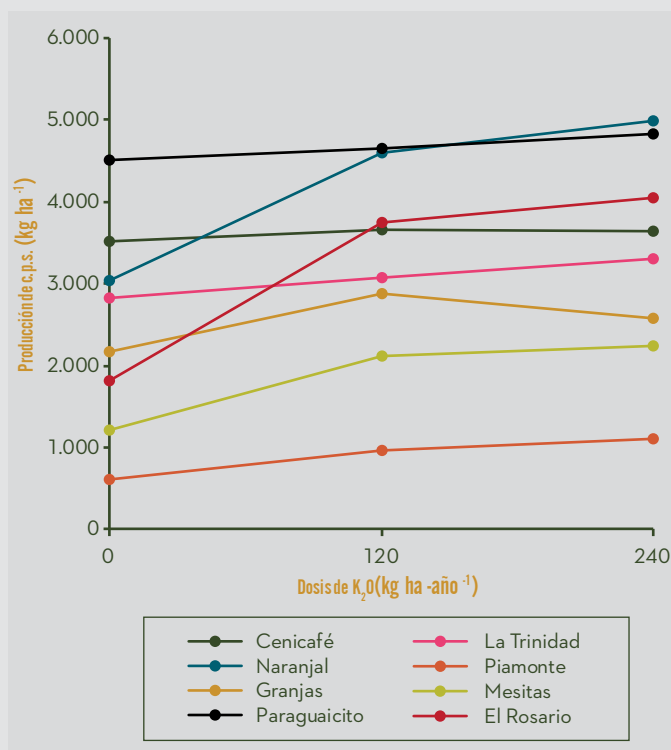


Figura 98.

Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta a la fertilización con potasio en ocho localidades de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Uribe y Mestre (1976).

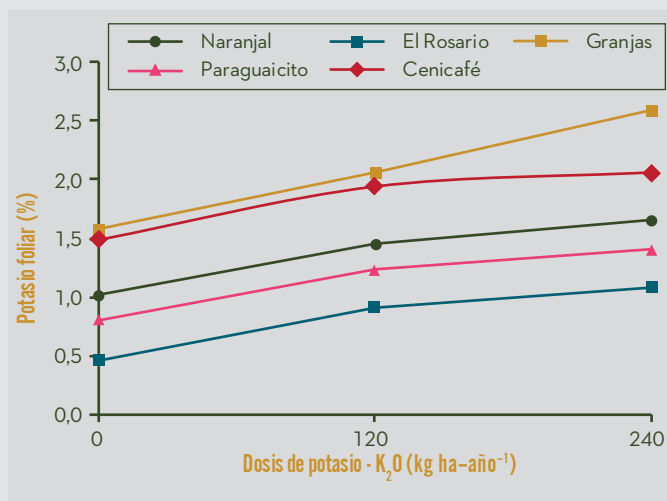


Figura 99.

Concentraciones foliares de potasio en función de dosis del elemento, en cinco localidades de Colombia. Adaptado de Valencia y Arcila (1977).

Para la variedad Colombia, en altas densidades (10.000 plantas/ha), se reporta respuesta a la aplicación de K en tres de los seis sitios en los que se evaluaron dosis equivalentes a 0, 150 y 300 kg ha-año⁻¹ de K₂O (Figura 100). Las tendencias registradas para el promedio de los cuatro años de cosecha se ajustaron a la ecuación cuadrática, cuyo máximo alcanzado sugiere dosis entre 210 y 240 kg ha-año⁻¹ de K₂O (Figura 101).

Un aspecto determinante en la respuesta de café al suministro de potasio es su interacción con otros elementos, concepto que se enmarca dentro de los principios de antagonismo y sinergismo. Por ejemplo, pese a que la aplicación del N favorece las pérdidas de K en el suelo, la fertilización nitrogenada puede llegar a ser determinante para que se presente efecto positivo del suministro de K (Figura 102).

En cuanto a las fuentes de K se refiere, Sadeghian et al. (2006) evaluaron la respuesta de café variedad Colombia a dosis crecientes del nutriente durante cuatro años, suministradas como cloruro y sulfato. La producción máxima obtenida con las dos fuentes fue igual; no así las cantidades requeridas de fertilizante para alcanzarla, siendo mayor cuando se empleó el sulfato (Figura 103). Las características del grano y la calidad de la bebida no se afectaron por las dos fuentes, resultado que coincide con los reportes de Valencia (1979).

Como es de esperarse, existe una relación estrecha entre la disponibilidad de K⁺ en el suelo y la respuesta a la fertilización. Bravo (1978) sostiene que en suelos con contenidos de K intercambiable mayores de 0,35 cmol_c kg⁻¹, la probabilidad de respuesta al suministro de este elemento es muy baja (menor de 5%). Sadeghian (2010) presenta varios modelos para expresar el rendimiento de café, registrado en el experimento de Uribe y Mestre (1976), en función del K intercambiable. De acuerdo a las ecuaciones obtenidas para los modelos *lineal plateau* y *cuadrático plateau*, el nivel crítico sería de 0,34 y 0,43 cmol_c kg⁻¹, respectivamente. Con base en el estudio de calibración de K, realizado por Sadeghian y Álvarez (2011),

la producción de café variedad Colombia se reduce en más del 10% (rendimiento relativo=90%) cuando el nivel de K^+ es menor

de $0,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; entre tanto, para valores mayores a $0,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, no se presenta respuesta a la fertilización.

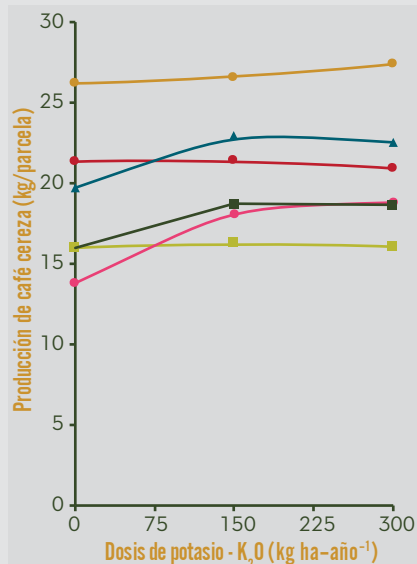


Figura 100.

Producción de café cereza, variedad Colombia, en respuesta a la fertilización con potasio en seis localidades de la zona cafetera de Colombia. Respuesta significativa en las Estaciones La Trinidad (Libano, Tolima), Naranjal (Chinchiná, Caldas) y San Antonio (Floridablanca, Santander). Adaptado de Cenicafé (2005).

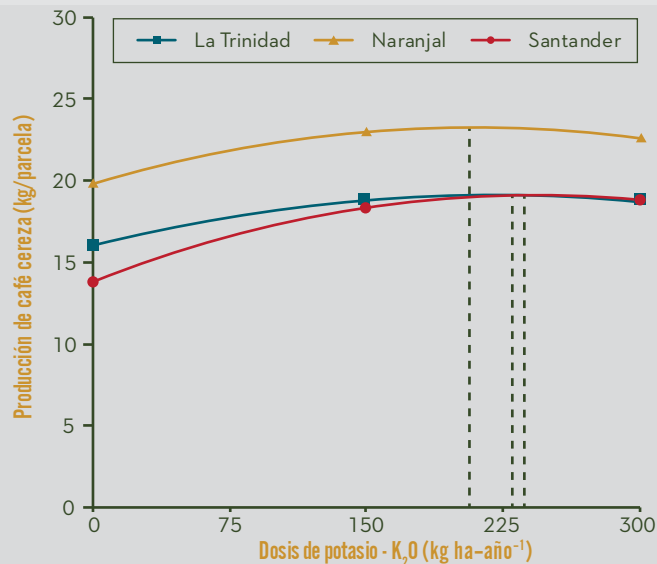


Figura 101.

Dosis de potasio (K_2O) para alcanzar la producción máxima de café cereza, en tres localidades de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Cenicafé (2005).

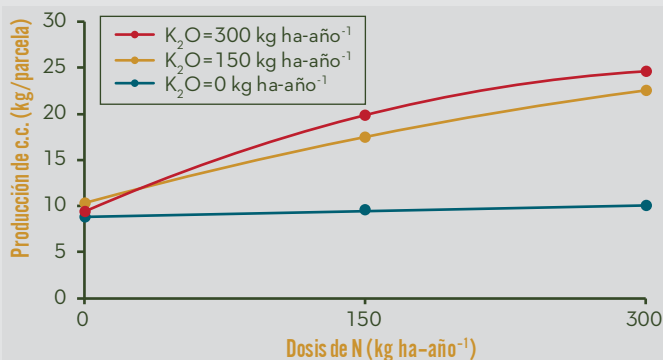


Figura 102.

Producción de café cereza (c.c.) en respuesta a dosis de nitrógeno y potasio, en la Estación Experimental San Antonio (Florida Blanca, Santander). Tomado de Sadeghian (2014).

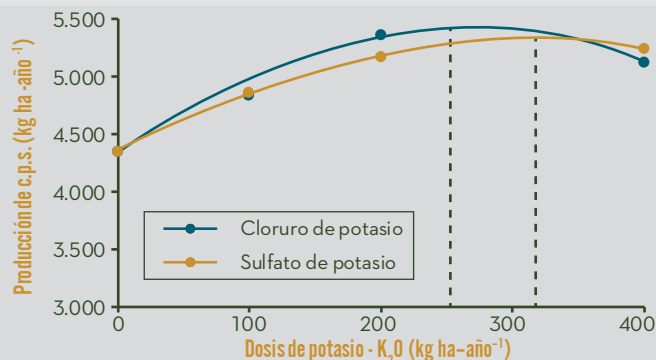


Figura 103.

Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta a dosis y fuentes de potasio. Tomado de Sadeghian et al. (2006).

A close-up photograph of a white flower with yellow stamens, covered in water droplets, set against a dark background. The flower is the central focus, with its petals and stamens clearly visible. The water droplets are of various sizes and are scattered across the flower's surface, adding a sense of freshness and texture. The background is dark and out of focus, which makes the flower stand out. The overall composition is artistic and detailed.

Calcio, magnesio y azufre



Calcio

El calcio (Ca) es el macronutriente secundario más absorbido por las plantas de café durante todas las etapas fenológicas del cultivo; incluso, las cantidades acumuladas son mayores a las del fósforo (P). De acuerdo a las condiciones del sitio, una planta de la variedad Colombia extrae entre 3,8 y 10,6 g de Ca en los primeros 650 días después de la siembra en el campo; cantidad que se eleva a 60 g cuando se cumplen 2.000 días (Riaño et al., 2004). Con respecto de la Variedad Castillo®, la extracción estimada es de 240 kg ha⁻¹ durante los primeros cuatro años. Cabe resaltar que, pese a los requerimientos de Ca, en Colombia rara vez se observan síntomas de su deficiencia, aún en suelos ácidos donde son bajos los niveles de este elemento.

Un fruto maduro de café de la Variedad Castillo® acumula entre 0,84 a 1,11 mg de Ca (Sadeghian et al., 2013); en consecuencia, una producción de 1.000 kg de café almendra, equivalente a 1.250 kg de café pergamino seco y 5.625 kg de café cereza, remueve del suelo cerca de 4,3 kg de este nutriente (Sadeghian et al., 2006).

Calcio en el suelo

Generalmente, los suelos arenosos y aquellos que se ubican en regiones lluviosas, formados a partir de rocas pobres en minerales de Ca, son deficientes en este nutriente. En departamentos como Caquetá, Putumayo, Meta y Casanare, cuyos suelos tienden a ser ácidos, se presentan bajos niveles de Ca²⁺ intercambiable, mientras que, en La Guajira, Valle del Cauca y Magdalena ocurre lo contrario, como se presenta en la Tabla 39 (Sadeghian, 2016).

Con respecto a la selectividad catiónica de los suelos en la zona cafetera de Colombia, las unidades Paujil en Santander y Timbío en Cauca, se caracterizan por su alta capacidad para retener el Ca⁺² en la fase intercambiable, mientras que, en otras, tales como Guadalupe (Huila), Chinchiná (Antioquia y Caldas) y Fresno

Tabla 39.

Frecuencia (%) de muestras de suelos para rangos de calcio intercambiable en la zona cafetera de los departamentos de Colombia.

Departamento	Ca≤0,75	0,75<Ca≤1,5	1,5<Ca≤3,0	3,0<Ca≤4,5	Ca>4,5
Antioquia	27	17	18	11	27
Boyacá	34	16	17	7	26
Caldas	12	16	22	15	35
Caquetá	73	14	8	2	3
Casanare	54	16	16	11	3
Cauca	9	30	26	12	23
Cesar	10	11	14	14	51
Chocó	8	15	19	12	46
Cundinamarca	17	14	19	13	38
Huila	9	13	23	15	40
La Guajira	1	6	7	5	80
Magdalena	3	6	18	18	55
Meta	67	15	11	3	5
Nariño	2	8	14	15	61
Norte de Santander	20	13	16	12	39
Putumayo	70	26	4	0	0
Quindío	7	13	24	19	37
Risaralda	5	12	21	17	45
Santander	25	23	20	10	22
Tolima	8	14	21	16	41
Valle del Cauca	2	5	12	14	68

(Tolima) esta capacidad es menor (Figura 104). Eventualmente, una misma unidad de suelo puede presentar variaciones en su selectividad por el Ca^{2+} , según la región, como sucede con la unidad 200 en los diferentes municipios del Valle del Cauca, por ejemplo, Sevilla y Jamundí. Por regla general, los suelos con mayor Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) retienen más Ca^{2+} , resultado que se refleja en una mayor concentración del elemento en la solución del suelo, sitio desde el cual es absorbido por las raíces de las plantas.

Como un común denominador, en la mayoría de los suelos existe una relación directa entre los contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables, no siempre así entre el Ca^{2+} y K^+ . Aunque esta relación varía según el tipo de suelo y las prácticas de fertilización y encalado, generalmente los niveles de Ca^{2+} son tres a cuatro veces mayores que los del Mg^{2+} , como se aprecia en la Figura 105 (Sadeghian, 2016); a su vez, los contenidos de

Ca^{2+} dependen, en buena medida, de la acidez del suelo (Figura 106).

Entre las prácticas que afectan de manera negativa la disponibilidad de Ca^{2+} en el suelo para las plantas está la fertilización nitrogenada y potásica. El empleo de la urea o fuentes amoniacales, tales como nitrato y sulfato de amonio, además de generar acidificación aumenta la competencia del ion amonio (NH_4^+) en el complejo de intercambio catiónico. Como consecuencia de lo anterior, se incrementan las pérdidas de Ca^{2+} por lixiviación, cuya magnitud varía según el tipo de suelo y los niveles del elemento en la fase de cambio (Figura 107). Un efecto similar sucede con la aplicación de K (Tabla 40).

Dosis y fuentes de calcio

En los suelos ácidos, donde generalmente son bajos los niveles de Ca^{2+} intercambiable,

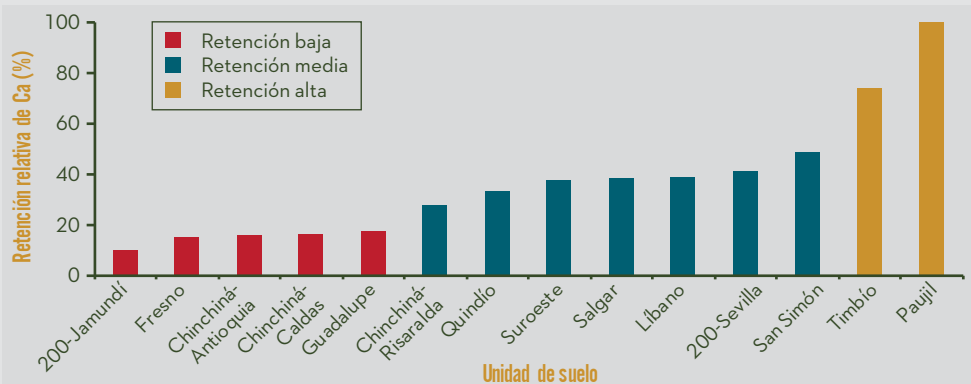


Figura 104. Retención de calcio en 14 unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Sadeghian (2012). Se toma como referente (100%), la unidad Paujil.

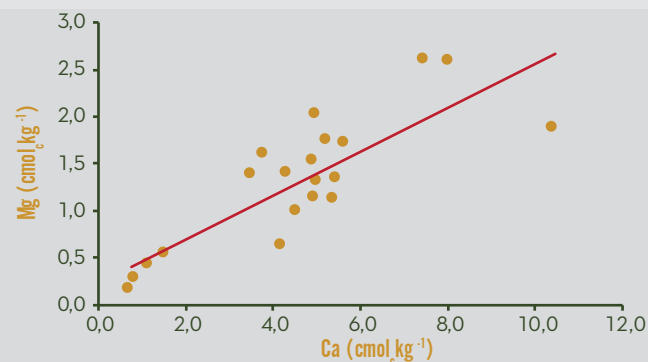


Figura 105. Relación entre los contenidos de calcio y magnesio intercambiables. Cada punto corresponde al promedio de muestras analizadas en un departamento de Colombia (número total de muestras = 255.019). Tomado de Sadeghian (2016).

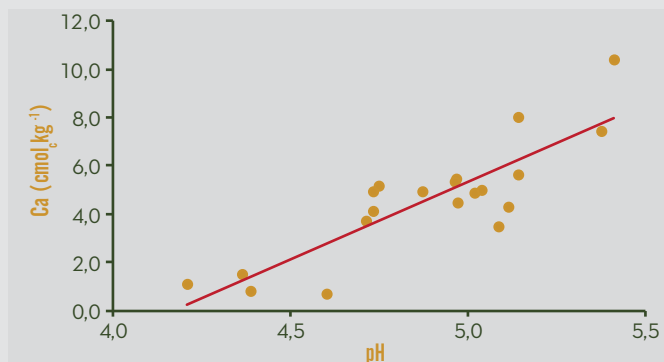


Figura 106. Relación entre el calcio intercambiable y pH del suelo. Cada punto corresponde al promedio de muestras analizadas en un departamento de Colombia (número total de muestras=255.019). Tomado de Sadeghian (2016).

el encalado con enmiendas que contienen este elemento, principalmente carbonatos, constituye la alternativa más eficaz y económica para el manejo del problema. Como ejemplo, en la Figura 108 se presenta el efecto de la incorporación de cal agrícola en los contenidos de Ca^{2+} en el suelo y sus concentraciones en las hojas para un Entisol del departamento del Meta.

Para suelos que presentan valores de pH mayores de 5,0 y niveles bajos de Ca^{2+} (menores de $1,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), se sugiere la aplicación de fuentes de Ca que no ejercen mayor influencia en la reacción del suelo, especialmente el yeso (sulfato de calcio dihidratado $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), el cual además de ser fuente de Ca y S, puede neutralizar el

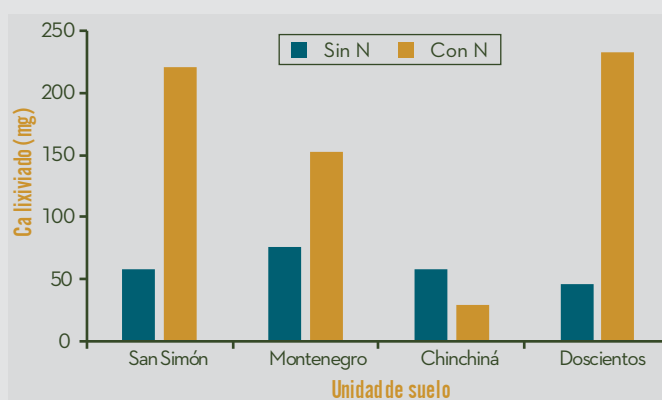


Figura 107. Pérdidas de calcio por lixiviación en consecuencia de la fertilización nitrogenada. Adaptado de Arias et al. (2009).

aluminio intercambiable (Al^{3+}), con particular interés en profundidades mayores a 20 cm, donde el efecto del enclamiento es casi nulo. En una investigación desarrollada en tres departamentos de Colombia pudo demostrarse que dosis cercanas a 350 kg ha^{-1} de yeso pueden ser suficientes para incrementar la producción en aproximadamente 10% (Sadeghian & González, 2012). El resultado obtenido en el departamento del Quindío se presenta en la Figura 109. En cuanto al nitrato de calcio, las investigaciones realizadas hasta el momento no indican una respuesta significativa en suelos deficientes en calcio (Sadeghian & Duque, 2019).

Tabla 40.
Calcio lixiviado en cuatro unidades de suelos, en respuesta a la fertilización potásica. Tomado de Sadeghian y Arias (2018).

Unidad de suelo	Tratamiento	Ca lixiviado (mg)
San Simón	Sin K	60,3 b
	Con K	395,1 a
Montenegro	Sin K	73,3 b
	Con K	358,2 a
Chinchiná	Sin K	59,8 b
	Con K	114,2 a
Doscientos	Sin K	48,3 b
	Con K	400,0 a

Magnesio

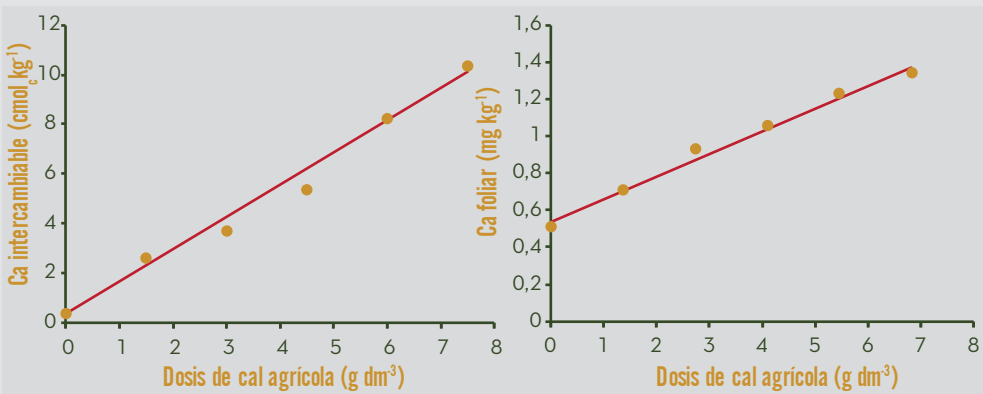
Durante la fase de crecimiento vegetativo, una planta de café variedad Colombia extrae entre 1,2 y 2,1 g de magnesio (Mg) y entre 15 y 30 g al cumplir los 5,5 años; cantidades que son comparables con las del fósforo (Riaño et al., 2004). En la Variedad Castillo®, la cantidad acumulada de Mg en la parte aérea de la planta representa 70 kg ha^{-1} a los 4 años luego de la siembra. En cuanto a la exportación, a través de la cosecha se remueven 2,3 kg de este elemento por cada 1.000 kg de café almendra, cantidad que se acumula principalmente en la almendra (Sadeghian et al., 2006).

En Colombia se observan frecuentemente síntomas de deficiencia de Mg en café, especialmente en las ramas productivas, los cuales se acompañan de una defoliación que puede ser severa, según la magnitud de la carencia del elemento. Pese a lo anterior, los cambios en las concentraciones foliares de Mg durante el tiempo de la formación del fruto, no indican una re-movilización del elemento desde las hojas más nuevas (Sadeghian et al., 2013).

Magnesio en el suelo

La disponibilidad de Mg para las plantas está dada principalmente por su contenido en el complejo de cambio, el cual abastece del elemento en la solución del suelo. A su vez, el Mg^{2+} intercambiable depende del material

Figura 108.
Calcio intercambiable y foliar en función de dosis de cal agrícola en un oxisol del departamento de Meta.



parental, tipo de arcilla, la textura, la presencia de otros cationes, la acidez, la lluvia, la extracción por los cultivos y los aportes vía fertilización y encalado.

En algunas regiones cafeteras de Colombia, los niveles de Mg^{2+} intercambiable se consideran más limitativos para el crecimiento de las plantas que en otras (Sadeghian y Duque, 2017). Son ejemplo de esta condición los departamentos de Caquetá, Meta, Casanare y Putumayo. Entre tanto, en La Guajira, Nariño y Valle del Cauca la situación es menos crítica.

Las unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia difieren en su selectividad para retener el Mg^{+2} en el complejo de cambio (Figura 110), condición que tiene parte de su origen en la CICE, pues a mayor sea esta, habrá más retención de Mg^{2+} (Figura 111). Dado que la mayoría de los suelos de la región cafetera del país son de carga variable, la reducción de la acidez, es decir, un mayor pH, se traduce en el aumento de esta capacidad y, en consecuencia, habrá mayor retención y almacenamiento de Mg^{2+} (Figura 112). Por lo anterior, se espera que el encalamiento con dolomita contribuya tanto a la neutralizar la acidez, como a aumentar la CICE y proporcionar Mg.

Las diferencias que exhiben los suelos en su selectividad por el Mg^{2+} (Figura 110) se traducen en aumentos diferenciales en la fase de intercambio cuando se realizan labores de

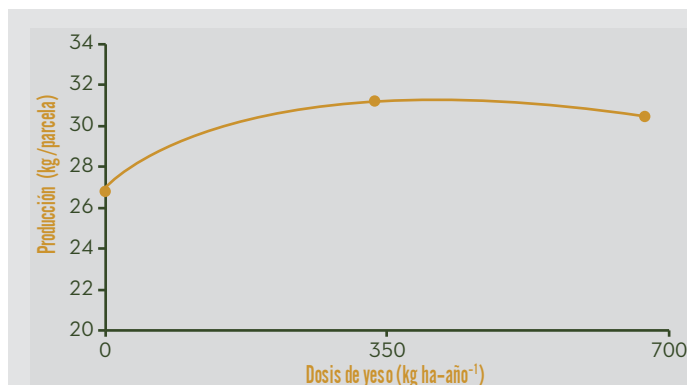


Figura 109. Producción de café cereza en respuesta al suministro de yeso en el departamento del Quindío. Adaptado de Sadeghian y González (2012). Producción acumulada de cuatro años.

fertilización. Otro aspecto que determina la dinámica del Mg^{2+} en el suelo se relaciona con el tipo de fertilizante, pues generalmente las fuentes menos solubles presentan una mayor residualidad, aunque su disponibilidad para las plantas a corto plazo tiende a ser menor. En conformidad con lo dicho, el incremento en los niveles de Mg^{2+} intercambiable a mediano y largo plazo es mayor cuando se aplican fuentes menos solubles, como el óxido de Mg, que aquellos con alta solubilidad, como el sulfato o nitrato de Mg (Figura 113).

Con el suministro de Mg se llega a incrementar el contenido del nutriente en la

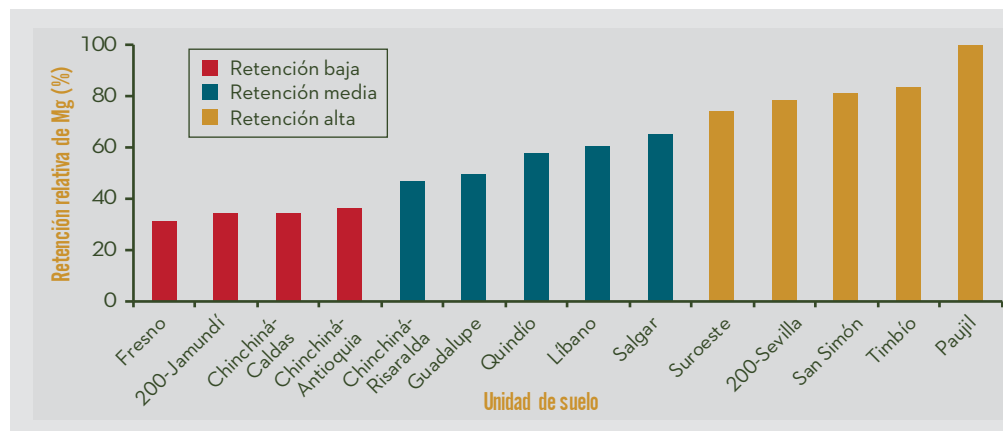


Figura 110. Retención de magnesio (Mg^{2+}) en 14 unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Sadeghian (2012). Se toma como referente (100%), la unidad Paujil.

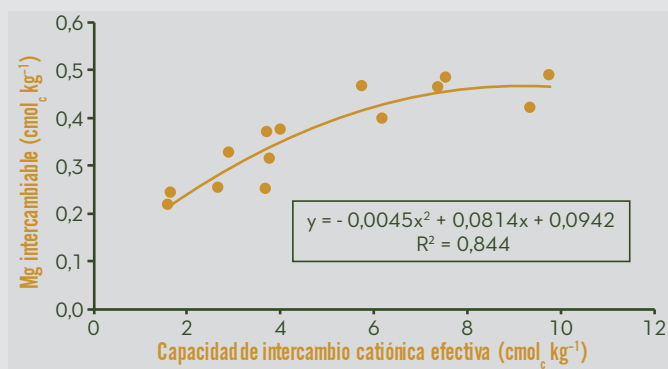


Figura 111. Magnesio intercambiable en función de la Capacidad de Intercambio Cationico Efectiva (CICE). Adaptado de Sadeghian (2012).

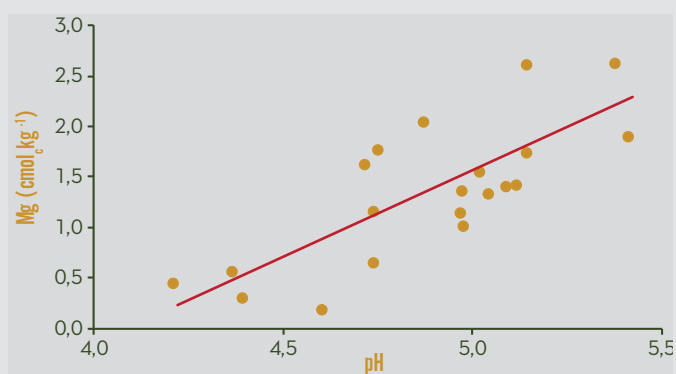


Figura 112. Relación entre el magnesio intercambiable y pH del suelo. Cada punto corresponde al promedio de muestras analizadas en un departamento de Colombia (número total de muestras=255.019). Adaptado de Sadeghian (2016).

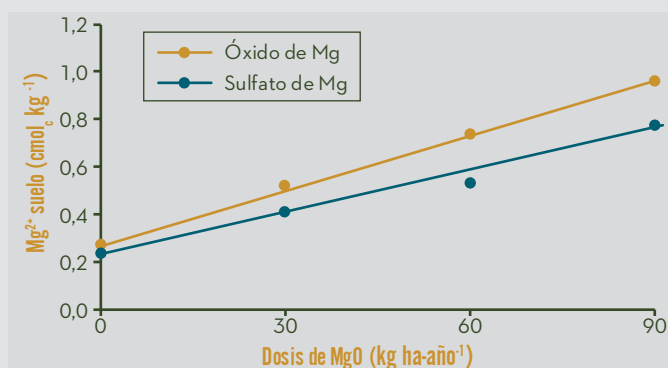


Figura 113. Contenidos del magnesio intercambiable en función de dosis y fuentes del elemento. Datos correspondientes a valores promedio de dos evaluaciones realizadas en la Estación Experimental La Catalina.

fase intercambiable; sin embargo, al aplicar dosis muy altas, se genera un exceso que el complejo de cambio no es capaz de neutralizar/adsorber, haciendo que parte de la cantidad aportada se una con los aniones presentes en la solución del suelo y se precipite. Bajo estas circunstancias, el análisis del suelo indicaría contenidos muy altos de Mg²⁺ intercambiable, sin que ello sea del todo cierto. En la Figura 114 puede observarse la condición descrita para tres suelos de la zona cafetera de Colombia, en donde los niveles llegan a representar más de 15 cmol_c kg⁻¹. Esta imprecisión ha sido un punto de atención en algunos estudios de la fertilidad del suelo para café (Sadeghian, 2003; Sadeghian, 2012).

Por otra parte, las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados y potásicos afectan de manera negativa la disponibilidad de Mg²⁺ en el suelo para las plantas. El suministro de N ureico o amoniacal favorece la desorción del Mg²⁺ de la fase de cambio (Figura 115), el cual se pierde posteriormente por lixiviación (Figura 116).

Del mismo modo, la fertilización potásica puede contribuir a la pérdida de Mg²⁺ por lavado. Cuando no se aplica K, la cantidad de Mg²⁺ que se lixivia es muy baja y constante a través de tiempo, pero conforme al aumento de las dosis de K, se incrementan las pérdidas de Mg²⁺ a través de este proceso (Figura 117). La reducción en los contenidos de Mg²⁺ intercambiable, resultante de una competencia con K⁺, se traduce en una menor absorción del elemento. Entre los estudios pioneros en Colombia con respecto a esta interacción, sobresale el de Urhan (1953), quien midió el efecto de algunos fertilizantes en los niveles foliares de los nutrientes en las variedades Arábica, Típica y Borbón. Al respecto, se reporta que el nivel de Mg en las hojas disminuyó al aplicar el sulfato de potasio. En trabajos más recientes se confirma lo anterior para la variedad Colombia (Sadeghian, 2008, 2011) y se indica que en la absorción de Mg²⁺ puede tener mayor influencia la fertilización potásica que el suministro de Mg (Figura 118). En el ámbito general, puede esperarse reducción en las concentraciones foliares de Mg en conformidad a los aumentos del K (Figura 119).

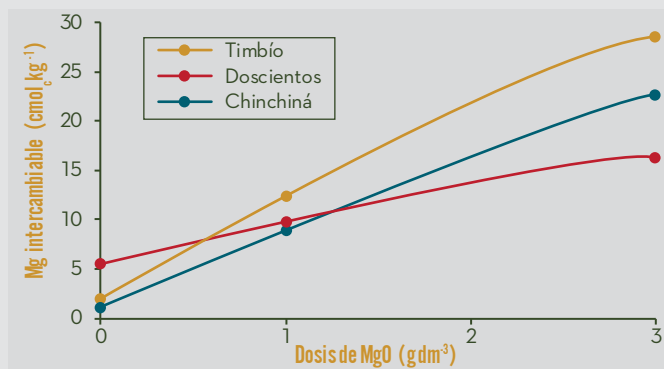


Figura 114.
Magnesio intercambiable en respuesta a dosis del elemento. Adaptado de Sadeghian et al. (2012).

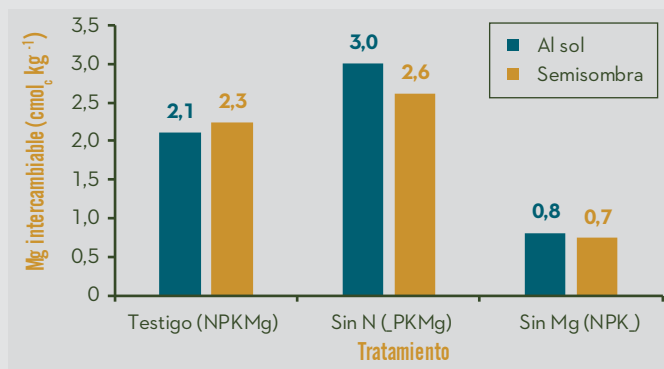


Figura 115.
Efecto de la aplicación de nitrógeno y magnesio en los contenidos de magnesio intercambiable de cafetales al sol y bajo semisombra. Adaptado de Sadeghian (2009).

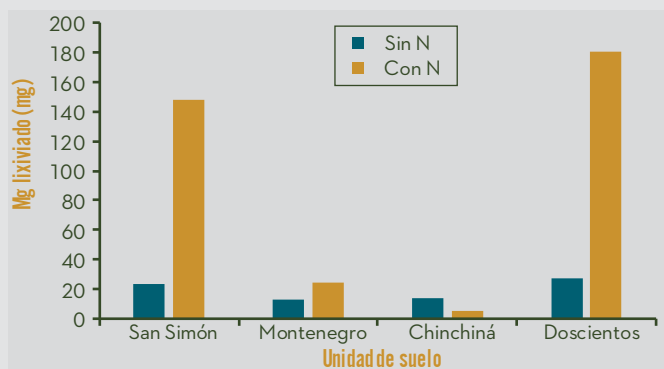


Figura 116.
Pérdidas de magnesio por lixiviación en consecuencia de la fertilización nitrogenada. Adaptada de Arias et al. (2009).

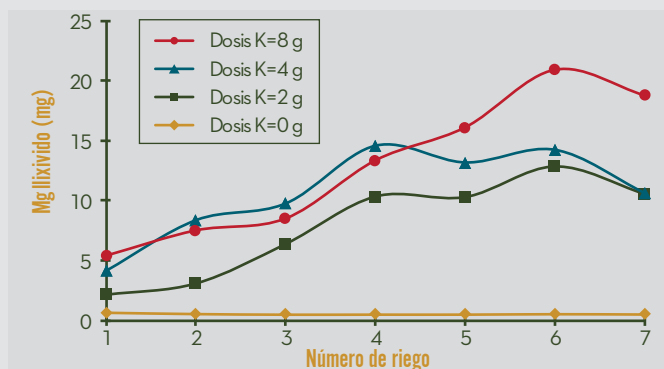


Figura 117.
Pérdidas de magnesio por lixiviación en respuesta a dosis de potasio.

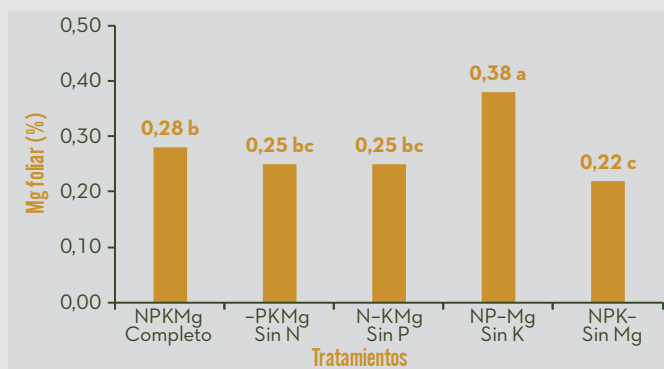


Figura 118.
Concentración foliar de magnesio en respuesta a tratamientos de fertilización, definidos con base en la técnica del elemento faltante. Letras distintas indican diferencias significativas según prueba de Duncan al 5%. Tomado de Sadeghian (2008b).

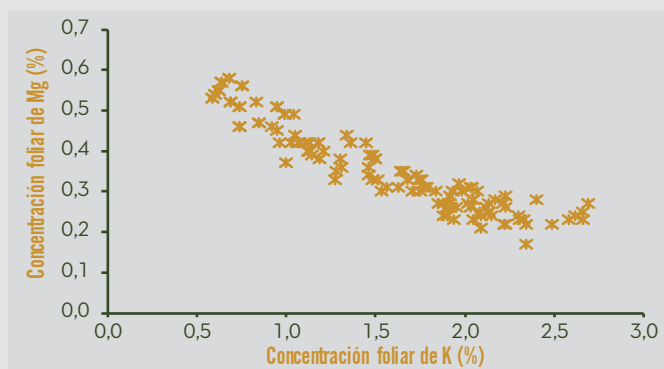


Figura 119.
Relación entre las concentraciones foliares de magnesio y potasio.

Dosis y fuentes de magnesio

Pese a la importancia que reviste el Mg en la nutrición del café y su condición deficitaria en muchos suelos en los que se desarrolla la caficultura colombiana, no siempre se ha logrado demostrar el efecto de su aplicación en la producción del cultivo.

En una investigación desarrollada en siete lugares de la zona cafetera de Colombia, se determinó la influencia de la aplicación al suelo de diferentes dosis de Mg en plantaciones nuevas de café a libre exposición solar y sin síntomas visibles de la deficiencia del elemento. En ningún caso se encontró respuesta a los tratamientos (Figura 120), resultado que se relacionó con las aplicaciones de este elemento antes de iniciar la investigación (Uribe & Salazar, 1981b).

En un estudio enfocado a la calibración de los resultados de análisis de suelos en plantaciones jóvenes de café al sol y bajo semisombra (20

y 12 localidades, respectivamente), no fue posible relacionar el rendimiento del cultivo con el contenido de Mg^{2+} en el suelo; solo en algunas pocas localidades la producción disminuyó al excluir el Mg de los planes de fertilización (Sadeghian, 2009).

En contraste con lo anterior, para plantaciones de la variedad Colombia se ha encontrado respuesta al suministro de 30 o 60 kg ha⁻¹ de MgO, siendo en algunos casos mayor la producción obtenida con el óxido de Mg que con el sulfato de Mg (Figura 121). Al respecto, se ha encontrado que el empleo continuado de óxido de Mg puede incrementar más la concentración del elemento en el suelo y en la planta que el sulfato de Mg, en razón de su mayor residualidad y efecto en la corrección de la acidez (Figura 122). Lo anterior refuerza la idea de que la fertilización no sólo debe atender los requerimientos inmediatos del cultivo sino las futuras necesidades, mediante la construcción de reservas a mediano y largo plazo.

Figura 120.

Efecto de la aplicación de magnesio (MgO) en la producción de café pergamino seco (c.p.s.) en siete localidades de Colombia. Adaptado de Uribe y Mestre (1981).

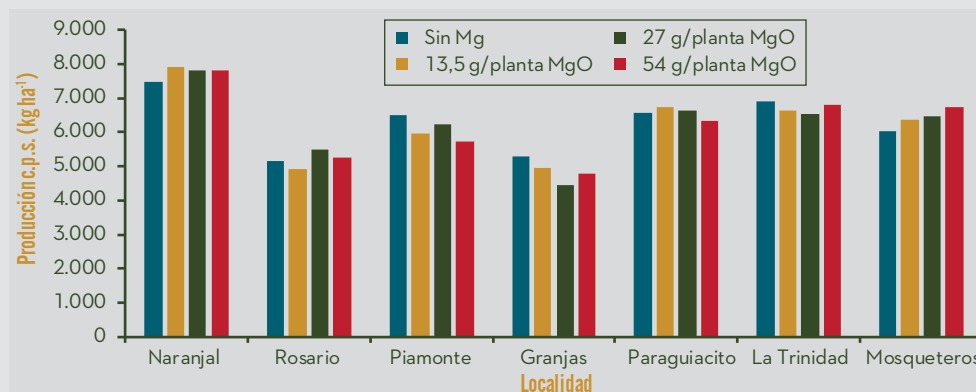
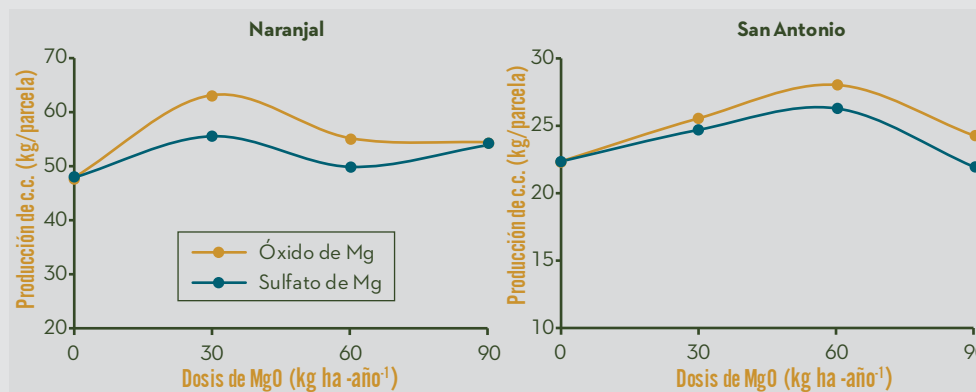


Figura 121.

Producción de café cereza (c.c.) en respuesta a dosis y fuentes de magnesio en las Estaciones Experimentales Naranjal, Caldas (año 2005) y San Antonio, Santander (Año 2009). Informe anual 2010.



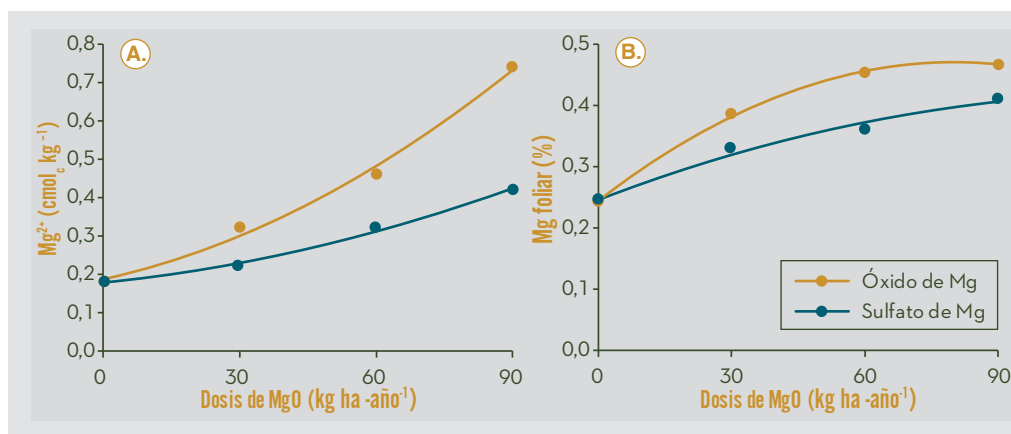


Figura 122. Magnesio intercambiable (A.) y foliar (B.) en respuesta a dosis y fuentes del magnesio. Tomado de Sadeghian (2014).

Azufre

Entre los macronutrientes, el azufre (S) es quizá el menos estudiado en Colombia, posiblemente porque raras veces se presentan síntomas de deficiencias de este elemento. En el fruto recién formado, su concentración es relativamente alta (entre 0,19 y 0,27 mg kg⁻¹), pero se reduce progresivamente durante los cuatro meses siguientes a la antesis, como resultado del efecto de la dilución del elemento en consecuencia del crecimiento rápido del fruto. Una vez que el fruto llega a la madurez fisiológica, la concentración del S alcanza valores cercanos a 0,08 mg kg⁻¹ (Figura 123). En contraste, el contenido total del S en el fruto se incrementa, hasta representar promedios entre 0,4 y 0,5 mg al momento de la cosecha, cantidad que varía según la biomasa alcanzada en cada localidad (Figura 124). Por lo anterior, una producción equivalente a 1.000 kg de café almendra remueve del suelo 1,21 kg de S (Sadeghian et al., 2006).

Las concentraciones del S en las hojas varían durante el período de la formación del fruto, comportamiento que presenta diferencias entre localidades (Figura 125). El resultado en mención, antes que la re-movilización del nutriente hacia el fruto, puede relacionarse con su disponibilidad en el suelo, influenciada por la aplicación del elemento y la mineralización de la materia orgánica; esta última realizada por los microorganismos y gobernada por la acción conjunta de la lluvia y la temperatura.

Azufre en el suelo

En el suelo, el S puede estar tanto en forma orgánica como inorgánica. En los suelos de la zona cafetera de Colombia se han detectado los siguientes rangos de las diferentes fracciones (mg kg⁻¹): total 321-1.316, orgánico 87-940, inorgánico 35-624 y disponible 2-61. Aunque la materia orgánica constituye la principal reserva de S, su contenido no se relaciona necesariamente con la disponibilidad de este elemento; tampoco hay una relación clara entre el S y los demás nutrientes en el suelo (González et al., 2003). En el ámbito general, se espera una mayor disponibilidad de S en suelos con contenidos medios a altos de materia orgánica, asociado a condiciones que propicien la mineralización de esta.

Dosis y fuentes de azufre

Existen diferentes fuentes fertilizantes para proporcionar azufre, siendo las más comunes los sulfatos de calcio, magnesio, potasio y amonio. La solubilidad del yeso (sulfato de calcio) es menor que las otras fuentes, característica que puede ser desventajosa cuando se requiere de una acción rápida, pero presenta mayor residualidad a través del tiempo, aspecto que contribuye más a la construcción de la fertilidad del suelo.

En una investigación desarrollada en tres localidades de Colombia se determinó la respuesta de café a la aplicación de S, suministrado en forma de sulfato de amonio

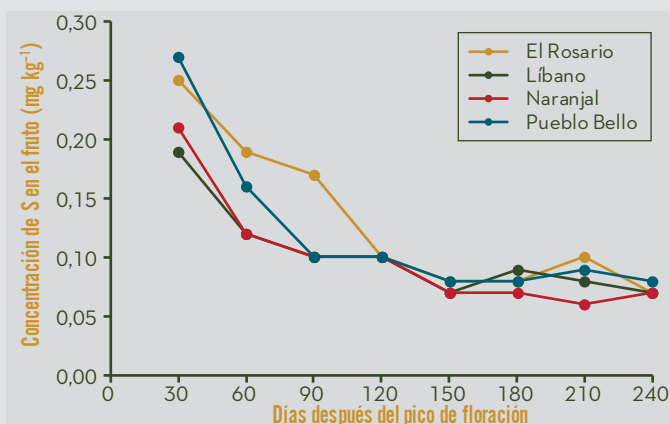


Figura 123.

Concentración de azufre (S) en el fruto de café Variedad Castillo® en función del tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé. Tomado de Sadeghian et al. (2013).

(SAM), flor de azufre (azufre elemental) y yeso. Sólo en una de las localidades, ubicada en el departamento del Quindío, se encontró respuesta para el promedio de los cinco años evaluados, sin que existieran diferencias entre las fuentes (Figura 126). La dosis para alcanzar la producción máxima fue de 68 kg ha-año⁻¹.

La evaluación realizada durante cuatro años de cosecha en tres Estaciones Experimentales de Cenicafé también permitió concluir que la respuesta al S, suministrado como SAM y sulfato de Mg, puede cambiar según el sitio, sin que se presentaran diferencias entre las fuentes (Figura 127). En cuanto a las dosis, mientras en una de las localidades (La Catalina) no se encontró efecto de S, en las otras dos los requerimientos fueron de 24 o 48 kg ha-año⁻¹ (Naranjal y San Antonio, respectivamente).

Figura 124.

Acumulación de azufre (S) en el fruto de café en función del tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé. Tomado de Sadeghian et al. (2013).

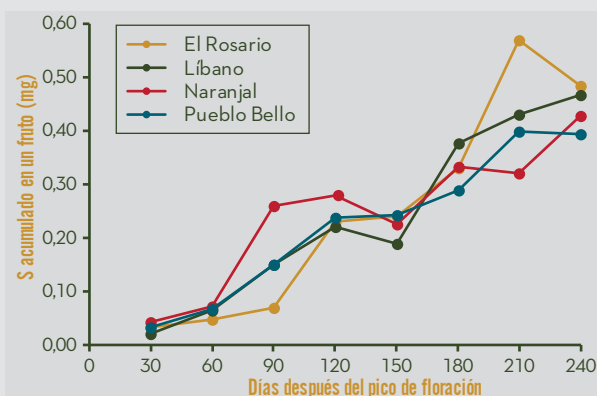
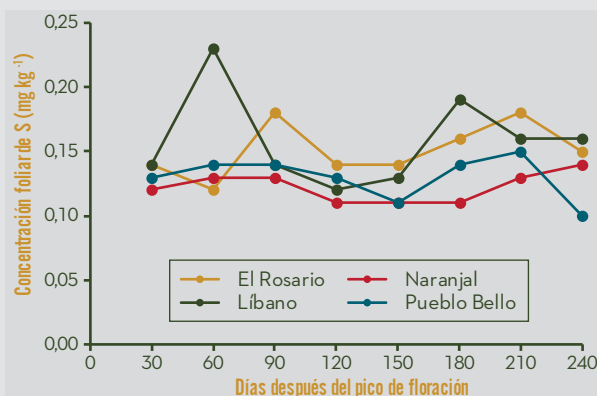


Figura 125.

Concentración del azufre en las hojas de café (tercero y cuarto par), durante el período de la formación del fruto, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé. Tomado de Sadeghian et al. (2013).



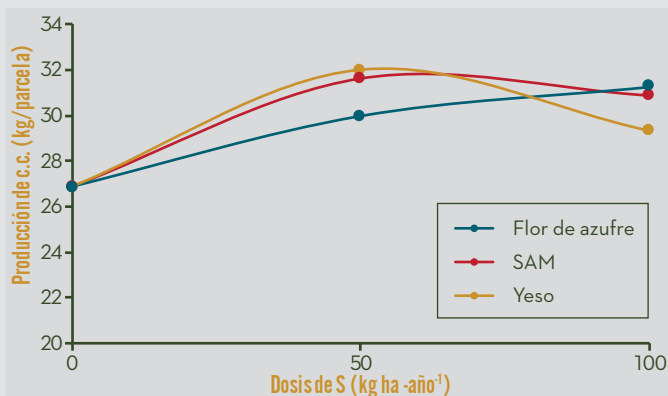


Figura 126.

Producción de café cereza (c.c.) en respuesta a la aplicación de azufre, suministrado mediante tres fuentes. Valores promedio de cinco años de cosecha. Tomado de Sadeghian y González (2012).

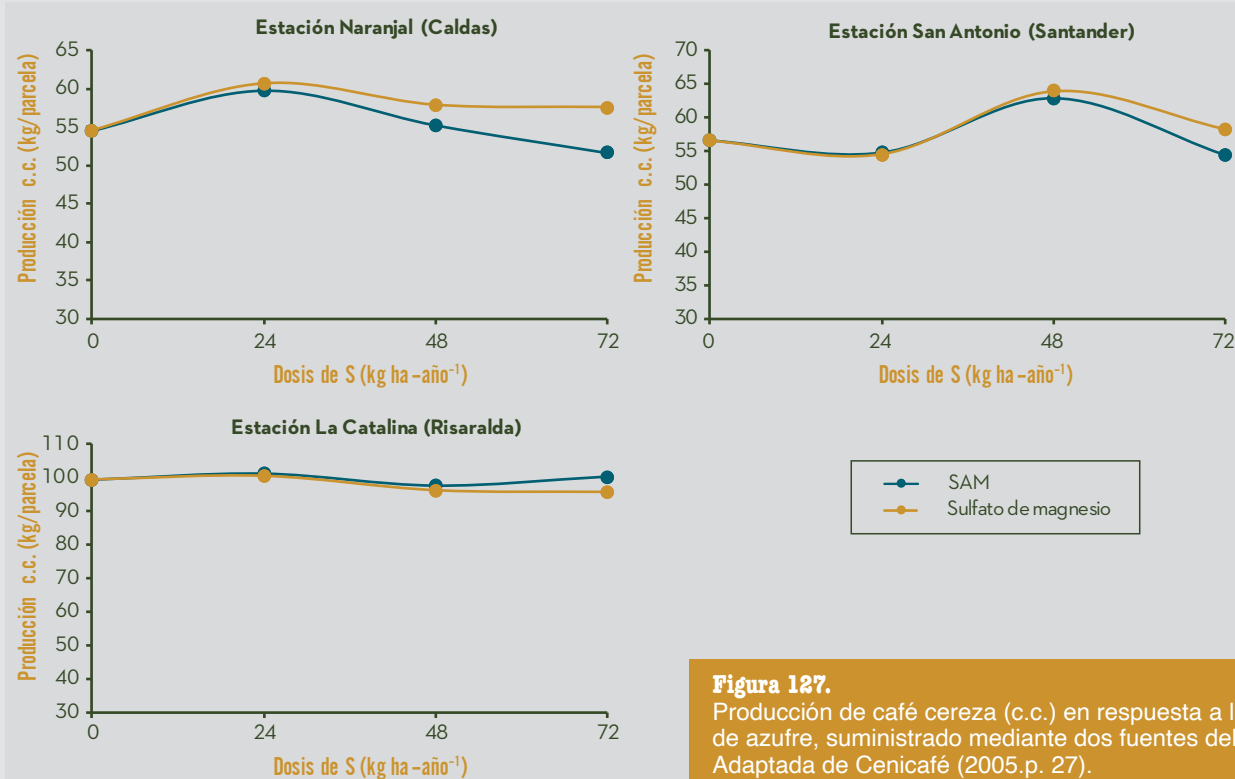


Figura 127.

Producción de café cereza (c.c.) en respuesta a la aplicación de azufre, suministrado mediante dos fuentes del elemento. Adaptada de Cenicafé (2005.p. 27).

Micronutrientes





Los micronutrientes Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl y Ni, al igual que los macronutrientes N, P, K, Ca, Mg y S, son esenciales para el crecimiento y el desarrollo de las plantas; la diferencia entre estos radica fundamentalmente en las cantidades requeridas. Con frecuencia se emplean los términos **elementos menores** o **elementos traza**, para referirse a los micronutrientes, designaciones que tienen su razón principal en la menor cantidad contenida en las plantas que en la litosfera, particularmente con respecto al Fe y Mn.

Pese a la importancia que revisten los micronutrientes, en Colombia son contadas las investigaciones desarrolladas en torno a estos elementos para café, especialmente de Mo, Ni y Cl; panorama que se explica principalmente por la poca respuesta a su aplicación y la escasa ocurrencia de sus síntomas de deficiencias en el campo, siendo el B y, parcialmente el Zn, la excepción. En cuanto a estos dos nutrientes se refiere, sus insuficiencias suelen ocurrir con mayor frecuencia cuando se presentan condiciones de déficit hídrico prolongado; evidenciadas en hojas de menor tamaño y entrenudos más cortos (Figuras 128 y 129), señales que sirven para identificar la época en que ocurrió la limitación para absorberlos.

Frecuentemente se observan síntomas de la falta de Fe en los cafetales (Figura 130), los cuales pueden estar asociados a diversas causas, principalmente condiciones de basicidad del suelo para café como consecuencia de sobredosis de enmiendas, intoxicación por el herbicida glifosato y, a veces, problemas de aireación de los suelos, asociados a encharcamientos. Con respecto al Mn, la detección visual de su carencia en las hojas (Figura 131), generalmente ocurre por el sobreencalamiento o donde se depositaron alguna vez cenizas. Ocasionalmente, puede presentarse exceso del Mn (Figura 132), en respuesta a la reducción del pH y/o deficiencias de Fe.

Figura 128.

Síntomas de deficiencias de boro. **A.** En las hojas más nuevas aparecen pequeñas manchas de color café, especialmente durante períodos prolongados de sequía (más de dos meses) y en suelos con bajos contenidos de materia orgánica y una capacidad reducida para retener agua. En casos extremos se produce la muerte de las yemas y la aparición de nuevos brotes. **B.** Las hojas afectadas se deforman al crecer, dejando en la rama señales del daño, mientras que las hojas nuevas son normales. Estas deformaciones aparecen en los mismos pares de nudos (contando a partir del ápice) de la mayoría de las ramas, característica que las distingue de otras causas como la chamusquina. **C.** Las hojas más viejas toman un color “verde-aceituna” que se extiende desde el ápice hacia la base, en forma de “V” invertida. **D.** condición a la que se suma la suberización (formación de tejido corchoso) de las nervaduras, del haz y del envés.

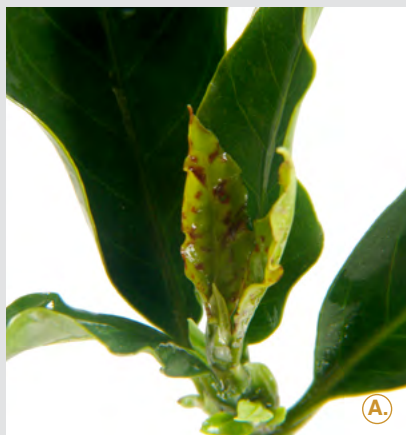


Figura 129.

Síntomas de deficiencias de zinc. **A.** Entrenudos más cortos y hojas nuevas más pequeñas y lanceoladas. **B.** Vestigio de una deficiencia de zinc, presentado en meses anteriores, como consecuencia de déficit hídrico.



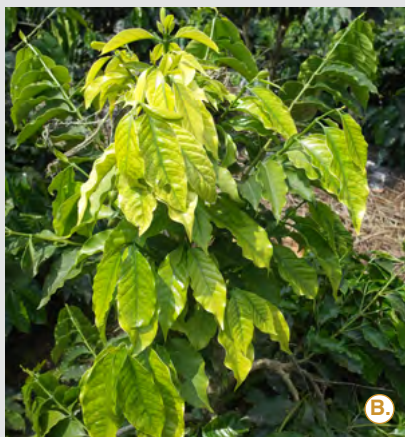


Figura 130.

Síntomas de deficiencia de hierro en hojas de café. **A.** Clorosis de las hojas nuevas en todas las ramas de la planta. **B.** La manifestación de la carencia del elemento solo en algunas de las ramas puede deberse a la intoxicación con glifosato.

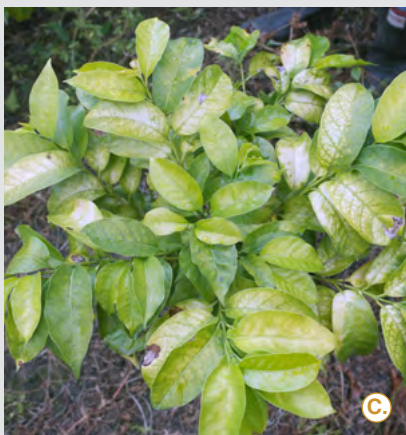


Figura 131.

Síntomas de la deficiencia de manganeso en hojas de café. La principal causa radica en la aplicación de cenizas al suelo y el subsecuente aumento del pH (mayor de 5,5). **A.** Los primeros pares de hojas se tornan de color verde claro y uniforme, mientras que en las siguientes hojas las nervaduras tienden a ser más oscuras. **B.** En ocasiones, las hojas más nuevas son de mayor tamaño que lo normal. **C.** Cuando la deficiencia es muy severa, la sintomatología se observa en la planta entera. La concentración foliar de manganeso en plantas afectadas tiende a ser menor de 10 mg kg⁻¹.



Figura 132.
Síntomas del exceso
de manganeso en las
hojas de café.

Extracción de los micronutrientes

La absorción y la partición de los micronutrientes en los diferentes órganos de la planta puede presentar variaciones entre localidades y años, aun para cultivos de la misma edad, como se evidencia en la Tabla 41 para plantaciones de la Variedad Castillo® de 12 meses, en tres localidades de Colombia. Comúnmente, el micronutriente más absorbido es el Mn, cuyas cantidades acumuladas en los órganos vegetativos de la parte aérea, durante un ciclo de cinco años (cuatro cosechas), llega a representar entre 7 y 33 kg ha⁻¹, como se muestra en la Figura 133 para dos municipios de los departamentos de Huila y Quindío. El segundo elemento es el Fe, seguido en su orden por B, Cu y Zn. La cantidad relativa de N o K acumulada en estos órganos de la planta es 15 a 100 veces mayor con respecto al Mn, y 1.200 a 1.600 veces más alta que el Zn, según la localidad. Con respecto a la distribución o la partición de estos, la mayor fracción se acumula en las hojas, seguida por las ramas y el tallo, sin embargo, es posible que se presenten variaciones entre los elementos y/o

sitios (Figura 134); por ejemplo, para el caso en mención, el porcentaje de Mn acumulado en el tallo fue relativamente más bajo que el del Cu; entre tanto, una fracción alta de B se depositó en el tallo de las plantas en el Huila, mientras que en el Quindío no ocurrió lo mismo.

Concentración foliar de micronutrientes

Como es de esperarse, la concentración foliar de los micronutrientes depende de su disponibilidad en el suelo, de allí que resulta razonable detectar variaciones entre localidades (Figura 135). Pese a lo anterior, casi siempre se conserva la tendencia en el orden mencionado: Mn>Fe>B>Cu>Zn. Es posible también que ocurran cambios en estas concentraciones a través del tiempo, siendo de mayor interés el período entre la floración y la cosecha; debido a que las ramas y las hojas son las principales fuentes de nutrientes para los frutos. De acuerdo con los resultados obtenidos en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé, las variaciones en mención se relacionan más con la disponibilidad de los micronutrientes en el suelo, como consecuencia de las lluvias, antes que la demanda de los frutos y la movilización de estos hacia los frutos (Figura 136).

La concentración foliar de algunos de los elementos menores puede verse influenciada por el empleo de fertilizantes nitrogenados que contengan amonio o aquellos que lo generan, como consecuencia de la acidez residual que estos producen. Comúnmente, tiende a incrementarse el Mn foliar cuando se aplica nitrógeno, mientras que el Fe, Cu y B disminuyen (Figura 137); además, se ha demostrado que la mayor magnitud en los cambios se genera con dosis medias de nitrógeno (Figura 138). En contraste con lo anterior, la práctica del encalado ocasiona incrementos en el pH del suelo y, en consecuencia, se reduce la absorción de elementos como Fe y Mn, especialmente cuando sus niveles en las hojas son altos (Tabla 42).

Tabla 41.

Extracción y partición de nutrientes en café (mg/planta), según el órgano de la parte aérea de la planta, a los 12 meses de edad en tres localidades de la zona cafetera de Colombia. Tomado de Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé, 2017, pp. 143-144).

Micronutriente	Hojas	Ramas	Tallo
Concentración Agrícola Jorge Villamil (Gigante, Huila)			
Fe	9,0	2,1	2,5
Mn	71,7	14,2	5,6
Zn	0,7	0,6	0,4
Cu	0,8	0,2	0,3
B	2,1	0,2	0,2
Estación Experimental Naranjal (Chinchiná, Caldas)			
Fe	7,1	1,6	7,1
Mn	21,2	4,8	3,6
Zn	2,1	2,0	0,7
Cu	0,8	0,5	0,8
B	4,6	0,4	0,7
Estación Experimental Paraguaicito (Buenavista, Quindío)			
Fe	26,4	265,8	3,4
Mn	29,4	8,1	4,8
Zn	1,9	3,3	1,8
Cu	1,6	1,2	1,3
B	8,2	2,4	1,1

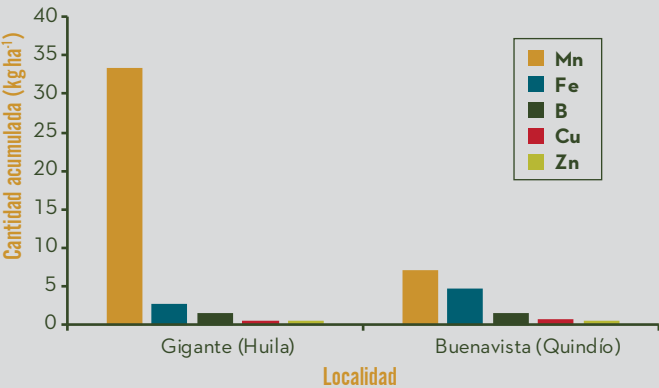


Figura 133.

Acumulación de Mn, Fe, B, Cu y Zn en café Variedad Castillo®, 60 meses luego de la siembra, en dos localidades de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Cenicafe (2020, pp. 129-131). Las cantidades corresponden a los órganos vegetativos de la parte aérea de la planta (tallo, ramas y hojas). Las diferencias entre las localidades, especialmente con respecto al Mn y parcialmente Fe, se relacionan con la fertilidad de los suelos y la disponibilidad de estos elementos para ser absorbidos por la planta.

En Colombia, los estudios desarrollados en torno al cloro se limitan básicamente a su aplicación a través cloruro de potasio (KCl). Valencia (1991) reporta incrementos en los niveles foliares de Cl, B y Mn cuando se emplea este fertilizante, y aclara que su uso no afecta la calidad física de los granos ni la calidad organoléptica de la bebida. Un estudio más reciente sugiere que

el incremento en la concentración foliar de Cl, como respuesta a la aplicación de potasio en forma de KCl, puede presentar variaciones, según la localidad (Figura 139).

De acuerdo con estos resultados y, con base en la dosis óptima de KCl de 260 kg ha-año⁻¹ se estima que concentraciones mayores

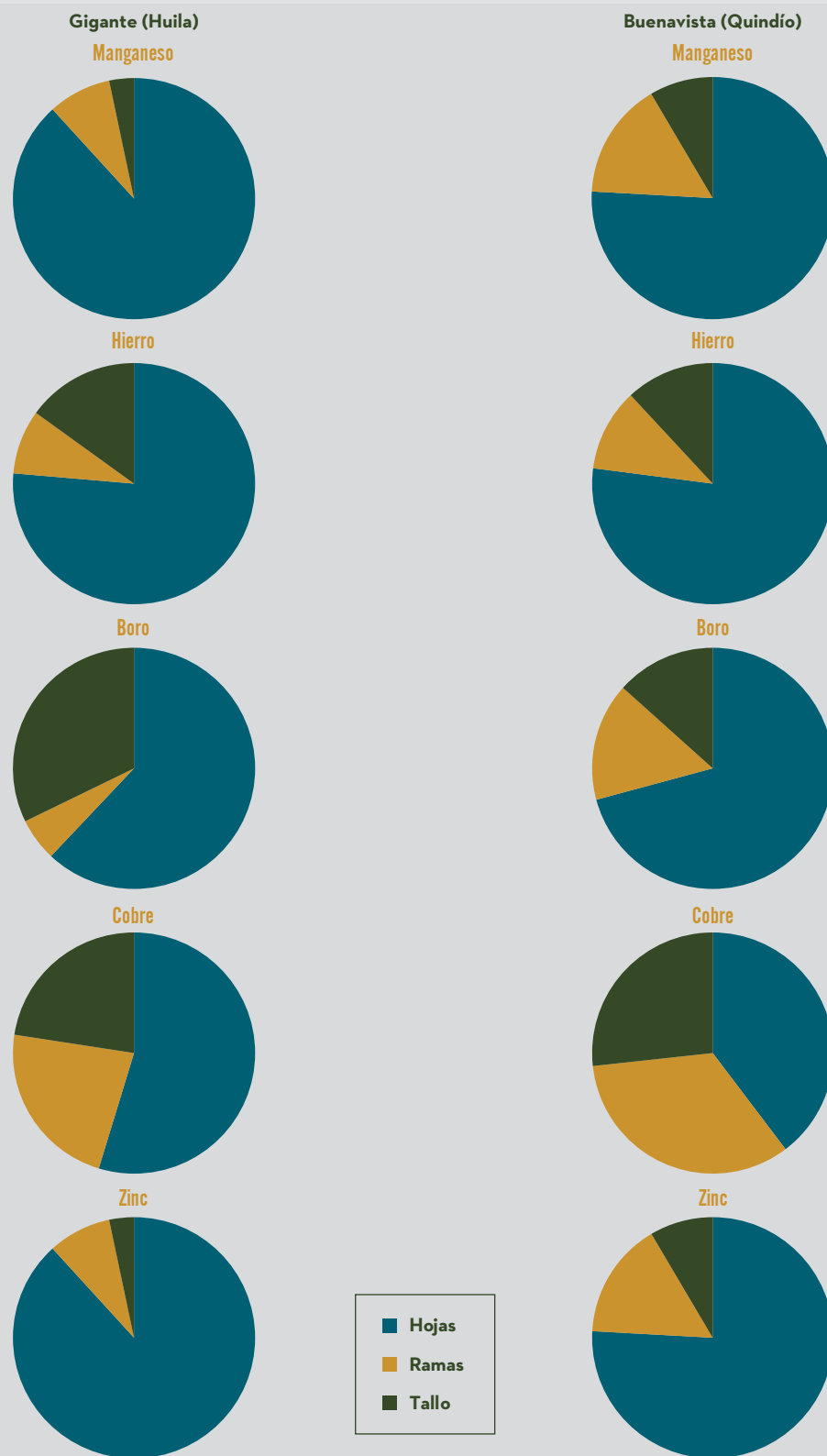


Figura 134. Representación porcentual del Mn, Fe, B, Cu y Zn en hojas, ramas y tallo de café Variedad Castillo®, 60 meses luego de la siembra en dos localidades de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Cenicafé (2020, pp. 129-131).

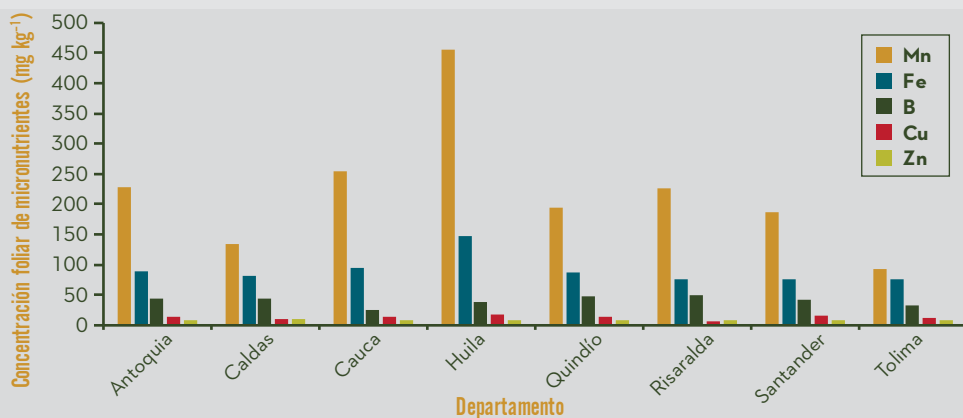


Figura 135. Concentraciones foliares de Mn, Fe, B, Cu y Zn, en algunos departamentos de Colombia. Valores promedio de más de 6.000 muestras analizadas, correspondientes a las Variedades Castillo® y Colombia, tomadas en el desarrollo de 12 experimentos de nutrición en Estaciones experimentales de Cenicafé y fincas.

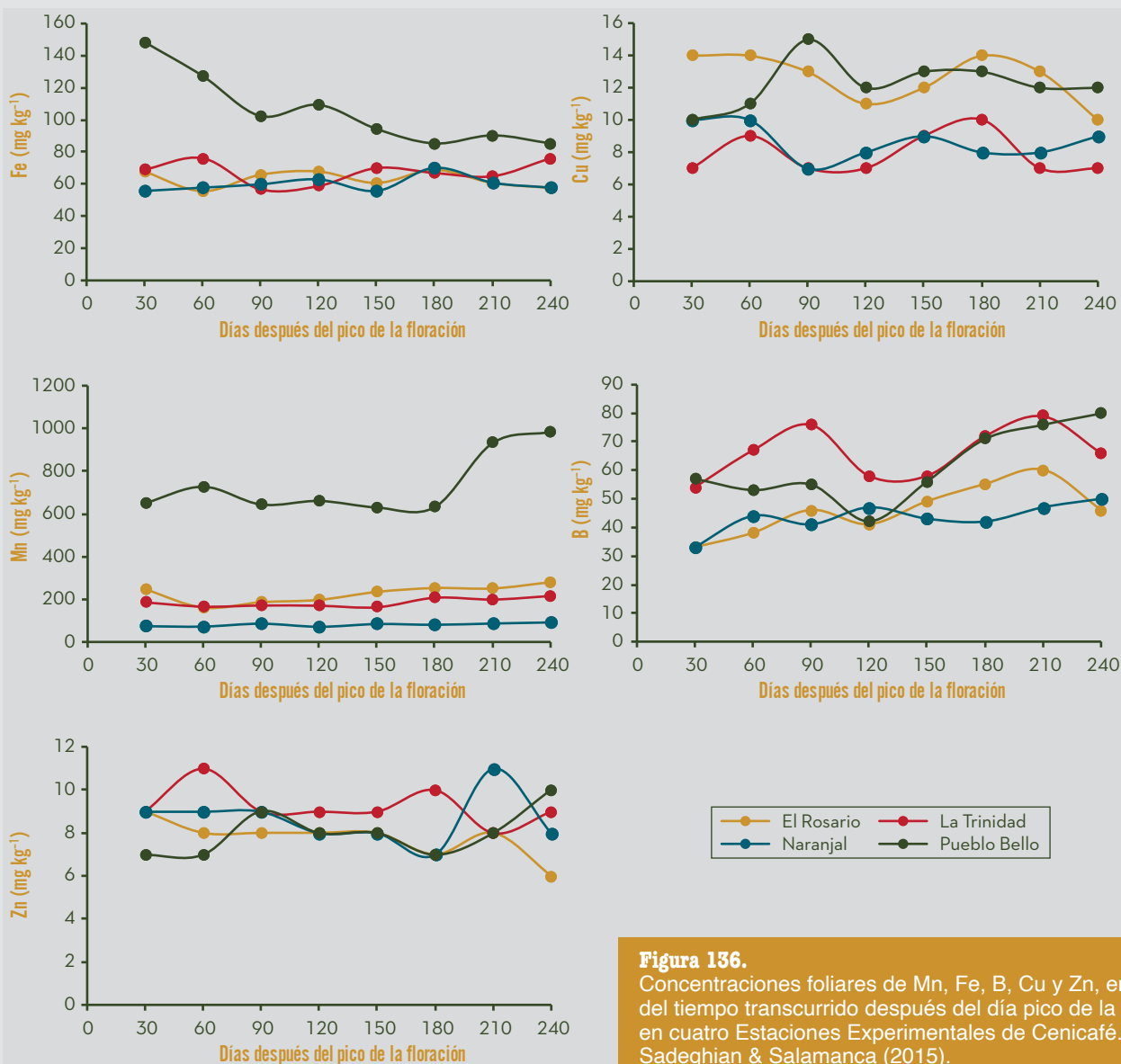


Figura 136. Concentraciones foliares de Mn, Fe, B, Cu y Zn, en función del tiempo transcurrido después del día pico de la floración, en cuatro Estaciones Experimentales de Cenicafé. Tomado de Sadeghian & Salamanca (2015).

Figura 137.

Concentración foliar de Mn, Fe, B, Cu y Zn, en respuesta a la aplicación de nitrógeno vía urea. Promedio registrado para de 32 lotes cafeteros (20 al sol y 12 bajo semisombra). Tomado de Sadeghian (2011).

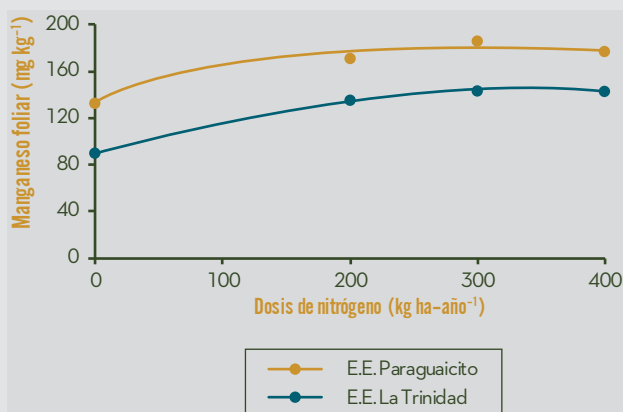
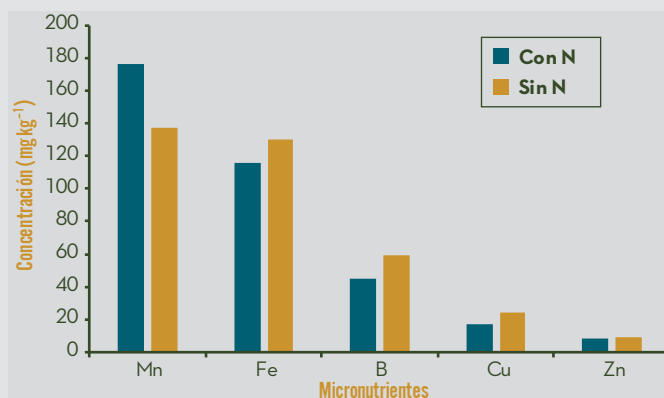
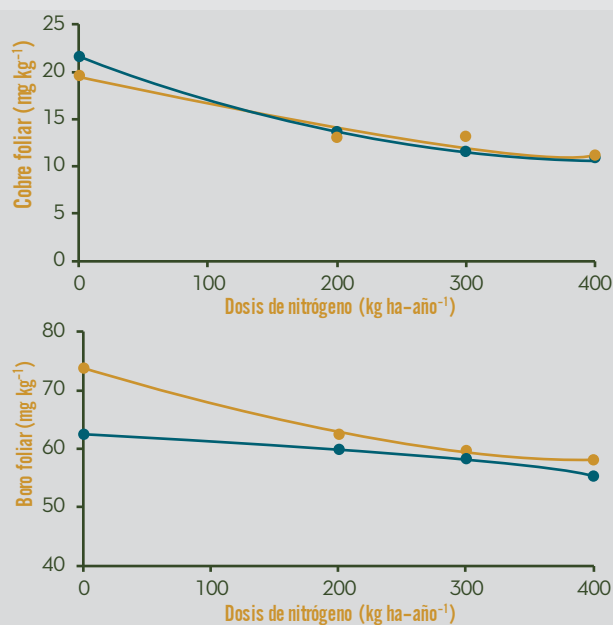


Figura 138.

Concentración foliar de manganeso, boro y cobre, en respuesta a la aplicación de dosis de nitrógeno en dos Estaciones Experimentales (E.E.) de Cenicafé, La Trinidad en el municipio de Líbano (Tolima) y Paraguaicito en el municipio de Buenavista (Quindío). Tomado de Cenicafé (2014, pp. 44-45).



de 2.500 mg kg⁻¹ de Cl pueden resultar perjudiciales para la producción.

Con base en los resultados de 6.000 muestras foliares de café, analizadas en el desarrollo de 12 experimentos de nutrición, en ocho departamentos de Colombia, se definieron los rangos críticos de los micronutrientes para dos de las variedades que actualmente más se cultivan en el país, Variedades Castillo® y Colombia (Tabla 43).

Micronutrientes en los frutos

En los frutos recién formados, la concentración de los micronutrientes es relativamente alta, pero, conforme avanza el tiempo va disminuyendo hasta alcanzar cierta estabilización, 120 días luego de la antesis (Figura 140). Esta reducción se asocia al efecto de dilución en la concentración de los

Tabla 42.
Cambios de hierro y manganeso del suelo en respuesta a dosis de cal aplicada, en cinco localidades de la zona cafetera. Tomado de Sadeghian & Díaz-Marín (2020a).

Nutriente	Dosis de cal agrícola (g dm ⁻³)				
	0,00	1,25	2,50	5,00	10,00
Finca cafetera en el municipio de Jamundí (Valle del Cauca)					
Hierro (mg kg ⁻¹)	325	323	260	247	147
Manganeso (mg kg ⁻¹)	6	6	7	7	7
Estación Experimental Naranjal (Chinchiná, Caldas)					
Hierro (mg kg ⁻¹)	101	104	90	79	58
Manganeso (mg kg ⁻¹)	13	13	11	10	7
Estación Experimental Paraguaicito (Buenavista, Quindío)					
Hierro (mg kg ⁻¹)	114	99	80	86	67
Manganeso (mg kg ⁻¹)	27	23	16	20	15
Estación Experimental El Rosario (Venecia, Antioquia)					
Hierro (mg kg ⁻¹)	148	153	148	135	98
Manganeso (mg kg ⁻¹)	52	33	32	27	20
Estación Experimental San Antonio (Floridablanca, Santander)					
Hierro (mg kg ⁻¹)	407	387	341	199	177
Manganeso (mg kg ⁻¹)	26	21	21	16	16

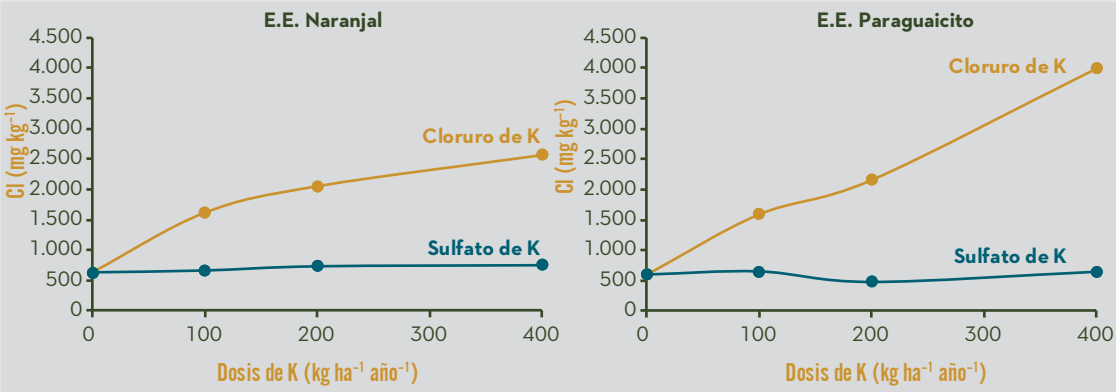


Figura 139.
Concentración foliar de cloro (Cl) en respuesta al suministro de dos fuentes de potasio. Tomado de Cenicafé (2010, p.33).

elementos como consecuencia del crecimiento rápido del fruto durante esta fase.

El contenido de los micronutrientes en los frutos, al igual que en los demás órganos de la planta, exhibe variaciones según la localidad (Tabla 44); incluso, pueden llegar a presentar variaciones en los diferentes lotes de una misma finca. En promedio, 1.000 kg de café cereza pueden contener 24,53 g de Mn, 13,48 g de Fe, 3,80 g de B, 3,16 g de Cu y 1,75 g de Zn. Cabe aclarar que, en razón de la baja remoción en la cantidad de los

Tabla 43.
Rangos críticos de micronutrientes en hojas de café. Tomado de Sadeghian (2020).

Micronutriente	Rango crítico (mg kg ⁻¹)
Manganeso	106-278
Hierro	54-121
Boro	29-55
Cobre	8-17
Zinc	6-12



micronutrientes por la cosecha, ocurre un menor agotamiento de las reservas en el suelo frente a los macronutrientes.

Micronutrientes en el suelo

Para comprender mejor la dinámica de los micronutrientes en el suelo y los factores que

afectan su disponibilidad real, es necesario tener en cuenta, entre otros aspectos, su origen (material parental), cantidad total, formas químicas presentes, reactividad, interacción con otros elementos, cambios según la influencia del clima y el efecto de las propiedades del suelo, principalmente el pH y la materia orgánica. En este ítem, la información en referencia fue extraída de Havlin et al. (2017), Navarro y Navarro (2013) y Raji (2011).

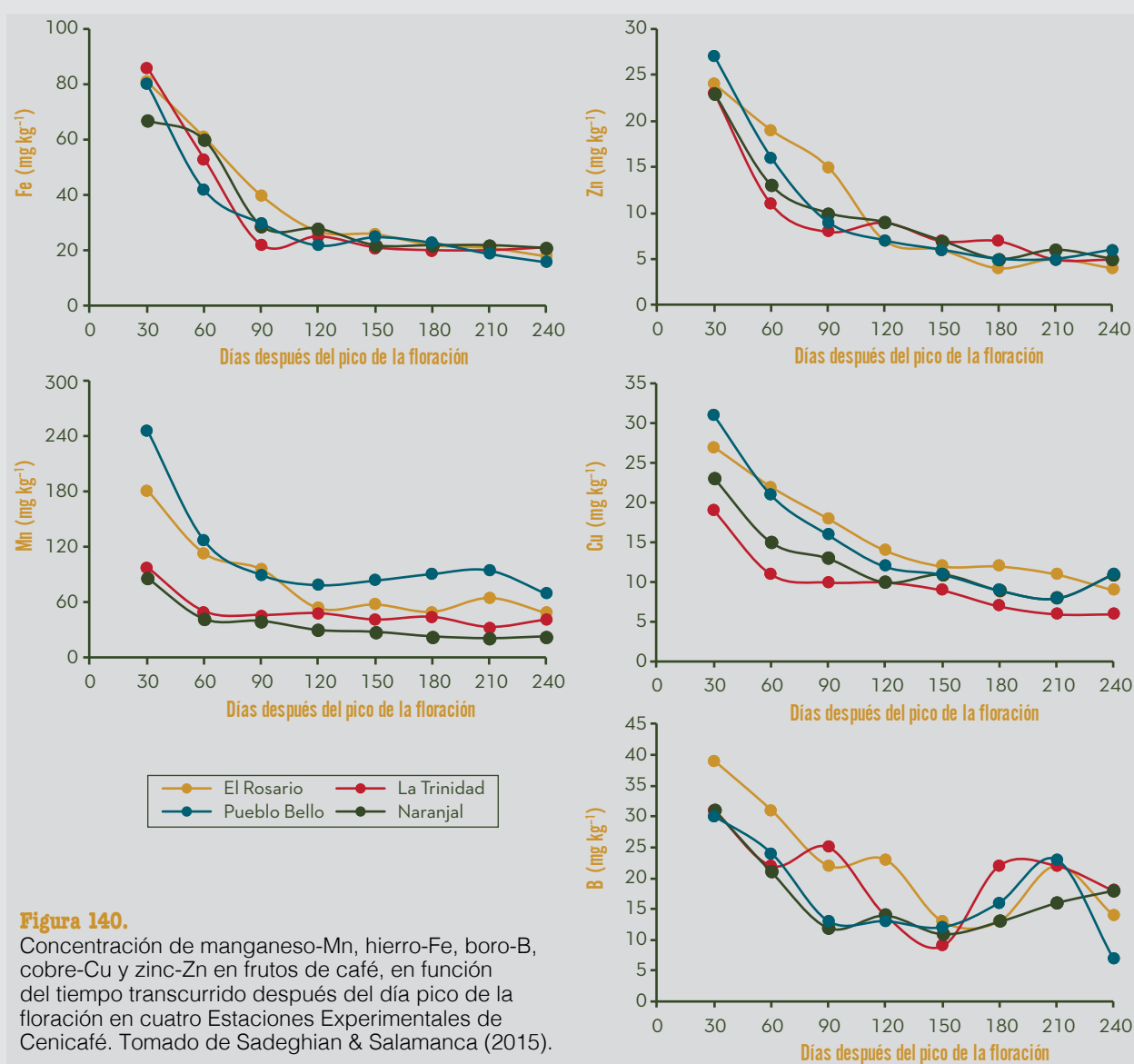


Tabla 44.

Contenido de micronutrientes en 1.000 kg de café cereza (g). Tomado Cenicafé (2017, p. 148).

Departamento	Municipio	Sitio	Mn	Fe	B	Cu	Zn
Antioquia	Venecia	E.E. El Rosario	12,74	4,68	3,64	2,34	1,04
Tolima	Líbano	E.E. La Trinidad	11,96	6,12	5,25	1,75	1,46
Caldas	Chinchiná	E.E. Naranjal	7,37	6,73	5,77	3,52	1,60
Cesar	Pueblo Bello	E.E. Pueblo Bello	18,84	4,31	1,88	2,96	1,61
Huila	Gigante	C.A. Jorge Villamil	32,74	16,04	2,87	3,37	1,90
Huila	Gigante	C.A. Jorge Villamil	17,06	7,94	2,23	2,89	1,57
Huila	Gigante	C.A. Jorge Villamil	87,26	26,46	4,46	4,22	2,74
Huila	Gigante	C.A. Jorge Villamil	19,56	13,61	2,58	3,31	1,77
Quindío	Montenegro	Finca El Agrado	11,58	41,70	5,13	4,72	2,22
Cauca	El Tambo	E.E. El Tambo	69,79	14,47	4,03	4,29	1,74
Quindío	Buenavista	E.E. Paraguaicito	13,20	8,74	4,95	1,40	1,40
Santander	Floridablanca	E.E. Santander	8,16	9,97	2,33	2,48	1,86
Risaralda	Pereira	E.E. La Catalina	8,70	14,41	4,26	3,79	1,83

Hierro (Fe)

Hace parte de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas y representa el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre (5,05%), luego del O, Si y Al. Los minerales primarios y secundarios más importantes de Fe son los óxidos hematita (FeO_3) y magnetita (Fe_3O_4), silicato olivino $[(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4]$, carbonato sidetita (FeCO_3), hidróxido goetita (FeOOH) y fosfatos. Estos presentan diferentes grados de reactividad, desde difícilmente insolubles hasta óxidos férricos recientemente precipitados que, según las condiciones predominantes, pueden pasar a formas disponibles Fe^{2+} (ferroso) y Fe^{3+} (férrico), a la solución del suelo y ser absorbidos por las raíces. La forma Fe^{2+} está presente en condiciones de reducción (baja aireación del suelo) y Fe^{3+} cuando el potencial de oxidación y la acidez del suelo son altos.

Su disponibilidad para las plantas depende, antes que de la cantidad total en el suelo, de la tendencia a formar compuestos insolubles, tanto con la fracción mineral como la orgánica del suelo. La acidez del suelo tiene una importante influencia en la disponibilidad del hierro. A $\text{pH}=3$ existe un alto potencial de suministro

de Fe, pero por cada unidad que aumenta el pH, la disponibilidad se reduce en mil veces, hasta llegar a $\text{pH}=7,5$, en el cual, desde el punto de vista estrictamente químico no existen posibilidades prácticas para obtenerlo. Pese a lo anterior, la absorción de este elemento, aun en circunstancias desfavorables de pH, es un indicador de que en el suelo existen condiciones igualmente de índole químico que propician un estado soluble de Fe en cierta cantidad.

Manganeso (Mn)

Se origina principalmente por la descomposición de las rocas ferromagnéticas y ocupa el decimotercer lugar en la litosfera (0,09%), después del H, P y C. Hace parte de minerales como: pirolusita (MnO_2), braunita ($\text{Mn}^{2+}(\text{Mn}^{3+})_6\text{SiO}_{12}$), hausmanita (Mn_3O_4) y manganita ($\text{MnO} \cdot \text{OH}$), además de estar presente en menores proporciones en minerales primarios, tales como olivino, biotina y hornblenda.

Aunque las cantidades totales en los suelos tienden a ser relativamente altas entre, 200 y 300 mg kg^{-1} , solo una fracción está disponible para las plantas, pues al igual que el Fe, algunos factores afectan su absorción,

especialmente los altos valores del pH, elevados aportes de abonos orgánicos y la interacción con el Fe. La forma más soluble y aprovechable de manganeso por la planta es Mn^{2+} , pero conforme se favorecen los estados superiores de valencia (hasta Mn^{4+}), se reduce su disponibilidad. Ante condiciones de pH bajo y en suelos encharcados, hay una alta disponibilidad, incluso puede haber toxicidad por este elemento si predominan los procesos reductores.

Boro (B)

Está presente en bajas concentraciones en la corteza terrestre y en la mayoría de las rocas ígneas ($<10 \text{ mg kg}^{-1}$). Entre las rocas sedimentarias, la lutita contiene la mayor cantidad ($<100 \text{ mg kg}^{-1}$). En el suelo, sus contenidos totales van desde 2 hasta 200 mg kg^{-1} , pese a ello, en la mayoría de los casos no exceden 80 mg kg^{-1} . De las anteriores concentraciones, solo el 5% puede llegar a estar disponible para las plantas. Gran parte del B total en los suelos se encuentra como turmalina, un borosilicato resistente al intemperismo y, en razón de ello, de difícil disociación. Lo anterior explica su lenta liberación hacia la solución del suelo y la

aparición de las deficiencias, especialmente en sistemas intensivos de producción. El B se adsorbe a las partículas del suelo como ácido bórico (H_3BO_3), con más intensidad en óxidos hidratados de hierro y aluminio; además, una parte del B disponible es retenida por la materia orgánica; sin embargo, por su alta movilidad, puede lixiviarse, principalmente en suelos arenosos.

Las plantas absorben el B en las diferentes formas del ácido bórico: $B_4O_7^{-2}$, BO_3^{-3} , BO_3H^{-2} o BO_3H^- . El movimiento y la disponibilidad de este micronutriente se ven afectados por la interacción de factores como la textura, el pH, la materia orgánica y la humedad del suelo, además de la influencia de otros elementos. La disponibilidad de B disminuye con el incremento del pH, especialmente cuando se acerca a la zona alcalina. La materia orgánica contribuye a una mayor disponibilidad de B, mientras que en suelos con texturas arenosas ocurre lo contrario. La deficiencia de B está asociada a las épocas secas, condición en la que la baja humedad del suelo se traduce en una menor liberación del elemento retenido por la materia orgánica y su transporte hacia la superficie radical. Por último, un exceso de Ca y K puede afectar la toma de B por la planta. Con respecto a la humedad del suelo, Valencia (1964) encontró una correlación positiva entre el nivel foliar de boro y la cantidad de agua retenida por el suelo (Figura 141).

Cobre (Cu)

La concentración de Cu en la corteza terrestre fluctúa entre 50 y 70 mg kg^{-1} . Las rocas ígneas contienen 10 a 100 mg kg^{-1} de este elemento y las sedimentarias entre 4 y 45 mg kg^{-1} . En el suelo, la concentración de Cu va desde 1 hasta 40 mg kg^{-1} , siendo 9 mg kg^{-1} un valor promedio. Los minerales más abundantes y la principal fuente de suministro del Cu en el suelo son los sulfuros, tales como sulfuro cuproso o calcosita (Cu_2S), sulfuro férrico-cuproso o calcopirita ($CuFeS_2$) y sulfuro cúprico o covelita (CuS).

En suelos ácidos ($pH < 7,0$), como los de la zona cafetera de Colombia, la forma iónica

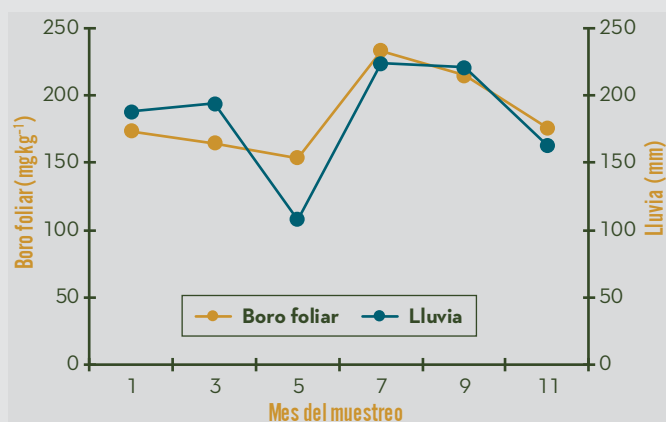


Figura 141.

Variaciones en la concentración de boro en hojas de café y lluvia a través del tiempo. Adaptado de Valencia (1964). La concentración foliar de boro corresponde al promedio de cuatro dosis (50, 100, 200 y 300 g/planta). Mes 1 corresponde a mayo de 1963.

predominante es Cu^{2+} , cuya cantidad se incrementa en la solución conforme disminuye el pH. El ion Cu^{2+} se adsorbe a las superficies de las arcillas, materia orgánica y óxidos de Fe, Al o Mn, sitios desde los cuales pasa a la solución del suelo y es tomado por las raíces, de acuerdo a las condiciones predominantes.

El potencial de la deficiencia de Cu es mayor en suelos excesivamente drenados, como los arenosos. Conforme al incremento del pH se reduce la concentración de Cu en la solución, como consecuencia de la disminución de la solubilidad del elemento y el aumento de la adsorción. Cuando son altos los niveles de Zn, Fe y P pueden presentarse deficiencias de Cu.

Zinc (Zn)

La concentración de Zn en la litosfera se estima entre 80 y 120 mg kg^{-1} (promedio 50 mg kg^{-1}). Puede proceder de diversos minerales, principalmente silicatos willemita (SiO_4Zn_2) y hemimorfita ($\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), sulfuros esfalerita (ZnS) y blenda (ZnS), óxidos cincita (ZnO) y carbonatos smithsonita (ZnCO_3).

Su contenido total en el suelo suele estar entre 10 y 300 mg kg^{-1} ; siendo aprovechable por las plantas solo 10 mg kg^{-1} . Las plantas lo absorben en su forma iónica Zn^{2+} , cuya disponibilidad depende del pH, materia orgánica, interacción con otros elementos y las condiciones del clima. El Zn es menos aprovechable a medida que se incrementa el pH del suelo, especialmente cuando se aproxima a condiciones de neutralidad o alcalinidad. Compuestos orgánicos de alto peso molecular, tales como lignina y ácidos húmicos y fúlvicos, pueden formar complejos estables con Zn, bien sea solubles o insolubles. En suelos húmicos los complejos tienden a ser más estables y, por tal razón, son mayores las posibilidades de que ocurran deficiencias; lo contrario sucede en suelos minerales con menores contenidos de materia orgánica. Eventualmente, la presencia de altos niveles de Cu^{2+} , Fe^{2+} y P reducen la disponibilidad de Zn. Al igual que el B, condiciones de déficit hídrico pueden inducir deficiencias de Zn.

Cloro (Cl)

Se distribuye ampliamente en la naturaleza y está presente en cantidades considerables en los suelos de origen marino y la lluvia. Ocurre en forma iónica Cl^- , haciendo comúnmente parte de sales solubles como NaCl, KCl, CaCl_2 y MgCl_2 . Es uno de los iones más móviles del suelo y, se pierde fácilmente por la lixiviación, al igual que el nitrato. Su concentración en el suelo varía entre 20 y 900 mg kg^{-1} , con un promedio de 100 mg kg^{-1} . En la solución del suelo, suele ocurrir con menos de 0,5 a más de 6.000 mg L^{-1} . En el estudio desarrollado por Cenicafé en un Andisol de la zona cafetera, del municipio de Chinchiná (Caldas), se registraron concentraciones menores a 1,0 mg L^{-1} de Cl^- cuando no se aplicó KCl y cerca de 14 mg L^{-1} al suministrar 500 $\text{kg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ de este fertilizante (Figura 142). La mayor concentración de iones se encontró entre los 21 y 49 días después de la fertilización; luego de 105 días, la concentración de iones en la solución del suelo fue similar a la encontrada antes de la aplicación del fertilizante, resultado que revela la alta movilidad del elemento en el suelo.

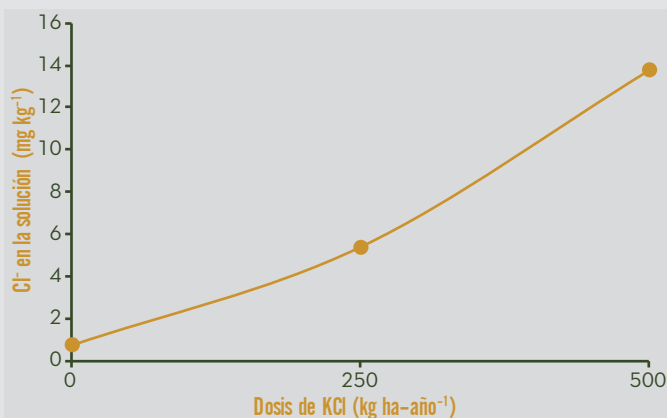


Figura 142.

Concentración de cloro (Cl^-) en la solución del suelo en respuesta a la aplicación de KCl. Tomado de Cenicafé (2005, pp. 24-26). Promedio de registros tomados 21 y 49 días después de la aplicación de nueve tratamientos (tres dosis de N en combinación con tres dosis de K_2O , suministradas como KCl).

Interpretación de los resultados de análisis de suelos

Quizá el aspecto más importante en la valoración de los micronutrientes del suelo tiene que ver con el método analítico que se emplea en el laboratorio, el cual incluye tanto la extracción química de estos, como su valoración. Es necesario destacar que los resultados de los análisis de suelos tendrán validez y significado práctico, siempre y cuando el método empleado esté soportado en estudios de calibración, en los cuales se correlaciona la absorción de los nutrientes con el resultado del análisis de suelos (nivel del elemento).

Con el propósito de seleccionar métodos para analizar los contenidos de Fe, Mn, Zn y Cu, Valencia y Franco (1988) correlacionaron la absorción de estos elementos por plantas de café, desarrolladas en ocho suelos representativos de la zona cafetera de Colombia y contrastantes en su origen y propiedades físicas y químicas. El análisis de los resultados permitió seleccionar los siguientes tres métodos de los cinco evaluados: i) Referencia: EDTA 0,01M más NH₄OAc 1N pH=7,0, ii) Mehlich (doble ácido): HC1 0,05N más H₂SO₄ 0,025N y iii) Lindsay y Norvell: DTPA 0,005M más TEA 0,01M más CaCl₂ 0,01M pH=7,3.

Han sido pocas las investigaciones realizadas en torno a la aplicación de los micronutrientes para café en Colombia, por lo que es limitada la información que permita establecer con cierto

nivel de seguridad las clases de fertilidad para la interpretación de los resultados del análisis de suelos (estudios de calibración); de allí que los rangos que se emplean actualmente corresponden a los sugeridos en el ámbito general para diferentes cultivos en Colombia (Tabla 45).

Cabe aclarar que el panorama descrito es un común denominador para los demás países productores del grano, en el sentido de que no existen o que son contados los estudios de calibración en el campo, que sustenten las recomendaciones de los micronutrientes en función de los resultados de los análisis de suelos para café, situación que se justifica, en parte, por la dificultad que existe para estudiarlos, en razón de las pequeñas cantidades allí presentes (Raij, 2011).

En el ámbito general, los contenidos de Fe y Mn en el horizonte A de los suelos de la zona cafetera de Colombia tienden a ser altos; tendencia que puede modificarse parcialmente para Cu y Zn, en algunos departamentos (Tabla 46); además, y como es de esperarse, se presentan variaciones entre las diferentes regiones del país. Recientemente, se han realizado estudios detallados en materia de la fertilidad del suelo, en los cuales se incluyen los micronutrientes. Un ejemplo de lo anterior se muestra para el Huila en las Tablas 47 y 48 para Zn y B, respectivamente. La información en mención permite identificar áreas con posibles deficiencias y dónde se requiere mayor atención.

Tabla 45.
Interpretación de los niveles de micronutrientes en el suelo para café en la etapa de producción. Tomado de Sadeghian (2018).

Micronutriente	Unidad	Bajo	Medio	Alto
Hierro (Fe)	mg kg ⁻¹	< 25	25 – 50	> 50
Manganeso (Mn)	mg kg ⁻¹	< 5	5 – 10	> 10
Zinc (Zn)	mg kg ⁻¹	< 1,5	1,5 – 3,0	> 3,0
Cobre (Cu)	mg kg ⁻¹	< 1,0	1,0 – 3,0	> 3,0
Boro (B)	mg kg ⁻¹	< 0,2	0,2 – 0,4	> 0,4

*Los rangos corresponden a valores promedio, sugeridos de manera general, razón por la cual se consideran de índole informativo.



Tabla 46.

Valores promedio y error estándar (E.E.) de Fe, Mn, Zn y Cu (mg kg^{-1}), correspondientes a muestras de suelos tomadas del horizonte A en algunos departamentos de Colombia. Extracto de estudios de zonificación de la zona cafetera de Colombia.

Departamento	Número de datos	Fe		Mn		Zn		Cu	
		Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.	Prom.	E.E.
Antioquia	93	314,2	22,7	68,1	10,1	5,4	0,6	4,1	0,46
Boyacá	36	332,9	31,4	15,4	3,6	3,0	0,5	1,0	0,19
Caldas	249	303,4	13,3	51,4	4,0	4,4	0,3	4,0	0,2
Cauca	53	200,2	20,5	37,6	11,0	2,5	0,3	-	-
Cundinamarca	38	223,7	32,1	60,5	16,0	12,0	7,2	-	-
Nariño	16	246,4	39,0	66,4	20,9	3,1	0,9	-	-
Norte de Santander	17	451,0	76,0	18,8	8,3	3,8	0,6	-	-
Quindío	43	163,2	17,2	28,0	7,7	4,1	0,4	2,0	0,23
Risaralda	46	290,9	28,0	48,7	11,1	7,5	0,7	4,3	0,45
Santander	129	359,9	27,7	22,2	6,1	8,7	3,3	1,5	0,2
Tolima	25	157,1	26,2	30,7	8,1	2,5	0,6	1,2	0,7
Valle del Cauca	55	237,7	27,1	77,3	8,9	5,9	0,8	3,8	0,62

Tabla 47.

Frecuencia de muestras de suelo con valores de zinc menores de $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$ en la zona cafetera del departamento del Huila. Tomado de Sadeghian et al. (2019).

Frecuencia	Municipio
Alta (60-80%)	Tesalia
Media (40-60%)	Agrado, Campoalegre, Hobo, Íquira, Nátaga, Neiva, Paicol, Rivera, Suaza y Teruel
Baja (20-40%)	Acevedo, Aipe, Algeciras, Baraya, Garzón, Guadalupe, La Plata, Palermo, Pital, Pitalito, Santa María, Tarqui y Tello
Muy baja (0-20%)	Altamira, Colombia, Elías, Gigante, Isnos, La Argentina, Oporapa, Palestina, Saladoblanco, San Agustín y Timaná

Tabla 48.

Frecuencia de muestras de suelo con valores de boro menores de $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ en la zona cafetera del departamento del Huila. Tomado de Sadeghian et al. (2019).

Frecuencia	Municipio
Alta (60-80%)	Gigante
Media (40-60%)	Guadalupe, Íquira, Isnos y San Agustín
Baja (20-40%)	Aipe, Algeciras, Altamira, Baraya, La Plata, Neiva, Palestina, Pital, Pitalito, Rivera, Suaza, Tello, Teruel y Tesalia
Muy baja (0-20%)	Acevedo, Agrado, Campoalegre, Colombia, Elías, Garzón, Hobo, La Argentina, Nátaga, Oporapa, Paicol, Palermo, Saladoblanco, Santa María, Tarqui y Timaná

Producción de café en respuesta al suministro de micronutrientes

Entre los trabajos de investigación en torno a los micronutrientes en café, se ha dado una mayor importancia al B y, parcialmente al Zn; consideración que se basa en una mayor frecuencia de la aparición de los síntomas de la carencia de estos en Colombia.

Valencia (1964) condujo uno de los primeros trabajos relacionados con el B; en el cual se evaluaron cinco dosis de bórax: 0, 50, 100, 200 y 300 g/planta. Con el aumento en las cantidades aplicadas disminuyó significativamente el número de los brotes muertos que caracterizan la deficiencia de este nutriente, resultado que corroboró la efectividad de la labor; adicionalmente, el análisis foliar confirmó la absorción de B, en cuyo caso, los mayores incrementos se observaron para las primeras dosis (Figura 143). También se encontró una correlación positiva entre el nivel foliar de boro y la cantidad de agua retenida por el suelo (Figura 141). Con base en los resultados, se recomienda aplicar entre 20 y 50 g/planta

de bórax por año, según la gravedad de las manifestaciones de la deficiencia, con lo cual es posible que se consigan aumentos en producción.

Con el objetivo de evaluar el efecto de la aplicación de B y Zn en cafetales con síntomas visibles de deficiencia, Valencia et al. (1968) realizaron un ensayo con café variedad Caturra a pleno sol, ubicado en el municipio de Fredonia (Antioquia). Los tratamientos incluían la aspersión foliar de sulfato de Zn al 0,5%, la aplicación de 50 g/planta de bórax y la combinación de los dos elementos en plantaciones zoqueadas y sin zoquear. El suministro de Zn no afectó la concentración foliar del nutriente, mientras que la aplicación al suelo de bórax aumentó tanto el boro como el calcio. En cuanto a la producción (Figura 144), no se registraron diferencias estadísticas entre los tratamientos, resultado que se relacionó, entre otros aspectos, con el tiempo reducido de la investigación (un año) y la variabilidad de los datos.

En Colombia, muchos de los fertilizantes compuestos de tipo complejo granulados contienen entre 0,1% y 0,2% de B; de tal suerte que al aplicar dosis cercanas a 1.500 kg ha-año⁻¹, se llegan a proporcionar 3,0 kg ha-año⁻¹ de este nutriente, cantidades

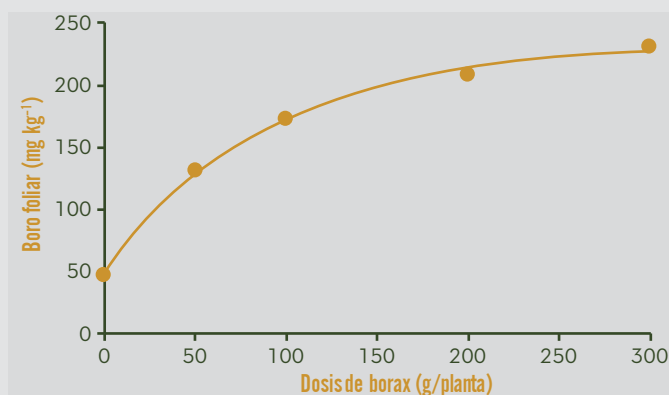


Figura 143. Concentración foliar de B en respuesta a su aplicación en forma de bórax. Tomado de Valencia (1964).

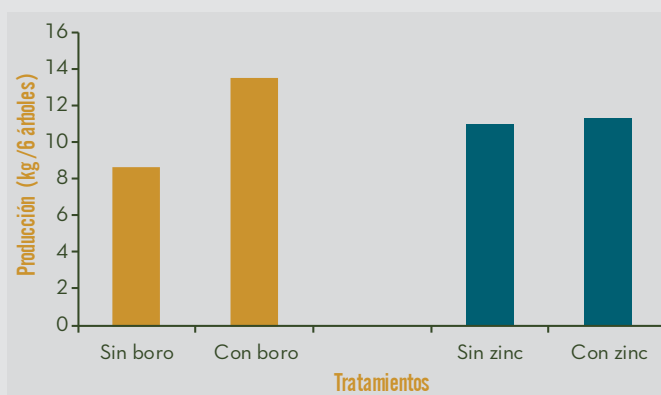


Figura 144. Producción de café en respuesta al suministro de boro y zinc. Tomado de Valencia et al. (1968).

que se consideran suficientes para café en la etapa de producción. En cuanto al Zn, estos abonos tienen normalmente una concentración cercana al 0,1%. En los estudios comparativos de fertilizantes complejos que contienen B y Zn frente a aquellos que se obtienen mediante mezclas físicas y desprovistos de estos dos micronutrientes, no se han encontrado diferencias en producción (Figura 145), ni en la calidad física del grano, evaluada a través del factor de rendimiento en trilla (Figura 146).

Una de las investigaciones de mayor envergadura en materia de los micronutrientes fue conducida por Uribe y Salazar (1981), quienes en siete localidades de la zona cafetera de Colombia, establecieron 20 campos experimentales con el fin de evaluar

el efecto de la aplicación al suelo de Fe, Mn, B, Cu y Zn en plantaciones de café a libre exposición solar y sin síntomas visibles de deficiencias de estos elementos. Como fuente de B se utilizó el bórax y los demás micronutrientes se aplicaron en forma de quelatos (60 g/planta). En ninguno de los lugares hubo incremento en la producción debido a los tratamientos (Figura 147); por el contrario, eventualmente se presentaron síntomas de toxicidad por boro, como consecuencia de su aplicación continuada, resultado que mereció el llamado de atención de los autores, quienes concluyen que la falta de respuesta tiene su justificación en la suficiencia de los suelos para soportar los requerimientos de los cultivos.

Frecuentemente los caficultores realizan aplicaciones de macro y micronutrientes vía foliar

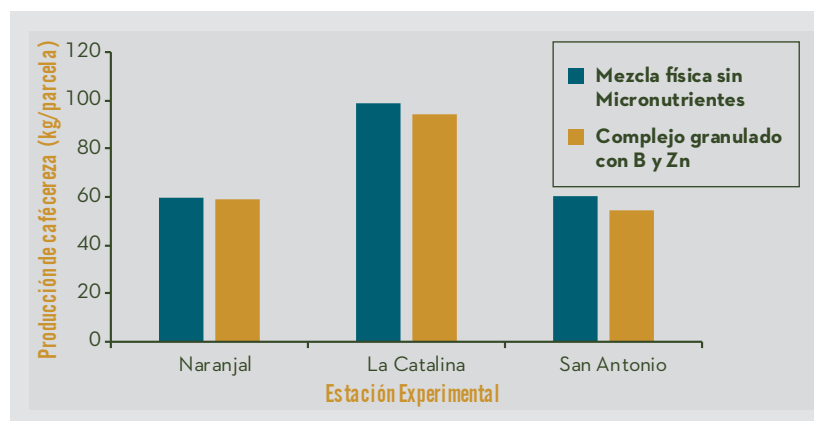


Figura 145.

Producción de café (promedio de tres años), obtenida en tres Estaciones Experimentales de Cenicafé, en respuesta a la aplicación de un fertilizante granulado con B y Zn y una mezcla física de fertilizantes simples sin B y Zn. Las dosis suministradas de macronutrientes fueron iguales en los dos tratamientos. Las dosis de B y Zn en el fertilizante granulado fueron 2,8 y 1,4 kg ha-año⁻¹, respectivamente. La mezcla física se obtuvo a partir de urea, DAP y KCl; además de óxido magnesio que se aplicó por separado.

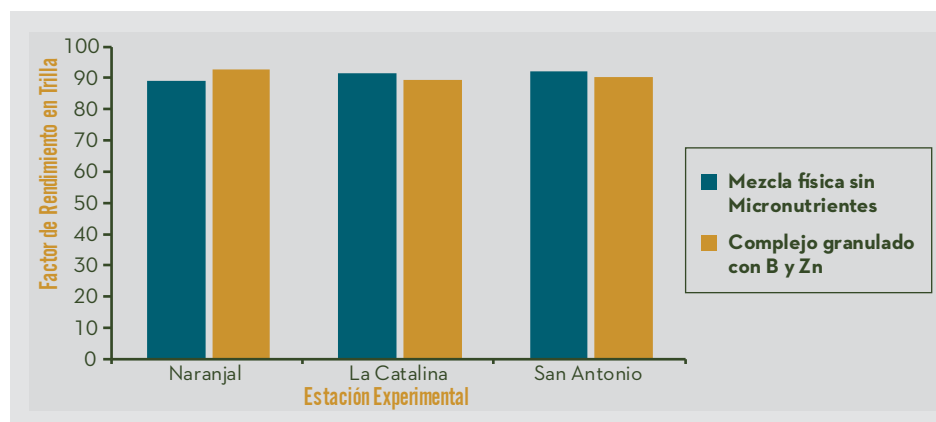


Figura 146.

Factor de rendimiento en trilla, registrada en tres Estaciones Experimentales de Cenicafé, en respuesta a la aplicación de un fertilizante granulado con B y Zn y una mezcla física de fertilizantes simples sin B y Zn. Tomado de Sadeghian et al. (2007).

en las diferentes etapas del cultivo; al respecto, se cuenta con la evidencia que elementos como B son absorbidos por las hojas de café (Salamanca & González, 2020); sin embargo, esta práctica no

se traduce en aumentos de la materia seca de la planta de café en fase de almácigo (Guzmán & Riaño, 1996; Valencia, 1975), ni en el campo (Salamanca & González, 2020).

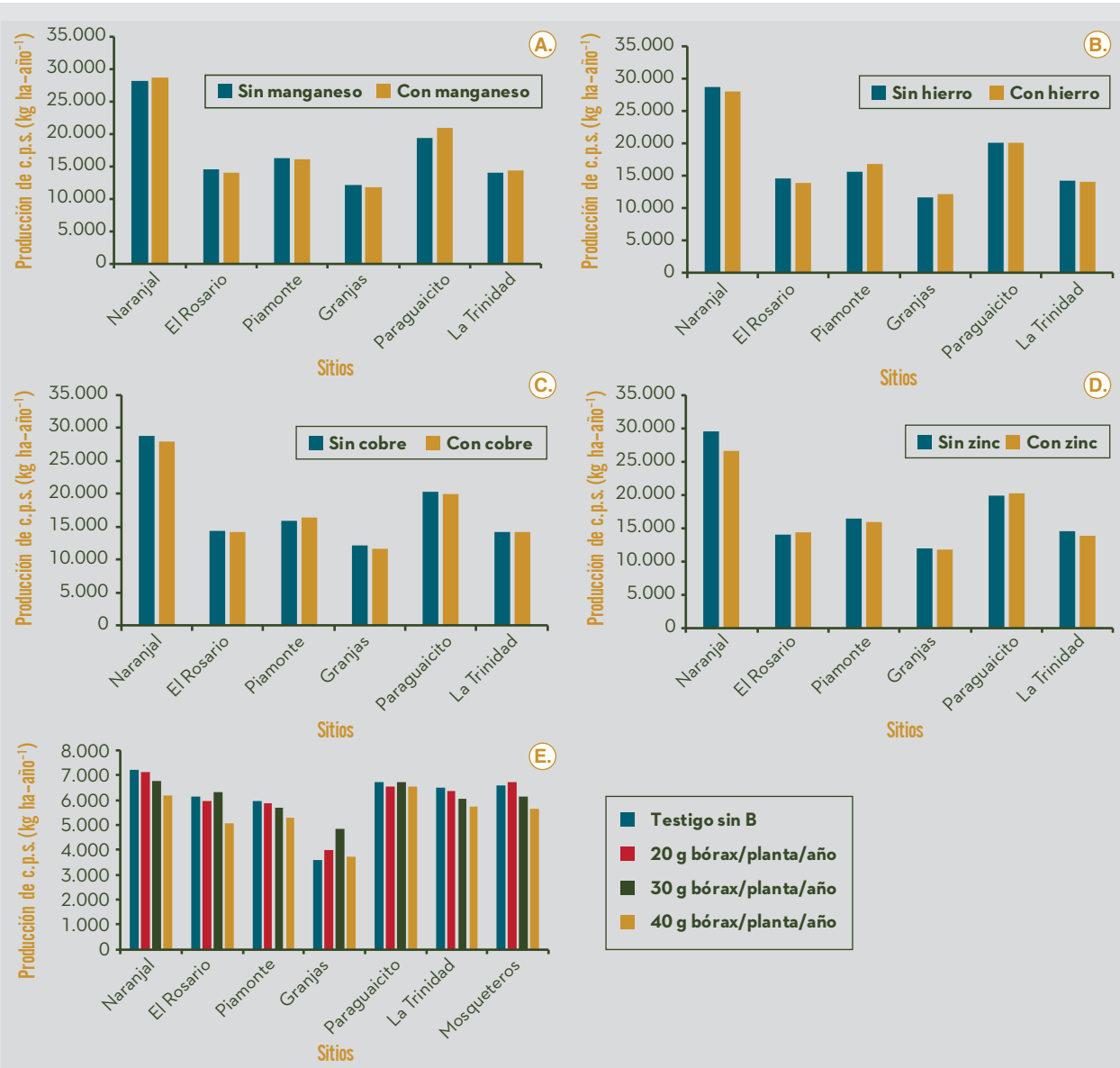


Figura 147. Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta al suministro de **A.** manganeso, **B.** hierro, **C.** cobre, **D.** zinc y **E.** boro en algunas localidades de Colombia. Adaptado de Uribe y Salazar (1981).



Evaluación de la fertilidad del suelo



Uno de los aspectos determinantes para cumplir las metas de producción que se proponen alcanzar está relacionado con la demanda de nutrientes en cada una de las etapas fenológicas del cultivo, la cual varía según la especie/variedad, el potencial de producción, las condiciones del clima, las características del suelo y el manejo. Estos factores también determinan la cantidad necesaria de nutrientes que debe proporcionarse vía fertilización para optimizar el rendimiento; de hecho, la remoción continuada de nutrientes a través de la cosecha, con poco o nulo reemplazo, compromete las futuras producciones.

Dado el papel que juega el suelo en la ecuación de la producción, sería conveniente conocer aquellas de sus propiedades que determinan su fertilidad, o por lo menos las más influyentes. De acuerdo con el glosario de *Soil Science Society of America* ([SSSA], 2008), la fertilidad del suelo hace referencia a **la capacidad de un suelo para proporcionar nutrientes en cantidades adecuadas y balanceadas que requieren plantas o cultivos específicos para su crecimiento**. En concordancia con lo anterior, la evaluación de la fertilidad del suelo es quizás la principal vía para la toma de decisiones en un manejo eficiente de los nutrientes. Esta consiste en estimar el estado de los nutrientes disponibles de un suelo para la producción de cultivos. Una evaluación correcta de la fertilidad del suelo ayuda a tomar las medidas apropiadas, tendientes a garantizar el suministro adecuado de nutrientes con el fin de suplementar, vía fertilización, las cantidades que el suelo puede proporcionar.

La fertilidad del suelo, como ciencia o disciplina, es compleja y demanda la integración de conocimientos básicos de biología, física y química, además de requerir el desarrollo de prácticas de manejo de nutrientes que no sólo persiguen altas productividades, sino también la protección del medio ambiente (Sims, 1999). Por consiguiente, la evaluación de la fertilidad del suelo requiere de análisis químicos, físicos y, eventualmente biológicos, cuyos resultados sirven de guía para estimar la cantidad de cada nutriente y, en ocasiones,

la necesidad de la aplicación de enmiendas, principalmente cales, yeso y abonos orgánicos, con el fin de corregir la acidez o remediar otro tipo de problemas como la compactación, por ejemplo, limitaciones en la aireación y retención de humedad.

Entre las técnicas más comúnmente empleadas para evaluar el estado de los nutrientes están: el análisis de suelo, los síntomas visuales de deficiencias nutricionales y el análisis de tejidos (por ejemplo, análisis foliar). El objetivo de estas técnicas es conocer la disponibilidad de los nutrientes en el suelo con el fin de tomar medidas correctivas que garanticen una nutrición óptima de las plantas y un agotamiento mínimo de las reservas del suelo. Los aspectos relacionados con los síntomas de deficiencias y análisis foliar se considerarán en el capítulo correspondiente al estado nutricional de las plantas.

El suelo como reserva de nutrientes

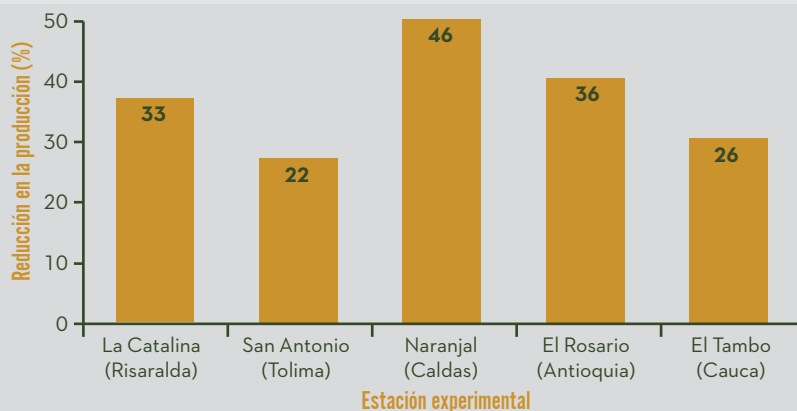
El suelo constituye la despensa de nutrientes para las plantas; sin embargo, en la mayoría de las ocasiones las reservas que contiene no son suficientes para satisfacer por completo la demanda que estas tienen. Adicionalmente, los suelos difieren en su capacidad para proporcionar los elementos requeridos; de allí

que la respuesta a la fertilización sea también diferente entre un sitio y otro (Figura 148). A medida que los agricultores, en particular los caficultores, desconocen la fertilidad del suelo —es decir, no realizan análisis de suelo— y definen planes generales para la nutrición de sus cultivos, aumentan los riesgos económicos y ambientales, pues estarían aplicando fertilizantes y enmiendas cuya respuesta es incierta.

La Figura 149 ilustra la respuesta del café a dosis crecientes de nitrógeno (N) en dos localidades de Colombia, disímiles en su porcentaje de materia orgánica (MO): Estación Experimental Paraguaicito (Buenavista, Quindío) con 5% y Estación Experimental La Trinidad (Libano, Tolima) con 19%. Cuando en Paraguaicito no se aplica N (dosis cero) sólo se logra el 64% de la producción máxima alcanzable (3.790 kg ha-año⁻¹ de café pergamino seco), mientras que en La Trinidad se alcanza el 82% de producción más alta (3.873 kg ha-año⁻¹ de café pergamino seco). Esta diferencia radica en el aporte del nutriente que proviene de la MO del suelo en cada sitio, y puede estimarse de una manera tentativa con la proyección de las curvas del rendimiento hasta el intercepto en el eje X, como lo indica Malavolta (2006); en este sentido, en Paraguaicito hay un aporte de N equivalente a 200 kg ha-año⁻¹ por parte del suelo, frente a 500 kg ha-año⁻¹ en La Trinidad. Un análisis de suelo detectaría las diferencias entre estos dos suelos y daría las bases para un manejo diferencial, con beneficios económicos y ambientales (Sadeghian, 2010-b).

Figura 148.

Reducción porcentual en la producción de café debido a la omisión de la fertilización. Valores promedio de tres cosechas (años 2002 a 2004). Una mayor disminución en la Estación Experimental Naranjal se relaciona con la menor fertilidad del suelo en uno o más nutrientes. Tomado de Sadeghian (2010b).



El análisis del suelo tiene como objetivo ayudar a predecir la cantidad de nutriente que debe proporcionarse para suplementar el nutriente nativo del suelo (Figura 150). Cuando los resultados del análisis indiquen que la fertilidad del suelo es muy alta (nivel de suficiencia igual al 100%), podrá prescindirse totalmente del suministro del nutriente vía fertilización. En la medida en que se reduce el contenido del nutriente, es decir, que disminuye el nivel de suficiencia del suelo, será necesario suministrarlo con el fin de evitar que se reduzca la productividad.

Análisis de suelos

En el ámbito general, el análisis de suelos se define como cualquier medición química, física y/o biológica que se realiza a un suelo; sin embargo, con el paso del tiempo, el término análisis de suelo ha llegado a representar dos significados, uno “restringido” y el otro “amplio”. El término está restringido en cuanto hace referencia a los métodos químicos rápidos para evaluar el estado de los nutrientes disponibles para la planta, la salinidad, la acidez y la toxicidad de elementos de un suelo. Su significado amplio representa un “programa” de investigación que incluye interpretaciones, evaluaciones, fertilizantes y recomendaciones de enmiendas, basadas en los resultados de análisis químicos y otras consideraciones. Por

lo tanto, es necesario distinguir entre aquellos factores que representan datos técnicos y aquellos que son juicios interpretativos (Peck & Soltanpour, 1990).

Desde la investigación, el análisis químico del suelo se considera la principal herramienta para el diagnóstico de la fertilidad del suelo, y con cuya ayuda se generan las recomendaciones de fertilizantes y enmiendas, teniendo en cuenta las consideraciones económicas y ambientales.

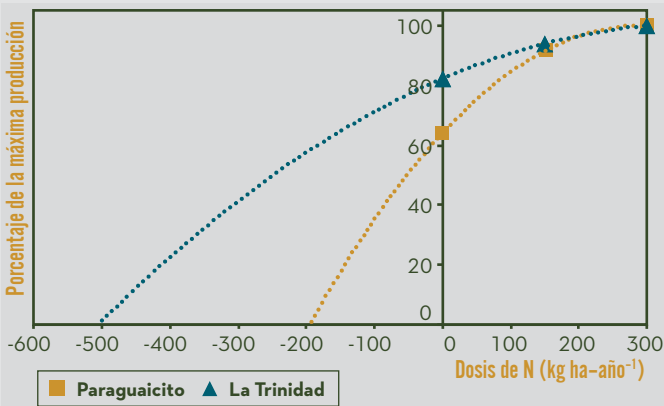


Figura 149. Porcentaje de la máxima producción de café en respuesta a la fertilización con nitrógeno (N) en dos Estaciones Experimentales de Cenicafé. Tomado de Sadeghian (2010a).

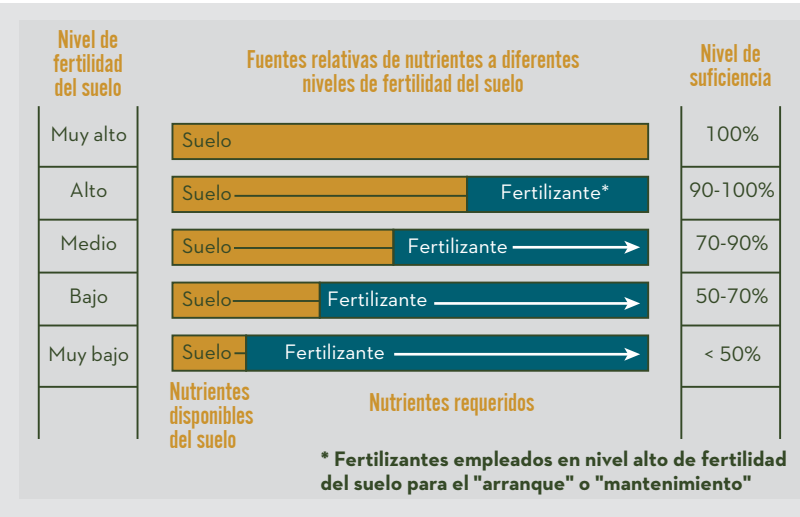


Figura 150. Manejo de la fertilización según el nivel de la fertilidad del suelo y el nivel de la suficiencia del suelo. A medida en que se reduce el nivel de la fertilidad del suelo, disminuye su capacidad para proporcionar en cantidades suficientes los nutrientes a las plantas; por lo tanto, para evitar que reduzca la producción será necesario suministrar el nutriente mediante la fertilización. Tomado de Havlin et al. (2017).



Desde la investigación, un programa de análisis de suelos, destinado a generar estas recomendaciones comprende los siguientes aspectos: (1) toma de muestras en el campo, (2) análisis químico de las muestras, (3) interpretación de los resultados del análisis químico, y (4) recomendaciones de la cantidad del nutriente requerido por el cultivo, basadas en el análisis (Havlin et al., 2017; Foth y Ellis, 1997).

Muestreo del suelo

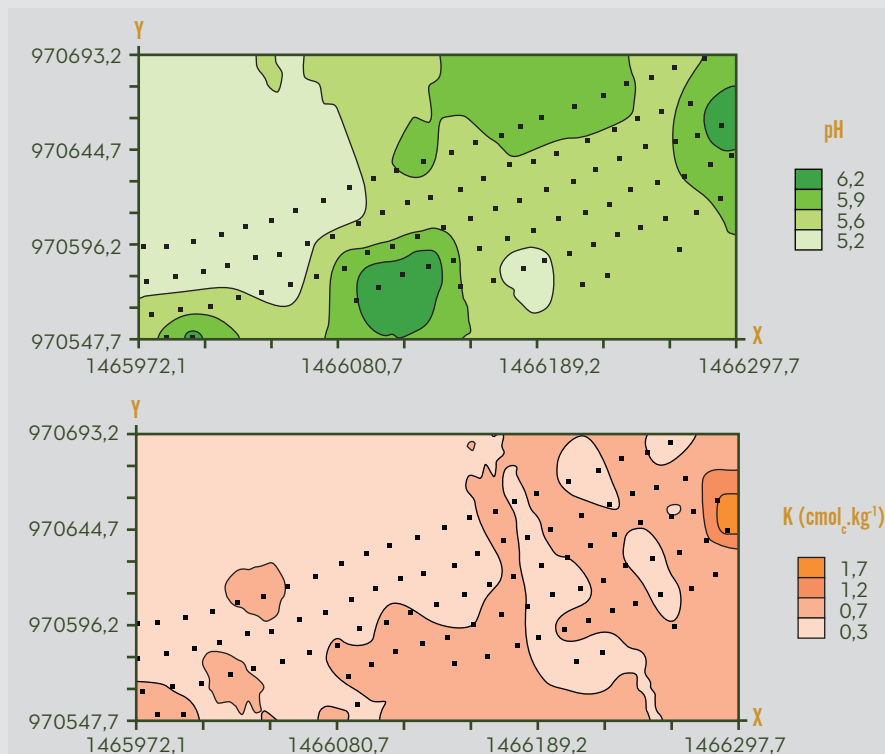
Las propiedades del suelo que determinan su fertilidad presentan una alta variabilidad, aun en cortas distancias, debido al efecto de la acción e interacción de los factores y procesos de formación; hecho que toma mayor relevancia en condiciones montañosas, como son muchas de las regiones de Colombia en donde se cultiva café. Un ejemplo a escala de lote se observa en la Figura 151, en la cual el pH y los contenidos de potasio varían de

forma independiente, lo que sugiere que la variabilidad es un fenómeno relacionado con cada propiedad del suelo y del sitio. Ante esta situación no resulta fácil obtener una muestra que represente la realidad del campo.

Si se consideran los primeros 20 cm de profundidad del terreno donde se encuentran la mayoría de las raíces de café, el peso correspondiente a una hectárea de suelo puede variar aproximadamente entre 1,4 y 2,8 millones de kilogramos. Ejemplo de este contraste son los Andisoles, con baja densidad aparente ($0,7 \text{ g cm}^{-3}$), y suelos arenosos con alta densidad aparente ($1,4 \text{ g cm}^{-3}$). Mediante el análisis de suelos se busca representar la fertilidad correspondiente a los valores en referencia, por medio de una muestra que no supere 1,0 kg; de allí, los cuidados que deben tenerse en cuenta. En este sentido, los aspectos más importantes se relacionan con el área del lote y el número de sub-muestras (muestras simples) para conformar una muestra compuesta, además de la época, el

Figura 151.

Variabilidad espacial del pH y potasio intercambiable (K^+) del suelo de un lote de café en el municipio de Sevilla, departamento del Valle del Cauca. Tomado de Patiño (2005).



equipo, el sitio y la profundidad del muestreo (Sadeghian, 2008-a).

En la Tabla 49 se presentan los parámetros estadísticos, correspondientes a los resultados de los análisis de suelos en dos lotes de café, en los que se realizaron muestreos en retícula de 10 x 10 m en una hectárea. Se destaca el hecho que en uno de ellos (Estación Experimental Naranjal) existe una menor variación de todas las propiedades del suelo analizadas con respecto al otro (Estación Experimental Paraguaicito); pese a ello, en los dos sitios el comportamiento de la distribución de los datos tiende a ser similar, pues la asimetría es casi siempre a la derecha, es decir, que la mayoría de los datos se encuentran o se sitúan por encima de la media. En las dos localidades se presenta una menor variación para el pH y la materia orgánica (MO); además, para estas variables los valores de la moda son relativamente similares a los del promedio. Lo anterior tiene implicaciones sobre el grado de acierto que pueda tenerse en las recomendaciones de la

fertilización con base en los resultados de los análisis de suelos a nivel de lote.

En la Figura 152 puede observarse la frecuencia de la distribución de K intercambiable (K^+) para las dos localidades; en la Estación Paraguaicito, el 51% de los puntos muestreados son deficientes en K^+ (contenidos inferiores a $0,40 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), por lo tanto, las dosis a recomendar deberían ser altas; sin embargo, el valor promedio de este elemento ($0,43 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), sugiere suministrar cantidades bajas. En contraste, la variabilidad de K^+ en la Estación Naranjal es menor, pues el 76% del área tiene niveles muy bajos de K^+ y el restante 24% de contenidos que se consideran bajos.

El número de sub-muestras necesarias para obtener una muestra compuesta depende de la variación que presenta cada propiedad analizada y el error relativo de estimación (E), asociados a un nivel de confiabilidad. Con base en los datos originales de la Tabla 49, se calculó el número mínimo de sub-muestras

Tabla 49. Parámetros estadísticos asociados a las propiedades del suelo, resultantes de un muestreo en retícula de 10 x 10 m (100 muestras en una ha) en dos Estaciones Experimentales de Cenicafé. Tomado de Sadeghian (2010a).

Propiedad	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	C.V. (%)	Distribución
Paraguaicito							
pH	3,80	5,60	4,60	4,50	4,20	9,90	AD
MO (%)	5,20	9,79	7,10	7,11	6,20	14,79	AD
K ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0,10	0,95	0,43	0,40	0,29	42,39	AD
Ca ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0,20	9,50	2,21	0,75	0,50	105,5	AD
Mg ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0,00	1,90	0,40	0,20	0,10	103,6	AD
Al ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0,10	4,20	2,11	2,65	2,90	64,35	AI
P (mg kg^{-1})	2,00	134,00	38,94	29,00	5,00	88,14	AD
Naranjal							
pH	4,60	5,20	4,80	4,90	5,00	2,90	AI
MO (%)	10,80	16,80	14,26	14,25	14,00	7,87	AD
K ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0,11	0,28	0,18	0,18	0,19	21,44	AD
Ca ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0,70	4,80	1,78	1,70	1,10	45,03	AD
Mg ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0,20	1,80	0,57	0,50	0,40	40,59	AD
Al ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0,20	1,40	0,88	0,90	1,10	31,46	AD
P (mg kg^{-1})	1,00	5,00	2,59	3,00	3,00	28,56	AD

Fuente: Ochoa (2001). AD = Asimétrica hacia la derecha. AI = Asimétrica hacia la izquierda.

C.V. = Coeficiente de variación.



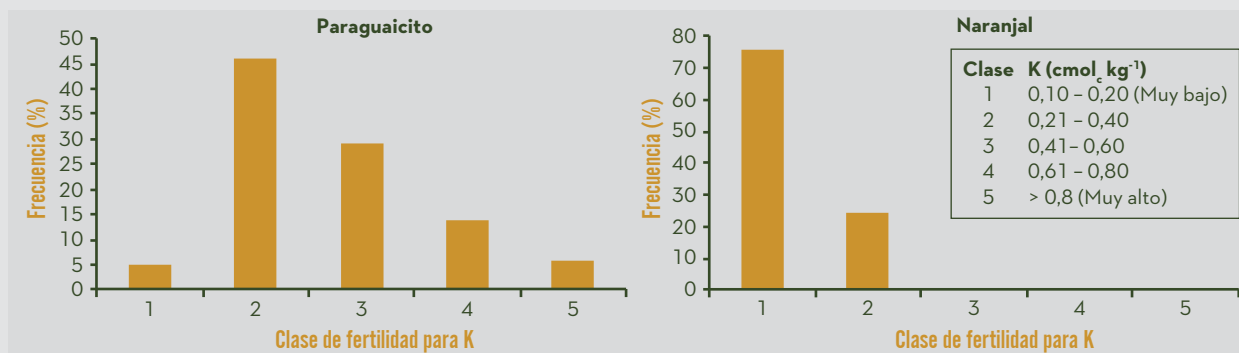


Figura 152.

Frecuencia de distribución de K, correspondiente a un muestreo en retícula de 10 x 10 m (100 muestras en una ha), en dos Estaciones Experimentales de Cenicafé, Colombia. Tomado de Sadeghian (2010a).

para un nivel de confianza del 90% y E del 10% y 20% (Tabla 50). Como es de esperarse, el número de sub-muestras aumenta conforme al incremento del coeficiente de variación; debido a ello, para el pH y la MO el número de sub-muestras es relativamente bajo, caso contrario para el resto de las propiedades, especialmente si se quiere reducir el error.

En un trabajo similar, Lince y Sadeghian (2012) estudiaron la variabilidad de nueve propiedades físicas y 14 químicas del suelo en dos fincas cafeteras del departamento del Quindío (Colombia), con el fin de determinar el número mínimo de muestras simples para conformar una compuesta. Se llevó a cabo un análisis multivariado, el cual permitió la división de las propiedades químicas y físicas de las dos localidades en siete grupos (Tabla 51). Los grupos fueron ubicados en un rango de confianza y error con un número mínimo de muestras menor o igual a 20. Todas las propiedades, a excepción de cuatro, se agruparon de la misma forma en ambas localidades.

Otro aspecto importante a tener en cuenta en el muestreo se relaciona con la profundidad a la cual este se lleva a cabo, dada las variaciones que pueden presentarse. Un ejemplo de lo anterior se presenta para contenidos de fósforo en cuatro unidades de suelos, transcurridos 100 días de la aplicación del elemento (Figura 153).

En áreas cultivadas, la fertilidad del suelo se modifica a través del tiempo, de acuerdo a los sistemas de uso y manejo de este recurso. Las aplicaciones repetidas de fertilizantes incrementan los niveles de los nutrientes, pero en ocasiones afectan negativamente la concentración de otros elementos en el suelo, bien sea por el efecto de la competencia y/o cambios en la acidez y salinidad de los suelos. En un experimento con fines de evaluar el efecto de nitrógeno y potasio en la producción de café, se determinaron las variaciones del pH y los contenidos de nitratos (NO_3^-) y K^+ durante un semestre, después de aplicar tres años consecutivos los tratamientos (Figura 154). Los resultados indican que cuando se utiliza urea como fertilizante, en los primeros 10 días se incrementa sustancialmente el contenido de N nítrico, de acuerdo a las dosis aplicadas. Posteriormente hay un descenso en la concentración de esta fracción, hasta alcanzar los niveles iniciales después de tres meses. En cuanto al K^+ , se observaron diferencias en su contenido al momento de comenzar la evaluación (día cero), como resultado de la aplicación diferencial de los tratamientos durante tres años. A partir de este momento, se registró un incremento de este elemento, resultante de una nueva aplicación, con una residualidad de más de tres meses. Además, puede notarse que la dinámica del K^+ guarda relación con las dosis de N, cuya aplicación se traduce en una reducción del pH (como consecuencia de la nitrificación del

Tabla 50.
Número mínimo de muestras de acuerdo a una confiabilidad del 90% y errores relativos de estimación (E) del 10% y 20%. Tomado de Sadeghian (2010a).

Propiedad	Paraguaicito		Naranjal	
	E = 10%	E = 20%	E = 10%	E = 20%
pH	1,6	0,4	1,5	0,4
MO (%)	3,6	0,9	1,0	0,3
K (cmol _c kg ⁻¹)	29,9	7,5	4,6	1,2
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	184,9	46,2	26,6	6,7
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	172,0	43,0	24,2	6,0
Al (cmol _c kg ⁻¹)	68,1	17,0	20,4	5,1
P (mg kg ⁻¹)	129,3	32,3	14,0	3,5

Ecuación empleada para determinar el número de submuestras: $N = (t \text{ CV}/E)^2$, donde: N = número de submuestras, t = el valor de la tabla de distribución t (Student) para un nivel de probabilidad $\alpha/2$ (bilateral) y número de grados de libertad (n -1, siendo n el número total de las muestras tomadas en el estudio).

Tabla 51.
Grupos de propiedades químicas y físicas según confianza y error para un número mínimo de muestras simples (nmms). Tomado de Lince y Sadeghian (2012).

Grupo	CV (%)	Confianza (%)	Error (%)	nmms	Propiedad
1	≤ 10	95	5	10	pH, Ar, Pt, Ea, Da
2	> 10 ≤ 20	95	10	10	MO, ClC, Hg, A, Rp, Dis
3	> 20 ≤ 35	90	10	20	Mn, Fe, Zn
4	> 50 ≤ 60	95	20	20	Al
5	> 60 ≤ 70	90	20	20	K, Cu, Mg
6	> 70 ≤ 90	75	20	10	P, Ca, B
7	> 110 ≤ 150	75	20	20	S, Ch

Ar: arcilla (%), Pt: porosidad total, Ea: estabilidad de agregados, Da: densidad aparente, Hg: humedad gravimétrica, A: arena (%), CV: coeficiente de variación, Rp: resistencia a la penetración, Dis: distribución del tamaño de agregados en seco, Ch: conductividad hidráulica.

amonio), con efectos más marcados durante los primeros dos a tres meses. La anterior información es útil para definir el momento de muestreo de elementos muy móviles en el suelo como el N o poco móviles como el K⁺.

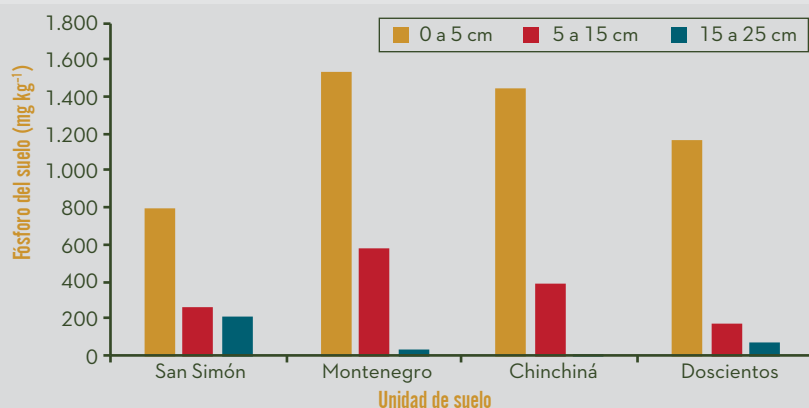
Durante los años recientes ha sido frecuente hablar de la agricultura de precisión y el manejo de la fertilidad del suelo por sitio específico. Cabe aclarar que las técnicas en mención tienen una aceptada y acertada aplicación en áreas relativamente grandes, de acuerdo al cultivo, debido a que es diferente referirse a hortalizas o flores que, a pastos,

palma de aceite o soya. Respecto al café, la aplicabilidad del Manejo Sitio Específico para la nutrición también cambia según las condiciones; por ejemplo, no es lo mismo una explotación mediana o grande en Brasil que en Colombia. En Colombia, el 72% de las 869.800 ha cultivadas en café corresponden a lotes con menos de 1,0 ha y el 89% a menos de 2,0 ha (FNC, SICA, 2021). Por esta razón, promover el tema de la agricultura de precisión para ellos, no tiene las mismas connotaciones que para el 1,0% de los lotes con más de 10 ha. Si a lo anterior se suma el aspecto de la renovación por siembra o zoca, de una parte



Figura 153.

Variaciones en los contenidos de fósforo con la profundidad en cuatro unidades de suelos de la zona cafetera, transcurridos 100 días desde la aplicación del elemento. Tomado de Arias y Sadeghian (2011). Los valores altos se relacionan con la forma de aplicación localizada del elemento, su baja movilidad en el perfil del suelo y el muestreo en los sitios de la aplicación.



de la plantación, el promedio del área de cada lote para los pequeños productores sería muy reducido, hecho que conlleva a pensar que muchos productores ya estarían dando este manejo a sus cafetales, si emplean los análisis de suelos.

En la práctica, para el caso del café, Sadeghian y Lince (2014) recomiendan tener en cuenta los siguientes aspectos para el muestreo de suelo:

Área del lote

La finca debe dividirse en lotes homogéneos, de acuerdo con aspectos como el tipo de suelo, la topografía, la densidad de siembra, el nivel de sombrío, la edad de las plantaciones y las prácticas culturales realizadas. Cabe resaltar que los puntos mencionados tienen una mayor validez cuando las plantaciones son grandes o medianas.

Época del muestreo

Las muestras deben tomarse por lo menos 3 o 4 meses después de la última fertilización; esto reducirá el riesgo de sobrevalorar o subvalorar algunas propiedades del suelo que se afectan temporalmente por las prácticas realizadas antes. Es importante contar con los resultados del análisis antes de efectuar las nuevas siembras, pues de acuerdo a estos se define la pertinencia de llevar a cabo labores como la aplicación de enmiendas (principalmente cales), cuya efectividad es mayor cuando se incorpora

el producto al suelo, labor que difícilmente puede realizarse después de la siembra.

Equipo del muestreo

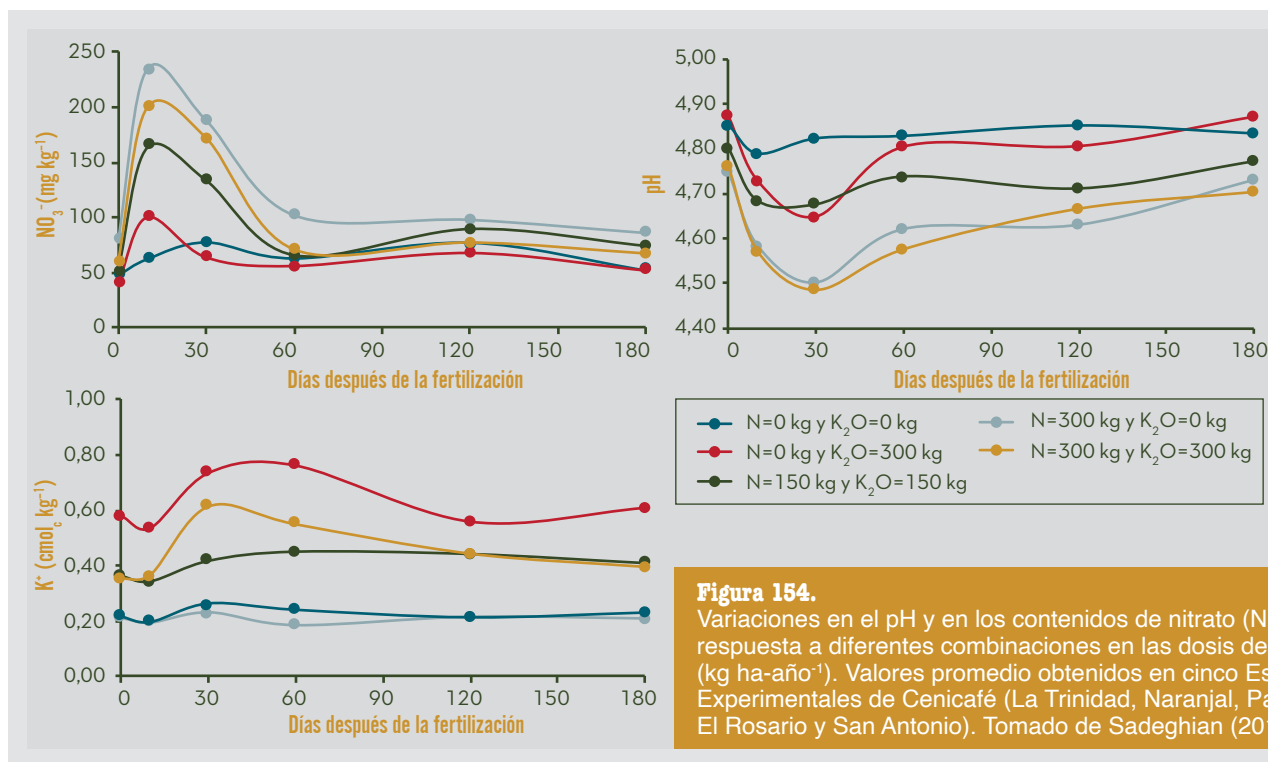
Se deben emplear herramientas limpias y adecuadas como barreno o palín, balde y bolsas plásticas. Quizá el barreno es el instrumento más versátil para la toma de las sub-muestras, y el que menos daño ocasiona a las raíces de las plantas. Se recomienda que la punta sea de acero inoxidable para evitar que se oxide y contamine la muestra.

Sitio y profundidad del muestreo

En caso de que la plantación ya esté establecida, las muestras deben tomarse en el plato del árbol, a 20 cm de profundidad. Si el cultivo no ha sido establecido, las muestras pueden tomarse en cualquier lugar, teniendo en cuenta las demás recomendaciones. Tratándose de cultivos intercalados, es aconsejable tomar muestras por separado en las calles y en el plato del árbol.

Número de sub-muestras

Para lotes con menos de dos hectáreas se sugiere tomar las sub-muestras en diez puntos y para aquellos de mayor tamaño de 15 a 20 puntos. Estas se mezclan para formar una muestra compuesta no superior a 1,0 kg, la cual se envía al



laboratorio. El recorrido por el lote puede hacerse en forma de zigzag, de tal manera que los puntos de muestreo se distribuyan uniformemente en el área objeto de estudio.

Por último, cabe resaltar que los resultados del laboratorio tendrán validez, siempre y cuando la muestra de suelo se haya tomado adecuadamente. En ocasiones, se atribuyen a la calidad de los análisis de laboratorio algunos resultados incoherentes, antes de cuestionar si fue correcto o no el procedimiento para el muestreo de suelo. Por lo tanto, debe recordarse que **los resultados analíticos obtenidos en el laboratorio no pueden ser mejores que la muestra sometida al análisis.**

Análisis químico de suelo

Una vez que la muestra del suelo ha sido recolectada y preparada (secada, homogeneizada y tamizada), mediante el

análisis químico se determina la disponibilidad de los nutrientes para las plantas y otras propiedades físicas y químicas. Por nutriente disponible se entiende la(s) forma(s) química(s) de un elemento esencial, cuya variación en la cantidad se refleja en el crecimiento y producción de las especies cultivadas. Es un principio básico de estas pruebas que los procedimientos químicos sean rápidos, y que su diseño permita medir con precisión el nivel de elementos disponibles del suelo para las plantas. Los procedimientos analíticos del laboratorio comprenden dos partes: extracción y medición. La extracción implica el uso de una solución de reactivo químico para separar del suelo la totalidad o una fracción de los nutrientes disponibles para la planta. Con la medición se valora la cantidad extraída de nutriente, considerada disponible para la planta (Peck & Soltanpour, 1990).

Durante las primeras etapas de un programa ordenado de análisis de suelo, se seleccionan aquellos métodos que presentan una mayor correlación con

respecto a la toma del nutriente por parte de las raíces de las plantas, de tal suerte que con el incremento en la cantidad extraída mediante una metodología en particular (aumento en la disponibilidad) también se incrementa la cantidad absorbida. En consecuencia, los métodos analíticos tendrán validez, siempre y cuando se correlacionen con la absorción del nutriente por la planta.

En el sentido estricto, el análisis del suelo no mide “kilogramos del nutriente disponible”, más bien, mide “un índice de la cantidad de nutrientes del suelo, que luego se correlaciona con la probabilidad de una respuesta a la aplicación de un fertilizante por medio de la calibración del análisis del suelo” (*California Plant Health Association* [CPHA], 2004).

Aunque la fertilidad del suelo está relacionada con muchas propiedades físicas, químicas y biológicas, no es necesario analizarlas todas para generar una recomendación de manejo, a menos que se presente una condición particular que lo justifique (por ejemplo, porosidad, retención de humedad, compactación, entre otras). En este sentido, los ingenieros agrónomos tienen como tarea orientar a los productores en la selección de las características que deben evaluarse, teniendo presente su pertinencia y costo; adicionalmente, ocurre con frecuencia que los encargados de interpretar los resultados y generar las recomendaciones no están suficientemente capacitados para esta labor, lo cual se traduce en un gasto innecesario de los recursos. El análisis químico puede incluir pH, materia orgánica (como indicador de N), P, K, Ca, Mg, S, Al, CIC y algunos micronutrientes. Los suelos de la zona cafetera de Colombia, a excepción de contados casos, no presentan problemas de salinidad ni contenidos altos de sodio, razón por la cual no es necesario analizarlos. Con respecto a las propiedades físicas, generalmente se incluye la textura, la cual se relaciona comúnmente con el drenaje (percolación), la aireación, la retención del agua y la CIC, entre otras.

En el momento de analizar una muestra, es necesario corroborar que el laboratorio seleccionado realice las mismas metodologías empleadas en los estudios que dieron pie a las recomendaciones. Por ejemplo, las sugerencias de Cenicafé para el manejo de la acidez se basan en el valor del pH, analizado mediante la lectura del potenciómetro en una “pasta” o mezcla de suelo:agua en proporción 1:1. Si se emplea otro extractante, por ejemplo cloruro de calcio, o una relación de mezcla diferente a 1:1, el resultado no será el mismo y, por consiguiente, la interpretación no tendrá mayor sentido. En la Tabla 52 se consignan las metodologías actualmente empleadas en la mayoría de los análisis químicos de suelos en Colombia.

Unidades empleadas en los resultados de análisis de suelo

Los resultados de las propiedades químicas del suelo pueden presentarse mediante diferentes unidades; sin embargo, muchas de estas son conceptualmente obsoletas o ambiguas; además, una diversidad amplia de unidades dificulta la comprensión e interpretación de los resultados obtenidos a través del análisis. Por lo anterior, es conveniente emplear el Sistema Internacional de Unidades, el cual se aplica a diferentes ramas de la ciencia y uniformiza los criterios de evaluación (Álvarez, 1994). Actualmente, la mayoría de las unidades empleadas en los análisis de la fertilidad del suelo corresponden a este Sistema y, se espera que en el futuro se unifiquen por completo. Estas son:

- ♦ Materia orgánica (MO), N, saturación de bases y de Al^{3+} : % (porcentaje). Con respecto a la MO, en el Sistema Internacional, se emplea la unidad $dag\ kg^{-1}$ (decagramo por kilogramo), la cual es equivalente a porcentaje.
- ♦ Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} , CIC CICE: $cmol_c\ kg^{-1}$ o $cmol_{(+)}\ kg^{-1}$ (centimol carga por kilogramo). Anteriormente $meq/100\ g$ (miliequivalente por 100 gramos). Estos son equivalentes.

Tabla 52.
Métodos comúnmente empleados en Colombia para el análisis químico de suelos en café. Tomado de Sadeghian (2010a).

Elemento o propiedad	Método
pH	Potenciométrico en relación suelo:agua 1:1 (p/p)
Materia orgánica	Walkley Black y determinación por colorimetría a 485 nm
N	Kjeldahl
P	Extracción con Bray II y determinación por Bray – Kurtz colorimétrica a 660 nm
Ca, Mg, K	Extracción con NH ₄ O Ac 1N – pH 7,0 y determinación por Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA)
Al	Extracción con KCl 1N y determinación por EAA
S	Extracción con fosfato de calcio monohidratado 0,008M y determinación turbidimétrica a 420 nm
Fe, Mn, Zn, Cu	Extracción con EDTA 0,01M en NH ₄ O Ac 1N – pH 7,0 y determinación por EAA
B	Extracción con agua caliente y determinación por colorimetría con azometina – H a 410 nm
CIC	Extracción con NH ₄ O Ac 1N – pH 7,0 y determinación por colorimetría con reactivo de Nessler a 410 nm

- P, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B: mg kg⁻¹ (miligramo por kilogramo). Anteriormente ppm (partes por millón). Estos son equivalentes.

Calibración de los resultados del análisis de suelos

En un programa de investigación, la calibración determina el significado del análisis del suelo en términos de la respuesta de la planta al suministro de un nutriente, bajo cierto nivel de fertilidad del suelo (Dahnke, 1993). La calibración constituye uno de los pasos más importantes de los estudios de la nutrición mineral, pues de lo contrario, los valores obtenidos mediante cualquier método de laboratorio tendrán poco significado. Un análisis de suelo apropiadamente calibrado identifica de manera correcta el grado de deficiencia o suficiencia de un elemento y provee una

estimación de la cantidad de nutriente para eliminar la deficiencia (Evans, 1987).

Existen diferentes vías para calibrar los resultados de análisis de suelos obtenidos en las investigaciones; sin embargo, todos parten de un punto en común: un diagrama de dispersión X-Y, en el cual se expresa el rendimiento relativo (RR) del cultivo, en función del contenido del nutriente objeto de estudio en el suelo. Los trabajos de calibración pueden incluir también propiedades como el pH y la conductividad eléctrica, o elementos como Al y Na.

El RR caracteriza el potencial de la respuesta del cultivo a la aplicación del nutriente, expresado en términos porcentuales. Cuanto menor sea el RR, mayor será la limitación del nutriente (menor disponibilidad) y mayor el potencial de respuesta a su aplicación (Cantarutti et al., 2007). El RR se calcula así (Ecuación <37>):

$$RR(\%) = \frac{\text{Producción del cultivo en el tratamiento sin la adición del nutriente objeto de estudio}}{\text{Producción del cultivo en el tratamiento con la adición del nutriente objeto de estudio}} \times 100$$

<37>



En los dos tratamientos se aplican dosis adecuadas de los demás nutrientes requeridos.

El siguiente paso consiste en escoger un modelo matemático que permita separar los datos en al menos dos poblaciones, una con bajo nivel del nutriente en el suelo, por debajo del cual existe una alta probabilidad de obtener respuesta a su aplicación, y otra con alto nivel del nutriente en el suelo y baja o nula probabilidad de respuesta a su suministro. La línea divisoria entre estas dos clases o categorías se conoce como el **nivel crítico** (NC). En muchos casos es posible establecer tres clases de fertilidad: “Alto” (A), “Medio” (M) y “Bajo” (B), y en ocasiones hasta cinco; incluyendo las clases “Muy Bajo” (MB) y “Muy Alto” (MA).

Con respecto al modelo estadístico para determinar el NC y las clases de fertilidad, no existe un consenso entre los investigadores. Algunos prefieren utilizar aquellos modelos mediante los cuales se llega a un valor discreto; por ejemplo: rectilíneo discontinuo (Cate & Nelson, 1971), lineal plateau (Nelson & Anderson, 1977) y cuadrático plateau (Statistical Analysis System Institute [SAS], 2008) (Figura 155A). En cambio, otros prefieren los modelos curvilíneos continuos, como el

exponencial (principalmente Mitscherlich), inverso y cuadrático (Figura 155B); en este caso se selecciona un valor arbitrario del RR como NC (comúnmente 90% o 95%) o el punto de la inflexión de la curva; incluso algunos emplean el óptimo económico (Álvarez, 1996).

Cuando el comportamiento de la respuesta se ajusta a los modelos curvilíneos continuos, se podrán establecer más de dos clases de fertilidad; por ejemplo, Cantarutti et al. (2007) y Havlin et al. (2017) sugieren basarse en los siguientes valores del RR para modelos exponenciales: menor de 50% muy bajo (MB), entre 50% y 70% B, entre 70% y 90% M, entre 90% y 100% A, y 100% MA (Figura 156A). Otro procedimiento consiste en delimitar primero la clase A, cuyo límite inferior es el NC (por ejemplo, para $RR=90\%$), y el límite superior dos veces este valor; las clases MB, B y M se obtienen al dividir el NC en tres, y la clase MA corresponde a los valores que superen a la clase A (Wendling et al., 2008) (Figura 156B).

Una de las rutas más convencionales para la calibración es a través de experimentos que se diseñan específicamente para tal fin; otra vía consiste en aprovechar la información que se genera en los trabajos de investigación dirigidos a determinar la respuesta del cultivo

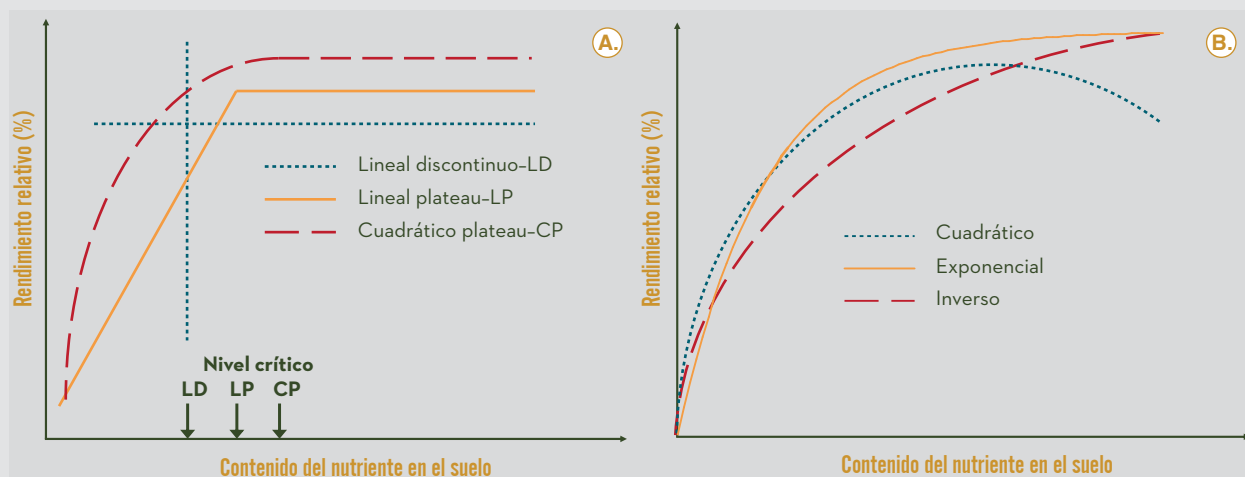


Figura 155.

A. Modelos discontinuos y **B.** continuos comúnmente empleados en los trabajos de calibración de los análisis de suelos. Tomado de Sadeghian (2010a).

a diferentes dosis de un mismo nutriente. A continuación, se dan algunos ejemplos de ellos para café.

Experimentos específicos de calibración

Esta metodología busca evaluar, mediante la técnica del elemento faltante, llamado por algunos, “parcelas de omisión”, el efecto de uno o más nutrientes sobre la producción del cultivo en diversas localidades de una región o país (preferiblemente más de 20). Cuando quiere calibrarse un solo nutriente, en cada sitio se evalúa el efecto de dos tratamientos en la producción; en uno se suministran cantidades suficientes, más no excesivas, de todos los elementos que se consideran necesarios para obtener una producción alta, y en el otro tratamiento se elimina del plan de fertilización el nutriente objeto de estudio.

Para construir el diagrama de dispersión se utilizan los datos pareados del RR y el contenido del nutriente en el suelo, el cual se analiza antes de iniciar el experimento, mediante un muestreo general del lote, o al finalizar el trabajo en el tratamiento sin el elemento. Para especies perennes como el café, en las cuales se recomienda evaluar la producción de dos o más años, es preferible utilizar este último procedimiento, debido a que el contenido del nutriente tiende a disminuir a través del tiempo y, por lo tanto, cambia el comportamiento de la respuesta a la adición del nutriente.

Un ejemplo para este tipo de experimentos se presenta en la Figura 157, la cual expresa el RR de café en función de la disponibilidad de nitrógeno en términos de la MO. El modelo cuadrático sugiere una disminución del RR de la producción cuando el contenido de la MO supera el punto de máximo de la curva (18,3%), como consecuencia de la reducción de la tasa de mineralización, ocasionado por una menor temperatura de los sitios. Puesto que el valor más alto del RR es inferior al 90%, no será posible aplicar los criterios antes mencionados para establecer las clases de fertilidad; además, puede esperarse respuesta

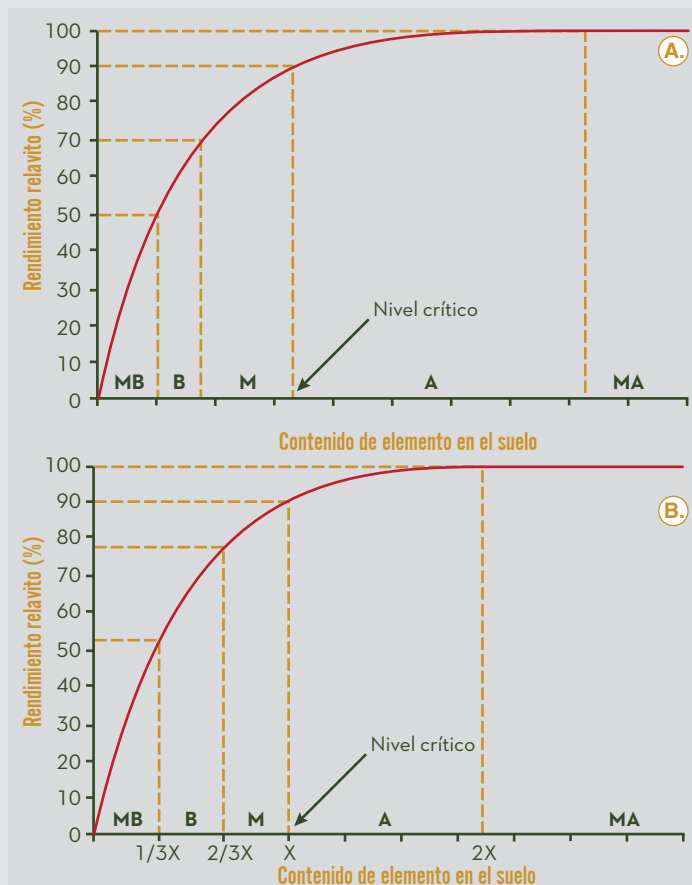


Figura 156.

Clases de fertilidad (MB - muy bueno, B - bueno, M - medio, A - alto y MA - muy alto), establecidas a partir de modelos exponenciales. Tomado de Sadeghian (2010a).

al suministro de N aún con niveles altos o muy altos de MO.

Otro ejemplo se presenta para el fósforo (Figura 158). El modelo lineal discontinuo señala un nivel crítico con alta probabilidad de respuesta a la fertilización fosfórica para valores inferiores a 12 mg kg^{-1} , y el modelo lineal plateau indica el nivel de suficiencia, por encima del cual no hay efecto del suministro de este elemento vía fertilización.

Calibración a partir de experimentos con dosis de nutriente

En este tipo de trabajos existen distintas alternativas; una consiste en usar los datos

Figura 157.

Relación entre el contenido de materia orgánica del suelo (como indicador de nitrógeno) y el rendimiento relativo de café, obtenida en el tercer año de evaluación. Tomado de Sadeghian (2009).

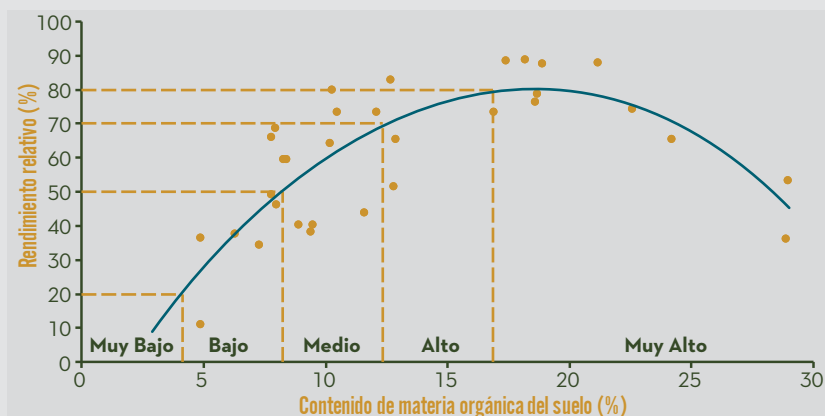
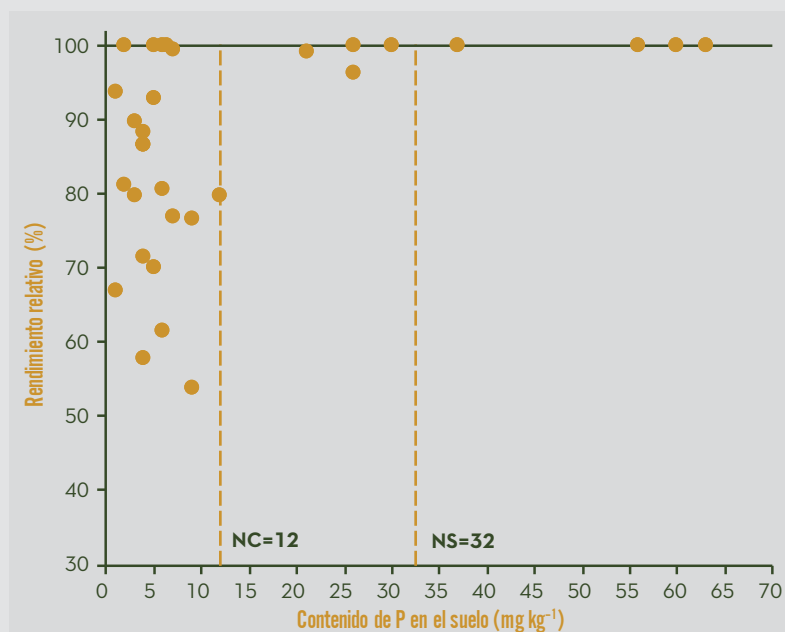


Figura 158.

Relación entre el contenido de P del suelo y el rendimiento relativo de café, obtenida en el segundo año de evaluación. Nivel Crítico (NC) estimado con el modelo lineal discontinuo y Nivel de Suficiencia (NS), estimado con el modelo lineal plateau. Tomado de Sadeghian (2009).



generados en un mismo experimento, establecido en varias localidades. Para ilustrar este caso, se utiliza parte de la información obtenida por Uribe y Mestre (1976) en una investigación en la que se evaluó la respuesta de café a tres dosis de K (Tabla 53). A partir de los datos pareados de RR y el contenido de K en el suelo (uno solo para cada sitio), se construyó el diagrama de dispersión y se determinó el NC para los modelos de interés (Figura 159). El NC hallado para el modelo lineal discontinuo es el más bajo de todos y corresponde a un

contenido de K en el suelo, por debajo del cual se presenta una alta respuesta a la fertilización, mientras que los modelos lineal plateau y cuadrático plateau establecen más bien un contenido de K^+ por encima del cual hay una muy baja respuesta. Para el caso del modelo exponencial la probabilidad de hallar respuesta a la fertilización es prácticamente nula.

Los resultados de los análisis de suelos, obtenidos en un solo sitio, también pueden calibrarse frente a la respuesta del cultivo,

Tabla 53.

Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta a tres dosis de K (K_2O), contenido de K^+ en el suelo y rendimiento relativo (RR) en siete localidades de la zona cafetera de Colombia.

Localidad	Producción de c.p.s. ⁽¹⁾ (kg ha-año ⁻¹) Dosis de K_2O			K^+ en el suelo	Ecuación ⁽²⁾ / Significancia	Dosis óptima de K_2O ⁽³⁾	Producción obtenida con la dosis óptima	RR ⁽⁶⁾
	0	120	240					
	(kg ha-año ⁻¹)			(cmol _c kg ⁻¹)		(kg ha-año ⁻¹)	(kg ha-año ⁻¹)	(%)
Cenicafé	3.513	3.668	3.635	0,34	No significativo	–	3.605 ₍₄₎	97
La Trinidad	2.819	3.072	3.297	0,60	No significativo	–	3.063 ₍₄₎	92
Mesitas	1.204	2.119	2.232	0,18	$y=1203,5+10,975x-0,02788x^2$	197	2.284 ₍₅₎	53
Naranjal	3.038	4.603	4.990	0,22	$y=3037,8+17,945x-0,04088x^2$	220	5.007 ₍₅₎	61
Paraguaicito	4.518	4.660	4.833	0,61	No significativo	–	4.670 ₍₄₎	97
Piamonte	616	969	1.107	0,17	$y=615,8+3,839x-0,00747x^2$	257	1.109 ₍₅₎	56
El Rosario	1.807	3.753	4.047	0,14	$y=1806,5+23,110x-0,05740x^2$	201	4.133 ₍₅₎	44

⁽¹⁾ Promedios de 4 o 5 años; ⁽²⁾ Generada a partir de los valores promedio de la producción; ⁽³⁾ Calculada a partir de la ecuación de regresión; ⁽⁴⁾ Promedio de la producción de las tres dosis de potasio; ⁽⁵⁾ Producción obtenida al reemplazar la dosis óptima en la ecuación; ⁽⁶⁾ Se calculó así: (producción sin K/producción con la dosis óptima) x 100. Datos de producción y K en el suelo tomados de Uribe y Mestre (1976).

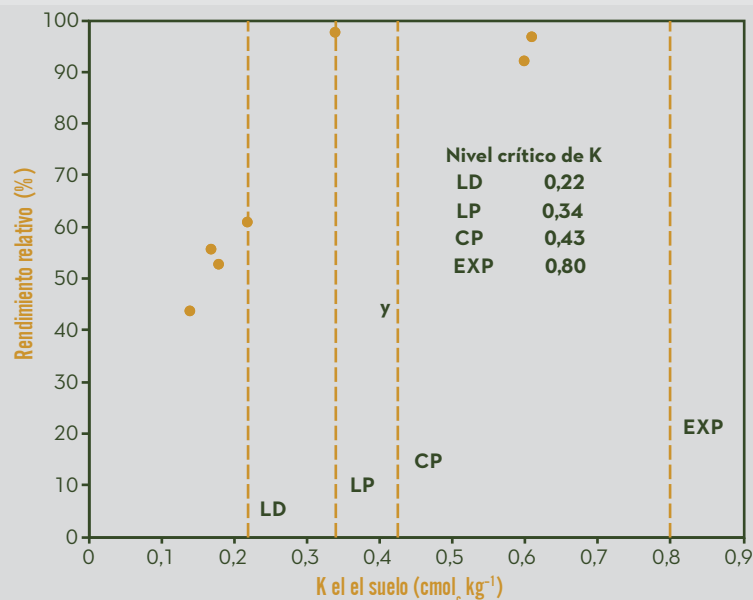


Figura 159.

RR = Rendimiento relativo de café en función del potasio intercambiable del suelo (K^+).

LD = Lineal discontinuo

LP = Modelo Lineal Plateau:

$y = 8,8561 + 251x$ si $x < 0,34$

CP = Modelo Cuadrático Plateau:

$y = -24,747 + 565,2x - 666,8x^2$ si $x < 0,43$

EXP = Modelo Exponencial-Mitscherlich:

$y = 100 (1 - e^{-4,33x})$. Nivel crítico para 99% del RR.

Adaptado de: Uribe y Mestre (1976).

cuando se suministran dosis crecientes de un nutriente. A continuación, se presenta el procedimiento que se emplea en esta técnica, aprovechando los resultados de una investigación realizada con K en café (Sadeghian & Álvarez, 2011). El primer paso consiste en generar la ecuación de regresión que explica las variaciones del K^+ intercambiable extraído del suelo en función de las dosis aplicadas (Figura 160). En un segundo paso, se genera una ecuación para explicar las variaciones en la producción de café en respuesta a las dosis (Figura 161), a partir de la cual se calcula la dosis de $K-K_2O$ que debe aplicarse tanto para obtener la máxima producción ($272,7 \text{ kg ha}^{-1}$) como para el óptimo económico ($259,3 \text{ kg ha}^{-1}$). Para calcular el nivel del K^+ con el cual se obtiene la máxima producción ($0,42 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), se sustituye la dosis aplicada en la ecuación del contenido de K^+ en función de las dosis adicionadas ($\hat{y} = 0,132 + 0,00105 \times 272,7$). Cuando se realiza el mismo procedimiento con la dosis óptima económica, se obtiene un segundo nivel de K^+ igual a $0,40 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

En el siguiente paso, se calcula el RR para cada dosis de $K-K_2O$, a partir de la ecuación de producción en función de la cantidad aplicada (Ecuación <38>)

$$RR (\%) = \frac{\text{Producción con dosis } Xi}{\text{Producción máxima}} \times 100$$

<38>

Dentro de un diagrama de dispersión, se expresa el RR de cada dosis en función del respectivo contenido de K^+ en el suelo (datos obtenidos a partir de la ecuación de regresión), con el fin de generar un modelo (Figura 162), a partir del cual pueden establecerse las clases de fertilidad.

Por último, se calculan las dosis recomendadas a partir del tenor de K^+ disponible en el suelo y la pendiente (tasa) de la recta de recuperación del K^+ por el método de análisis (K recuperado/ K_2O adicionado), de acuerdo con la Ecuación <39>:

$$\text{Dosis recomendada} = \frac{\text{Nivel crítico de } K - K \text{ disponible}}{\text{Tasa de recuperación de } K}$$

<39>

Con la anterior información puede generarse una ecuación para expresar de forma continua la dosis de K en función de su contenido en el suelo (Figura 163).

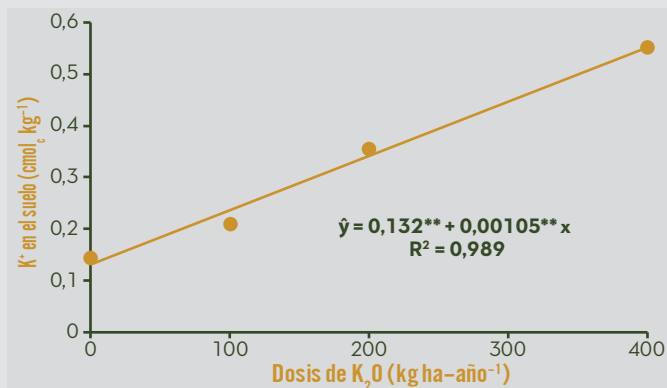


Figura 160. Contenido de K^+ en el suelo en respuesta a las dosis de $K-K_2O$. Tomado de Sadeghian & Álvarez (2011).

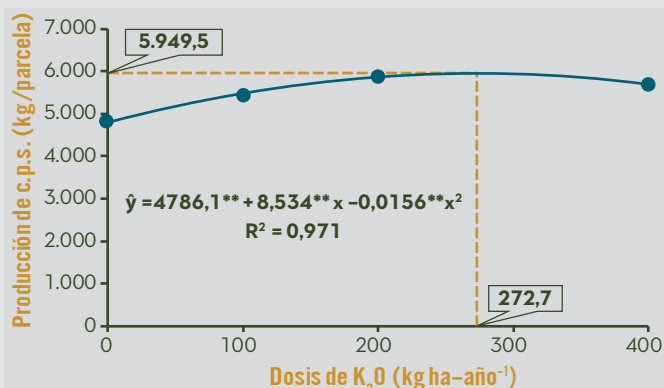


Figura 161. Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta a la fertilización con K (K_2O). La línea punteada señala la dosis de K (K_2O) requerida para obtener la producción máxima. Tomado de Sadeghian & Álvarez (2011).

Interpretación de los resultados del análisis de suelos

Básicamente existen dos corrientes para interpretar los resultados del análisis del suelo: “nivel de suficiencia” y “relación de saturación de bases intercambiables” (RSBI). El nivel de suficiencia, aplicable a todos los elementos requeridos por las plantas, promueve el concepto de que hay niveles definibles de nutrientes individuales en el suelo por debajo de los cuales los cultivos responden a la aplicación de fertilizantes con cierta probabilidad, y por encima de los cuales estos probablemente no responderán. Ante esta premisa, pueden establecerse las categorías Bajo, Medio y Alto para la suficiencia de los nutrientes en el suelo y, en ocasiones, se incluyen las otras dos: Muy Bajo y Muy Alto (Eckert, 1987).

La filosofía de RSBI sólo se aplica a las bases intercambiables calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+), y sostiene que la máxima producción se alcanza al establecer “relaciones ideales” entre estas en el suelo. El concepto de RSBI fue desarrollado inicialmente por Bear y Toth (1948), quienes analizaron la influencia del Ca^{2+} en la disponibilidad de otros cationes en una investigación con alfalfa (*Medicago sativa*, L.) en suelos de Nueva Jersey (Estados Unidos). La idea se soporta en que idealmente un suelo debe presentar los siguientes niveles de saturación de cationes en el complejo de intercambio (CIC) para que pueda soportar buenos rendimientos: Ca^{2+} 65%, Mg^{2+} 10%, K^+ 5% y H^+ 20%. De lo anterior también se derivan relaciones ideales entre las bases: Ca:Mg 6,5:1, Ca:K 13:1 y Mg:K 2:1. Posteriormente, Graham (1959) modificó el concepto original de valores fijos propuestos por Bear y Toth, por rangos de saturación para los suelos de Misuri: 65% a 85% de Ca^{2+} , 6% a 12% de Mg^{2+} y de 2% a 5% de K^+ , los cuales permiten variaciones bastante amplias en las relaciones Ca:Mg:K. Aunque Graham sugiere a la saturación de cationes como base para la fertilización, no parece promover la existencia de una “proporción ideal” *per se*.

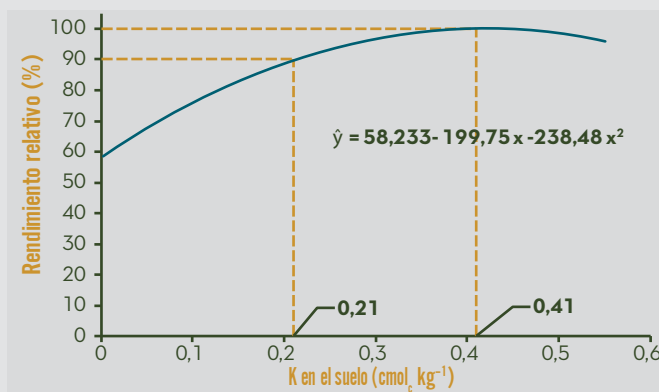


Figura 162.

Rendimiento relativo en función del contenido de K^+ en el suelo. Nivel crítico de $\text{K}^+ = 0,21 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Nivel de K^+ para alcanzar la producción máxima = $0,41 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Tomado de Sadeghian & Álvarez (2011).

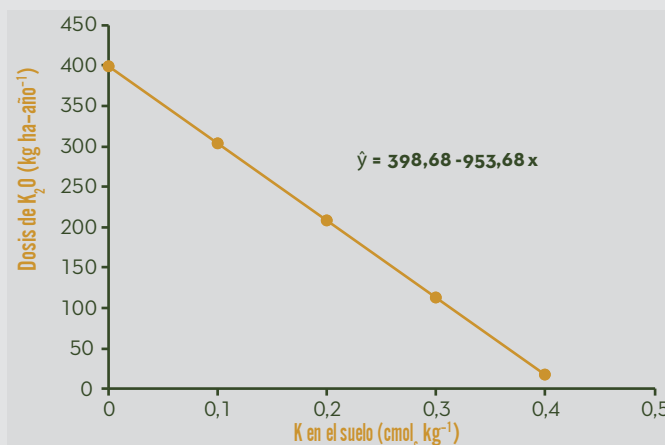


Figura 163.

Dosis recomendadas de K (K_2O) en función del contenido de K^+ intercambiabile del suelo. Tomado de Sadeghian & Álvarez (2011).

Apoyados en los conceptos de Bear y Toth se han realizado muchas investigaciones con el fin de determinar el efecto de las variaciones de estos tres cationes intercambiables en el desarrollo y la producción de diversas especies vegetales, sin que sus resultados sean del todo concluyentes. Al respecto, Donald (1997) sostiene que las recomendaciones que resultan de este concepto siguen un “camino tortuoso” en la interpretación, sin soporte de la investigación agronómica.

Sadeghian (2018) aclara que el concepto de RSBI se fundamenta en la competencia que se genera entre las bases intercambiables, condición que llega a tener efectos negativos en el crecimiento de las plantas cuando el desequilibrio es grande; por ejemplo, en ocasiones una relación Ca/Mg mayor de 6,0 (Ca:Mg=6:1) puede afectar negativamente la absorción de Mg, mientras que un valor menor a 1,5 condiciona la toma de calcio.

En una investigación desarrollada en suelos de la zona cafetera de Colombia se demostró que es posible modificar los contenidos y las relaciones de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ en el suelo mediante la fertilización; sin embargo, las magnitudes de los cambios varían tanto por las propiedades químicas, físicas y mineralógicas de los suelos, como por la solubilidad del fertilizante (Sadeghian, 2012). También se evidenció que en consecuencia de las altas dosis que se emplean para lograr las relaciones “ideales” puede presentarse una elevada salinidad que afecta negativamente el crecimiento del café.

Con respecto al efecto antagónico de Mg²⁺ y K⁺ puede comentarse que la mayor competencia se ejerce desde el K⁺, en especial cuando se aplican dosis altas del elemento; al respecto, se ha demostrado, por ejemplo, que una menor presencia de K⁺ en la fase de cambio se traduce en concentraciones foliares más bajas de este elemento y una mayor absorción de Mg²⁺ (Figura 164). También se ha evidenciado que para la absorción de Mg²⁺ puede ser más importante suspender el suministro de K⁺ que aplicar el Mg (Figura 165).

En la Tabla 54 se consigna la interpretación de las propiedades químicas del suelo para el cultivo del café en Colombia. Eventualmente, las categorías incluidas Baja, Media y Alta, pueden modificarse de acuerdo con los resultados obtenidos en la calibración y los criterios del investigador, bien sea en los niveles de fertilidad, desde Muy Bajo hasta Muy Alto o en el rango de valores para cada nivel.

Tabla 54.
Clasificación de las propiedades químicas del suelo para café en la etapa de producción. Tomado de Sadeghian (2018).

Propiedad	Unidad	Bajo	Medio	Alto
pH	Adimensional	< 5,0	5,0 – 5,5	> 5,5
Materia orgánica (MO)	%	< 8,0	8,0 – 16,0	> 16,0
Nitrógeno total (N)	%	< 0,34	0,34 – 0,58	> 0,58
Fósforo (P)	mg kg ⁻¹	< 10	10,0 – 20,0	> 20,0
Azufre (S)	mg/kg ⁻¹	< 6,0	6,0 – 12,0	> 12,0
Potasio (K ⁺)	cmol _c kg ⁻¹	< 0,2	0,2 – 0,4	> 0,4
Calcio (Ca ₂ ⁺)	cmol _c kg ⁻¹	< 1,5	1,5 – 3,0	> 3,0
Magnesio (Mg ₂ ⁺)	cmol _c kg ⁻¹	< 0,6	0,6 – 0,9	> 0,9
Aluminio (Al ₃ ⁺)	cmol _c kg ⁻¹	< 0,5	0,5 – 1,0	> 1,0
CIC	cmol _c kg ⁻¹	< 20,0	20,0 – 30,0	> 30,0
CICE	cmol _c kg ⁻¹	< 3,0	3,0 – 6,0	> 6,0
Saturación de aluminio	%	< 15,0	15,0 – 30,0	> 30,0
Saturación de bases	%	< 20,0	20,0 – 40,0	> 40,0
Hierro (Fe)*	mg kg ⁻¹	< 25	25 – 50	> 50
Manganeso (Mn)*	mg kg ⁻¹	< 5	5 – 10	> 10
Zinc (Zn)*	mg kg ⁻¹	< 1,5	1,5 – 3,0	> 3,0
Cobre (Cu)*	mg kg ⁻¹	< 1,0	1,0 – 3,0	> 3,0
Boro (B)*	mg kg ⁻¹	< 0,2	0,2 – 0,4	> 0,4

*Rangos sugeridos de manera general. Corresponden a valores promedio, citados en la literatura.

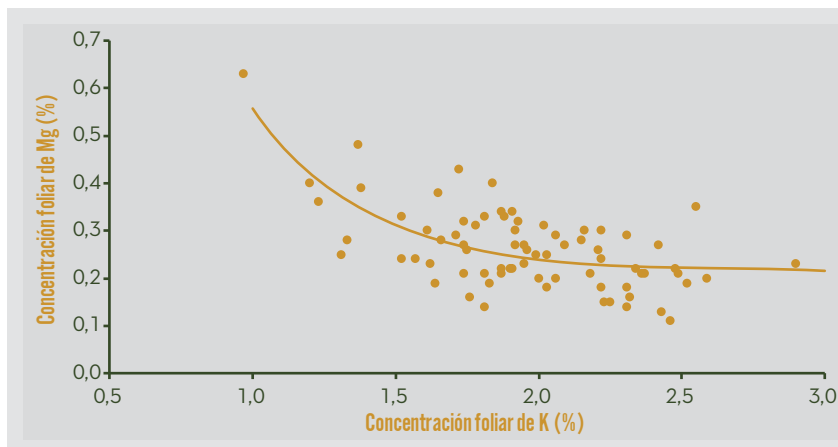


Figura 164.
Concentración foliar de Mg en función de K foliar en los cafetales. Tomado de Sadeghian (2011).

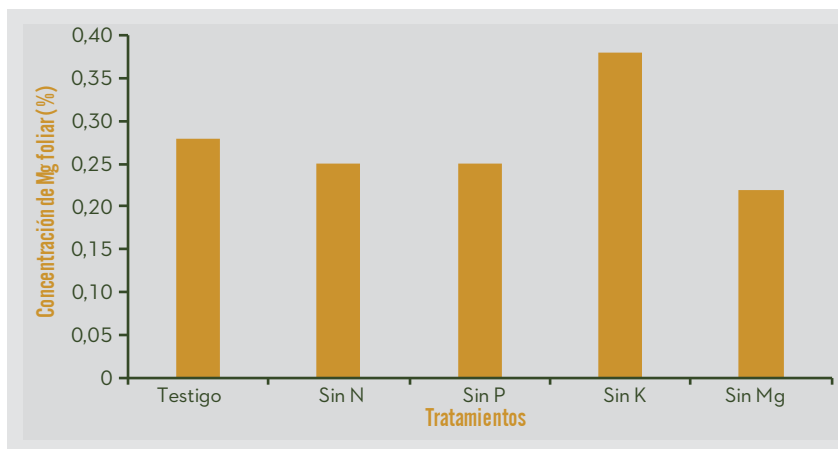


Figura 165.
Concentración foliar de magnesio en respuesta a tratamientos de fertilización, definidos con base en la técnica del elemento faltante. Tomado de Sadeghian (2008-b).

Recomendación de nutrientes

Existen dos enfoques predominantes en las recomendaciones de las dosis de fertilizantes: **nivel de suficiencia** del nutriente y **construcción-mantenimiento** de la fertilidad del suelo. En el enfoque de suficiencia, el objetivo se direcciona a la aplicación de cantidades necesarias para maximizar la rentabilidad, minimizando las aplicaciones de los nutrientes y el costo de los fertilizantes. Este se basa en los resultados de la calibración de análisis de suelos a largo plazo para alcanzar de 90% a 95% del rendimiento relativo máximo del cultivo. En otra vía, el objetivo de un programa de

construcción-mantenimiento de la fertilidad es manejar los niveles de los nutrientes del suelo como variables controlables. Cuando el análisis del suelo indique contenidos bajos, se aplican suficientes dosis, tanto para cubrir los requerimientos inmediatos del cultivo como para aumentar (construir) los niveles del elemento en el suelo hasta alcanzar valores por encima del nivel crítico. Si el contenido del elemento excede el nivel crítico, se hacen recomendaciones para mantener los contenidos de este en el suelo. En concordancia, el rango objetivo se ubica ligeramente por encima del nivel crítico, donde el suelo generalmente puede proporcionar cantidades adecuadas de nutrientes para satisfacer las necesidades del cultivo (niveles medio a alto). Bajo este enfoque, no se buscan

rendimientos económicos óptimos en un año dado, sino minimizar la posibilidad de que el nutriente limite el crecimiento de la planta (Leikam et al., 2003).

Ahora bien, uno de los aspectos a tener en mente al momento de aplicar los anteriores enfoques tiene que ver con la movilidad de los elementos en el suelo. Para los nutrientes que son móviles, por ejemplo N (NO_3^-) y S (SO_4^{2-}), no es posible definir un programa de construcción-mantenimiento, pues su permanencia en la zona de raíces es relativamente corta y, en razón de ello, deben suministrarse bajo el enfoque de suficiencia. En contraste, los nutrientes inmóviles, entre ellos P (HPO_4^{2-} o H_2PO_4), K^+ y Mg^{2+} , permanecen durante más tiempo en el suelo y, por lo tanto, es posible estructurar el plan de fertilización tanto con el enfoque de suficiencia como de construcción-mantenimiento (Havlin et al., 2017).

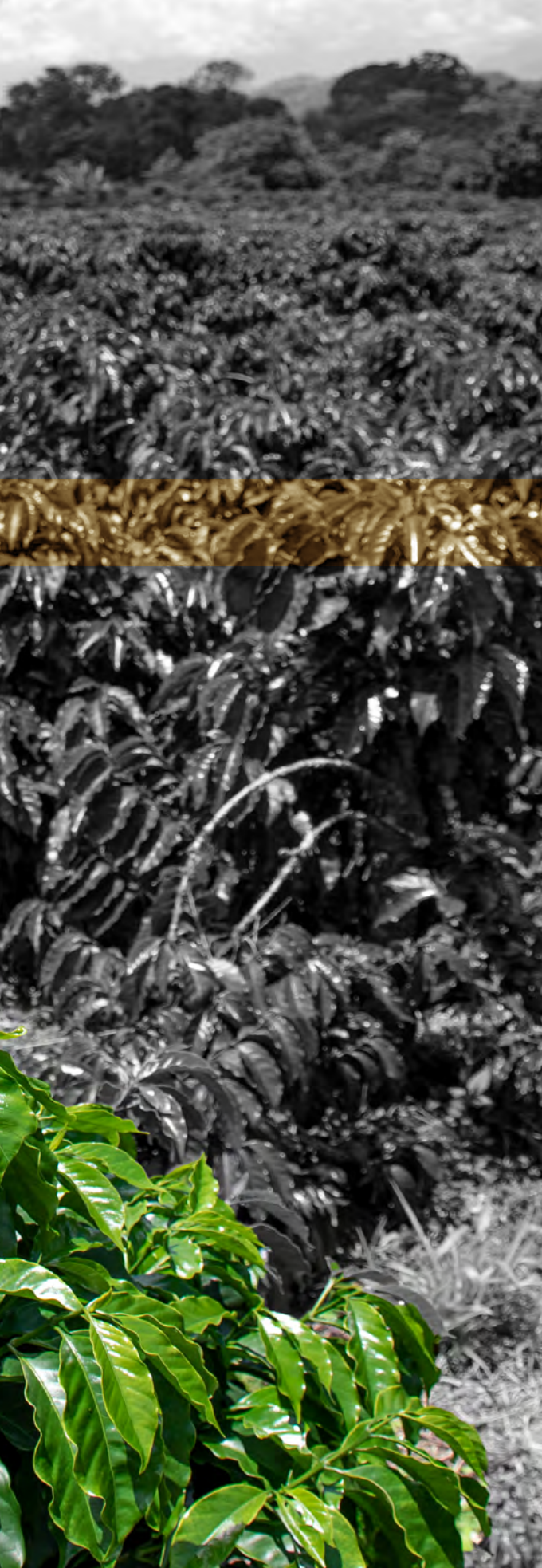
Para el cultivo de café en Colombia, las recomendaciones de las dosis de nutrientes durante la etapa productiva se basan en los dos enfoques. Adicionalmente, estas tienen en cuenta la producción potencial, influenciada por el porcentaje de sombra y la densidad de plantas por hectárea (Sadeghian, 2008a). En la Tabla 55 se incluyen las dosis de N, P, K, Mg y S para sistemas de producción con poca sombra (menor de 30%) y alta densidad (mayor de 7.500 plantas/ha). El ajuste en las dosis de N por la fertilidad del suelo es relativamente poco; además, este es el único nutriente que se sugiere no excluir de los planes de abonamiento, dado su efecto generalizado en la producción. Con respecto a P, K y Mg, las dosis sugeridas para el nivel Alto de fertilidad corresponden a la extracción por una cosecha alta de 5.000 kg ha⁻¹ de café pergamino seco. Para el nivel Muy Alto se podrá prescindir de su aplicación durante el año siguiente al análisis de suelos.

Tabla 55.
Dosis de N, P, K, Mg y S recomendadas para cafetales con poca sombra (menor de 30%) y alta densidad de siembra (mayor de 7.500 plantas/ha), según el nivel de fertilidad del suelo. Adaptado de Sadeghian (2008a).

Nivel de Fertilidad	Dosis (kg ha-año ⁻¹)				
	Nitrógeno (N)	Fósforo (P ₂ O ₅)	Potasio (K ₂ O)	Magnesio (MgO)	Azufre (S)
Bajo	300	60	300	60	50
Medio	260	40	260	40	25
Alto	240	20	180	15	0



Estado nutricional de las plantas



La efectividad de los planes de fertilización y la aplicación de enmiendas puede ser analizada permanentemente a través del **estado nutricional de las plantas**. Entre las herramientas más empleadas para lograr este propósito, están el diagnóstico que se realiza con base en los síntomas visuales de las deficiencias nutricionales y el diagnóstico foliar.

Diagnóstico visual de deficiencias nutricionales

En los distintos órganos de las plantas llegan a aparecer desórdenes o alteraciones visibles, como resultado de una situación anómala; sin embargo, estas pueden estar relacionadas con factores bióticos y abióticos diferentes a las deficiencias nutricionales. De allí la importancia de identificar los síntomas visibles de la carencia de elementos esenciales en el campo con el fin de establecer planes de manejo según el caso.

Los síntomas visibles de deficiencias o excesos son el resultado de una secuencia de eventos. Estos comienzan con una lesión a nivel molecular y continúan con una alteración sub-celular y después celular. Cuando un conjunto de células o tejido es afectado aparece el síntoma visible (Malavolta et al., 1989).

Ante condiciones de una nutrición mineral deficiente, se reduce significativamente la producción y aparecen con frecuencia síntomas visibles de la carencia de los elementos (Tabla 56); en contraste, a medida que se proporcionan los elementos requeridos en las cantidades suficientes y balanceadas, se obtienen producciones más altas y se reduce la probabilidad de presentar síntomas visibles de sus carencias. Una nutrición excesiva o desbalanceada afecta negativamente la producción, con sintomatologías visibles en casos severos (Sadeghian, 2013).

A través del diagnóstico visual se compara en el campo el aspecto de plantas afectadas por la falta o exceso de uno o más elementos frente a

Tabla 56.

Diagnóstico nutricional, según los síntomas visibles de deficiencia o toxicidad. Tomado de Sadeghian (2013).

Nutrición	Producción relativa	Aparición de síntomas visibles	Diagnóstico nutricional
Muy deficiente	Muy baja	Muy frecuente	Deficiencia severa
Deficiente	Baja	Ocasional	Deficiencia latente
Adecuada	Alta	Rara vez	Nutrición correcta
Excesiva	Media	Ocasional	Toxicidad oculta
Muy excesiva	Baja	Frecuente	Toxicidad visible

plantas que se consideran **normales** en cuanto a su nutrición (el patrón). Para este propósito generalmente se usa la hoja, y en ocasiones otros órganos como la raíz o el fruto, según el elemento (Malavolta et al., 1989).

Los síntomas visuales de deficiencias nutricionales pueden presentar las siguientes características (Havlin et al., 2017):

- ♦ **Clorosis.** Amarillamiento uniforme o intervenal, o color verde claro de las hojas
- ♦ **Necrosis.** Muerte de los ápices, márgenes o de las regiones intervenales de las hojas
- ♦ **Enrojecimiento.** Acumulación de antocianinas que causa coloraciones rojizas o púrpuras en las márgenes, regiones intervenales o en la hoja entera
- ♦ **Retraso en el crecimiento.** Reducción en la altura de la planta, acortamiento de los entrenudos. Las hojas pueden permanecer de color verde oscuro o tornarse de color verde claro o totalmente cloróticas
- ♦ **Cese en el nuevo crecimiento.** Muerte de nuevos brotes, de yemas terminales/axiales o de flores. Las hojas nuevas se secan o forman rosetas

La aparición de los síntomas de deficiencias de los nutrientes en ciertos sitios específicos de la planta está relacionada con las funciones fisiológicas que estos elementos realizan y su movilidad dentro de la planta; por ejemplo, la carencia de nitrógeno se manifiesta como

clorosis (amarillamiento) de las hojas más viejas. El cambio de color verde a amarillo está relacionado con la pérdida de nitrógeno proteico de los cloroplastos, y la aparición de los síntomas en las hojas más viejas, es el resultado de su alta movilidad, pues al existir la carencia en los puntos de crecimiento, el nutriente se moviliza desde estas hojas hacia las más nuevas. A su vez, cuando se presenta una deficiencia de fósforo aparecen coloraciones rojizas en las hojas viejas; sintomatología que se debe a la acumulación de azúcares que propician la síntesis de antocianinas (un pigmento de color púrpura) en la hoja (Havlin et al., 2017; Malavolta, 2006).

Los síntomas de las deficiencias pueden estar relacionados con otros factores de estrés que afectan la disponibilidad de los nutrientes, por ejemplo:

- ♦ La incidencia de plagas, enfermedades, herbicidas, hormonas y daño mecánico a raíces.
- ♦ El exceso o toxicidad de un nutriente/elemento que afecta la disponibilidad de otro.
- ♦ Déficit o exceso hídrico.
- ♦ Efecto simultáneo de varios factores o nutrientes.

En ocasiones, y pese a que se presenta deficiencia de un nutriente en el suelo y en la planta, no se detectan síntomas de su carencia; condición que se conoce como **hambre**

oculta, la cual se traduce en la reducción del crecimiento y desarrollo de la planta.

Cuando la deficiencia de un nutriente ocasiona daños estructurales en la planta, por ejemplo necrosis, acortamiento de los entrenudos, deformación de las hojas o muerte de los brotes, el suministro del nutriente mediante la fertilización no llega a corregir los síntomas de la deficiencia ya causados. En este caso, el efecto de esa fertilización se reflejará en el crecimiento y desarrollo de nuevos órganos.

La aplicación de fertilizantes vía foliar puede eventualmente reducir los síntomas visuales de algunos nutrientes; sin embargo, en la mayoría de los casos no corrige la deficiencia en toda la planta y, por lo tanto, no impacta la producción. Lo anterior tiene una mayor implicación para los macronutrientes, cuyos requerimientos son relativamente altos frente a las pequeñas cantidades (trazas) que se suministran a través de esta práctica.

Relación entre movilidad de nutrientes y síntomas de deficiencia

Una vez los elementos esenciales ingresan a las raíces de las plantas, se mueven con

relativa facilidad hasta las hojas a través del xilema. Del mismo modo, algunos nutrientes también pueden moverse rápidamente vía floema desde las hojas más viejas hacia las más nuevas cuando ocurre una deficiencia; razón por la cual se conocen como **móviles**. Caso contrario ocurre con los nutrientes **inmóviles**, pues ante la eventualidad de una carencia, permanecen en las hojas más viejas (Mengel et al., 2001).

El anterior conocimiento es útil en el diagnóstico de las deficiencias nutricionales, pues los síntomas de la falta de los elementos móviles aparecen principalmente en las hojas más viejas y, en el caso de los inmóviles, en los tejidos más nuevos. En concordancia a lo dicho, los nutrientes móviles en la planta son: N, P, K, Mg, Cl y Mo, y los inmóviles o poco móviles son: Ca, S, Fe, Mn, B, Zn, Cu y Ni.

Deficiencias de nutrientes móviles

Cuando la planta de café es joven, menor de dos años, la aparición de las deficiencias de nutrientes móviles tiene lugar en las hojas viejas de las ramas bajas, es decir, aquellas que se formaron primero (Figura 166). Conforme estas ramas fructifican, la magnitud de las deficiencias aumenta, ocasionando defoliación; en casos severos, las hojas nuevas también muestran los síntomas de la carencia. En las plantas que tienen más de dos años, la aparición de los síntomas se centra principalmente a la zona



Figura 166.

Sitio de aparición de los síntomas de deficiencias de nutrientes móviles en plantas de café, de acuerdo a la edad. El color anaranjado señala la zona de la aparición de las deficiencias. Tomado de Sadeghian (2017).

productiva y se acentúa con la maduración de los frutos debido a la re-movilización de los nutrientes desde las hojas hacia los frutos (Sadeghian, 2017).

Deficiencias de nutrientes inmóviles

El crecimiento vegetativo del café tiene lugar tanto en la parte inferior de la planta, donde se encuentran las ramas plagiotrópicas (horizontales) más viejas, como en la parte media y superior. Por esta razón, todas las ramas ortotrópicas (verticales) y plagiotrópicas disponen de hojas más nuevas en su ápice. Esta condición hace que, ante una deficiencia de nutrientes inmóviles, se presenten sintomatologías de carencia en las hojas nuevas de todas las ramas, independiente de la edad de la planta (Figura 167).

En la Tabla 57 se describen los síntomas visibles de las deficiencias nutricionales más comunes del café en Colombia, las causas que las generan y los cuidados para prevenirlas.

Diagnóstico foliar

La planta absorbe a través de sus raíces los elementos que se encuentran en forma **disponible** desde la solución del suelo y los transporta a otros órganos, en donde los utiliza para las diferentes funciones fisiológicas. Mediante el análisis composicional de la planta es posible tener mayor información

acerca de la disponibilidad real de estos elementos en el suelo, particularmente cuando el análisis del suelo no permite esclarecer por completo los problemas que ocurren en el campo. Puede afirmarse entonces que, un diagnóstico completo incluye de manera conjunta el análisis de suelos y el de los tejidos vegetales.

En razón de que en las hojas ocurren la mayoría de los procesos fisiológicos, se espera que la composición elemental de este órgano sea una buena guía para evaluar el **estado nutricional** de las plantas; de allí, la denominación de análisis foliar o **diagnóstico foliar** (Raij, 2011).

La composición mineral de la hoja es el resultado de los factores que actúan y, en ocasiones, interactúan, hasta el momento en que este órgano es recolectado para el respectivo análisis. Lo anterior puede resumirse en la Ecuación < 40>, propuesta por Malavolta (2006):

$$Y = f(\text{Planta, Suelo, Clima, Manejo, Plagas y Enfermedades, ...}) \text{ <40>}$$

Donde:

- ♦ Y representa la concentración del elemento en la hoja.
- ♦ La planta corresponde a una especie y variedad con cierta edad y etapa fisiológica.

Figura 167.

Sitio de aparición de los síntomas de deficiencias de nutrientes inmóviles en plantas de café. El color anaranjado señala la zona de la aparición de las deficiencias. Tomado de Sadeghian (2017).



- ♦ El suelo es el resultado de las propiedades físicas, químicas y biológicas, afectadas por un manejo de la fertilización y de la aplicación de enmiendas.
- ♦ El clima, principalmente en sus componentes lluvia, temperatura y luz
- ♦ El manejo está dado por prácticas culturales, tales como el sistema de producción, densidad de siembra, nivel de sombra, uso de herbicidas, cultivo intercalado y abonos verdes.
- ♦ Las plagas y enfermedades ocurridas desde la siembra.

De acuerdo con Havlin et al. (2017), el análisis foliar permite:

- Verificar los síntomas visibles de deficiencias nutricionales.
- Ayudar a identificar la escasez de los nutrientes antes de que aparezcan los síntomas de deficiencia.
- Ayudar a determinar la capacidad relativa del suelo para proporcionar los nutrientes.
- Cuantificar el efecto del suministro del nutriente en su concentración en la planta.
- Estudiar la relación entre el estado del nutriente en la planta y el rendimiento del cultivo.

En el análisis foliar se cuantifica la concentración total de cada elemento con base en la materia seca de las hojas. En algunas ocasiones, particularmente para estudios específicos, se evalúa la forma iónica de los elementos; por ejemplo, la fracción nítrica y amoniacal del nitrógeno total. La valoración de los nutrientes en la planta difiere de las determinaciones del análisis de suelo, en el que se valora la forma lábil/disponible del elemento y no el contenido total, por ejemplo, fósforo disponible y bases intercambiables.

Muestreo

Al igual que el análisis de suelos, se precisan ciertos cuidados en la toma de las muestras foliares, pues de lo contrario, los resultados tendrán poca validez. La forma y la época del muestreo tienen que ver con el propósito mismo del análisis. Si se quiere conocer el estado nutricional de una plantación para un momento dado, las muestras se recolectarán en todo el lote, así se verificará la efectividad de los planes de manejo de la fertilidad del suelo. En el caso que se quiera diagnosticar problemas relacionados con el crecimiento, producción o calidad, será necesario tomar muestras tanto en las áreas donde las plantas crecen normalmente como en aquellos sectores donde no.

Aunque la hoja es el órgano que mejor refleja el estado nutricional de una plantación, no es cualquier hoja que lo hace. Como regla deben recolectarse para el análisis las hojas que recientemente han alcanzado la madurez en una época dada de la vida de la planta. Los resultados de una investigación desarrollada por Valencia y Arcila (1977), en seis localidades de la zona cafetera de Colombia, permitieron esclarecer que el tercero o cuarto par de hojas de café son los más indicados para conocer el estado nutricional de plantaciones de café mediante el análisis composicional. En este trabajo se recomienda llevar a cabo el muestreo 4 a 6 meses antes de la cosecha principal —durante la traviesa o mitaca— con el fin de realizar los ajustes necesarios a la fertilización.

Sadeghian (2013) sugiere que el muestreo se realice 6 meses antes de la cosecha, pues de esta manera será posible conocer el estado nutricional de la planta en el momento que comienza la mayor demanda de los nutrientes por parte del fruto y habrá la posibilidad de realizar los ajustes necesarios a los planes de nutrición. Dado que esta fecha normalmente corresponde a uno o dos meses luego de la fertilización, también podrá evaluarse la efectividad de esta labor.

Tabla 57.
 Síntomas visibles de deficiencias nutricionales en café, las causas relacionadas y los cuidados para prevenirlas.
 Adaptado de Sadeghian (2017).

Nitrógeno		
 		
Descripción de la deficiencia	Causas de la deficiencia	Prevención y corrección de la deficiencia
• Clorosis relativamente uniforme de las hojas más viejas • Senescencia prematura de las hojas y posterior defoliación en las ramas productivas • Poca emisión de nuevos brotes y reducción en el crecimiento de la planta • Ante una deficiencia severa, la defoliación es acompañada de clorosis en las hojas más nuevas; puede presentarse muerte descendente de las ramas y paloteo (pérdida intensa de hojas y secamiento y muerte de ramas) • Reducción en el crecimiento de los frutos; estos se tornan de amarillos y, en ocasiones, se secan • Frutos afectados por enfermedades como la mancha de hierro	• Niveles insuficientes de N en el suelo, consecuencia de bajos contenidos de materia orgánica • Baja mineralización de la materia orgánica en respuesta a la acidez del suelo o a las bajas temperaturas • Limitaciones en la profundidad efectiva del suelo • Suelos muy arenosos • Dosis insuficientes de N suministrado • Aplicaciones de fertilizantes nitrogenados en épocas inadecuadas (principalmente en verano) • Altas pérdidas de N por lixiviación, especialmente en suelos arenosos y períodos muy lluviosos • Condiciones de encharcamiento o sequía • Problemas radicales • Presencia de arvenses agresivas en el plato del árbol • Falta de sombrío en sitios con déficit hídrico prolongado	• Controlar la erosión (reducción en la pérdida de la capa superficial, rica en materia orgánica y N) • Corregir la acidez del suelo • Establecer árboles de sombrío, especialmente leguminosas como el guamo, con el fin de menguar los efectos de períodos secos, aportar N vía ingreso de materiales orgánicos y estimular el ciclaje de N, además mejorar las propiedades físicas del suelo • Aplicar abonos orgánicos • Proporcionar regularmente N en las dosis adecuadas • Construir zanjas de drenaje en suelos con problemas de encharcamiento • Controlar las plagas y enfermedades radicales

Continúa...

Fósforo



Descripción de la deficiencia	Causas de la deficiencia	Prevención y corrección de la deficiencia
- En las plantas muy jóvenes se presenta un retardo en el crecimiento, consecuencia de un sistema de raíces poco desarrollado - En las plantas adultas ocurre amarillamiento desuniforme en las hojas más viejas, acompañada de manchas rojizas - Defoliación en casos severos	- Suelos con alta capacidad para fijar el P (principalmente los derivados de cenizas volcánicas) - Planes de fertilización deficientes en P - Baja asociación con micorrizas - Lixiviación excesiva de P durante períodos muy lluviosos - Desarrollo radical deficiente o daño por plagas y enfermedades - Baja mineralización de la materia orgánica del suelo	- Definir planes de fertilización fosfórica según el contenido del elemento en el suelo - Controlar las plagas que afectan la raíz - Prácticas culturales que favorezcan un adecuado crecimiento de raíces

Continúa...

Potasio



Descripción de la deficiencia	Causas de la deficiencia	Prevención y corrección de la deficiencia
• Necrosis en la punta y los bordes de las hojas más viejas, particularmente en la zona de producción • En casos severos, defoliación de las hojas afectadas • Reducción ligera en el tamaño de los frutos, principalmente la pulpa	• Niveles bajos de K en el suelo • Desbalances con respecto a Ca y Mg • Planes de fertilización deficientes en K • Baja Capacidad de Intercambio Catiónico-CIC del suelo • Material parental pobre en K • Pérdidas de K por lixiviación en suelos arenosos y poco selectivos para retener el K • Acidez del suelo • Aplicación de dosis altas de N • Daños en el sistema radical por plagas y enfermedades • Baja humedad y temperatura	• Aplicar abonos orgánicos ricos en K; especialmente la pulpa de café • Incluir el K dentro de los planes de fertilización; preferiblemente basándose en los resultados de análisis de suelos • Corregir la acidez del suelo • Racionalizar la fertilización con N, Ca y Mg • Controlar las plagas y enfermedades que afectan las raíces

Continúa...

Calcio



Descripción de la deficiencia	Causas de la deficiencia	Prevención y corrección de la deficiencia
Clorosis en los bordes de las hojas más nuevas. Ocasionalmente las hojas pierden su turgencia, se curvan hacia abajo y los bordes se tornan ondulados. En casos severos se produce la muerte de los puntos de crecimiento.	- Baja Capacidad de Intercambio Catiónico-CIC - Niveles muy bajos de Ca en el suelo - Condiciones de fuerte acidez - Déficit hídrico prolongado, particularmente en suelos arenosos - Material parental pobre en Ca - Desbalances con respecto a Mg y K	- Corrección de la acidez del suelo con base en los resultados de análisis del suelo - Cuando el pH es adecuado (entre 5,0 y 5,5), pueden aplicarse fertilizantes como sulfato de Ca (yeso)

Continúa...

Magnesio



Descripción de la deficiencia	Causas de la deficiencia	Prevención y corrección de la deficiencia
• Clorosis intervenal de las hojas más viejas, en tanto que las nervaduras principales permanecen verdes • Defoliación en las ramas productivas	• Niveles bajos de Mg en el suelo • Planes de fertilización deficientes en Mg • Baja Capacidad de Intercambio Catiónico-CIC • Condiciones de acidez del suelo • Suministro de altas dosis de K • Corrección de la acidez del suelo con cal agrícola u otras fuentes con poco Mg o desprovisto de este nutriente • Desbalances con respecto a K y Ca	• En suelos con bajos niveles de Mg, incluir el elemento dentro de los planes de fertilización • Corregir la acidez mediante fuentes que contengan Mg, principalmente dolomita • Racionalizar la fertilización potásica y nitrogenada

Continúa...

Azufre



Descripción de la deficiencia	Causas de la deficiencia	Prevención y corrección de la deficiencia
Amarillamiento uniforme de las hojas más nuevas. A diferencia de lo que ocurre con la carencia severa de N, ante la falta de S, las hojas más viejas próximas al ápice de las ramas (tercero o cuarto par) permanecen de color verde.	- Niveles bajos de S en el suelo, particularmente cuando los contenidos de materia orgánica son muy bajos - Baja mineralización de la materia orgánica, principalmente debido a las bajas temperaturas - Problemas de aireación del suelo - Planes de fertilización que no incluyen el S	- Conservación del suelo para evitar la erosión y la pérdida de la capa orgánica que es la principal fuente de S - Aplicar abonos orgánicos - Incluir el S en los planes de fertilización

Continúa...

Hierro



Descripción de la deficiencia	Causas de la deficiencia	Prevención y corrección de la deficiencia
Las hojas nuevas toman coloraciones que van desde amarillo verdoso hasta verde muy claro (casi blanco), mientras que las nervaduras se conservan verdes, formando una red muy fina	- Suelos con pH cercano a 7,0 - Exceso de agua y pobre aireación - Sobre-encalamiento o aplicaciones de cal en suelos con pH adecuado para café - Aplicación de glifosato para el control de arvenses sin los cuidados necesarios	- Tener en cuenta los resultados de análisis del suelo para definir la pertinencia de la aplicación de cales - Evitar el sobre-encalamiento - Tener cuidado con la aplicación de glifosato

Continúa...

Manganeso



Descripción de la deficiencia	Causas de la deficiencia	Prevención y corrección de la deficiencia
Las hojas nuevas de la planta se tornan más grandes que lo normal. Estas presentan un color verde claro y uniforme en toda su superficie, mientras que las nervaduras tienden a ser ligeramente más oscuras.	- Niveles muy bajos de Mn en el suelo, principalmente debido a las condiciones de alcalinidad o valores de pH cercanos a la neutralidad. Por lo general ocurren en pequeñas áreas cercanas a las viviendas, donde han arrojado cenizas - Desbalances con respecto al Fe	La principal vía para prevenir las deficiencias de Mn es evitar que el pH del suelo exceda de 5,5. Por lo tanto, no realizar prácticas de encalamiento si no se cuenta con los resultados de análisis del suelo y evitar el sobre-encalamiento

Continúa...

Boro



Descripción de la deficiencia	Causas de la deficiencia	Prevención y corrección de la deficiencia
• Manchas cafés en los brotes (hojas nuevas) • Muerte de las yemas terminales y aparición de nuevos brotes • Hojas más viejas verde aceituna, que se extiende desde el ápice hacia la base, en forma de "V" invertida (^) • Suberización (formación de tejido corchoso) de las nervaduras en las hojas más viejas • Aparición de una mancha circular café de apariencia corchosa (suberización) en la base de los frutos. A partir de este punto se extienden hasta el pedúnculo del fruto rayas con un aspecto similar, las cuales pueden crecer hasta formar manchas de aspecto irregular	• Suelos con niveles muy bajos de B • Suelos con bajos contenidos de materia orgánica y/o muy arenosos • Déficit hídrico prolongado • Planes de fertilización sin este nutriente • Suelos con pH bajo	• Realizar prácticas de conservación del suelo para evitar la erosión • Aplicar abonos orgánicos • Incluir el B en los planes de fertilización, especialmente en suelos pobres en materia orgánica y con bajos niveles de B

Continúa...

Zinc



Descripción de la deficiencia	Causas de la deficiencia	Prevención y corrección de la deficiencia
- Hojas nuevas más pequeñas, lanceoladas y con clorosis intervenal - Entrenudos cortos (formación de roseta)	- Suelos con niveles bajos en Zn - Planes de fertilización deficientes en Zn - Suelos con pH neutro o alcalino - Períodos de sequía prolongados - Exceso de P en el suelo, generalmente consecuencia de fertilizaciones excesivas	- Aplicar Zn en suelos deficientes - Manejo adecuado de la fertilización fosfórica - Evitar el sobre-encalamiento

En el ámbito práctico, se sugiere llevar a cabo el siguiente procedimiento:

- Realizar el muestreo seis meses antes de una cosecha.
- La muestra que se lleva al laboratorio debe corresponder a un lote homogéneo en cuanto al tipo de suelo —color y textura, entre otras características—, la topografía, la edad de las plantaciones, el sombrío y las prácticas de fertilización y encalamiento realizadas recientemente.
- Seleccionar en cada lote 20 plantas de manera aleatoria.
- En cada planta escoger cuatro ramas en la zona de producción en los cuatro puntos cardinales.
- Tomar de cada rama una hoja, ubicada en el tercero o cuarto nudo a partir del ápice (Figura 168).
- Realizar, preferiblemente, el muestreo en las primeras horas de la mañana.
- Depositar las hojas recolectadas en una bolsa de papel nueva.
- Rotular la bolsa con una clara identificación, y entregar al laboratorio la información

correspondiente a: fecha de muestreo, ubicación de la finca, identificación del lote, características de la plantación (edad, densidad de siembra, sombrero, entre otras) y observaciones acerca de las prácticas recientes de fertilización, encalamiento, aplicación de insecticidas y fungicidas, entre otras.

- ♦ Enviar la muestra al laboratorio a la mayor brevedad posible. En el caso de una demora, secar al aire la muestra sobre un papel limpio o guardarla en la nevera, sin que se congele.
- ♦ La muestra debe estar libre de suelo, polvo, pesticidas y fertilizantes. En ocasiones será necesario lavar las hojas con agua limpia y secarlas.
- ♦ Cuando existe la sospecha de una deficiencia nutricional, es necesario tomar por separado muestras en las plantas normales y con anomalías en el mismo lote.

Interpretación de los resultados

Los resultados de los análisis foliares corresponden a las concentraciones reales de los nutrientes en la muestra objeto de estudio

y no son valores de un índice como sucede con un análisis de suelo (Soil Improvement Committee California Plant Health Association [SICCPHA], 2004).

La Figura 169 describe la relación entre la concentración foliar de un nutriente y el crecimiento o producción de la planta en términos relativos (expresado en porcentaje del valor máximo alcanzado, es decir, 100%). El **nivel crítico** señala la concentración del elemento por debajo de la cual se hacen visibles síntomas de deficiencia y la producción potencial del cultivo se afecta de manera considerable. Generalmente, el nivel crítico se calcula para un rendimiento relativo igual al 90% o 95%, de acuerdo al juicio del investigador, lo cual significa que la producción máxima se reduce en el 10% y 5%, respectivamente. Bajo este panorama, se considera que la deficiencia es **severa** y, por lo tanto, se espera que el suministro del elemento genere efectos significativos en la producción y calidad (Havlin et al., 2017). Por las posibles interacciones que ocurren entre planta, manejo y ambiente, es poco probable que exista un único valor de nivel crítico universal para una misma especie. Con el fin de subsanar esa imprecisión se usa el **rango crítico de nutriente**, también llamado **rango crítico de suficiencia**, el cual comúnmente se selecciona para rendimientos relativos que van desde el 90% hasta el **rendimiento máximo** alcanzable, es decir, el

Figura 168.

Muestreo foliar en el tercero o cuarto par de hoja formadas.



100% (Dow & Roberts, 1982). En esta zona de transición, considerada la más importante en el diagnóstico foliar, la deficiencia se clasifica como leve y eventualmente pueden aparecer síntomas de deficiencias; sin embargo, la aplicación del nutriente vía fertilización puede no tener efectos significativos en la producción, dada la proximidad a la concentración adecuada. Adicionalmente, la planta puede llegar a absorber en exceso un nutriente, sin que ello conlleve al incremento o reducción del crecimiento, condición que se conoce como **consumo de lujo**. Por último, existe una concentración del elemento en la planta, por encima de la cual el rendimiento del cultivo disminuye y aparecen síntomas de **toxicidad**.

Los rangos críticos que se sugieren en la literatura pueden presentar variaciones, debido tanto a los factores que afectaron el desarrollo del cultivo durante la investigación (planta, suelo, clima, plagas, enfermedades y manejo), como a la forma en que se analiza la información y los criterios del investigador. Por ejemplo, para condiciones de Colombia, Valencia y Arcila (1977) sugieren como rango normal/óptimo de la concentración foliar de potasio valores entre 1,5% y 2,0%. El límite superior de este rango coincide con el valor reportado por Sadeghian y Álvarez (2011) como el adecuado (2,02%), más no necesariamente el límite inferior, el cual puede presentar variaciones según el rendimiento relativo seleccionado (Figura 170), así:

Rendimiento relativo (%)	Rango crítico para la concentración de K (%)
Entre 90% y 100%	Entre 1,15% y 2,02%
Entre 95% y 100%	Entre 1,35% y 2,02%
Entre 90% y 95%	Entre 1,15% y 1,35%

La aplicación de un nutriente por medio de la fertilización incrementa de manera directa y proporcional los contenidos del elemento suministrado en el suelo, mientras que su concentración en la planta sigue una curva asintótica, como se muestra en la Figura 171 para el potasio. Lo anterior se traduce en que la relación entre el contenido del nutriente en el suelo y en las hojas corresponda también a una curva asintótica

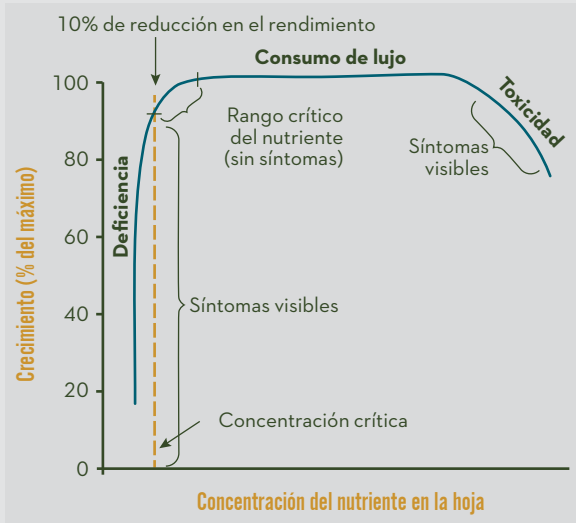


Figura 169. Relación entre la concentración del nutriente en la hoja y el crecimiento de la planta. Adaptada de Havlin et al. (2017).

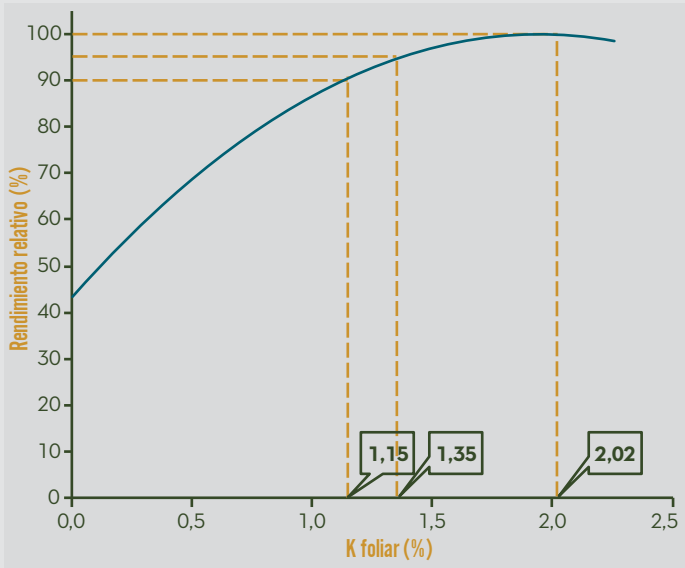


Figura 170. Relación entre la concentración foliar de potasio (K) y el rendimiento de café. Adaptado de Sadeghian y Álvarez (2011).



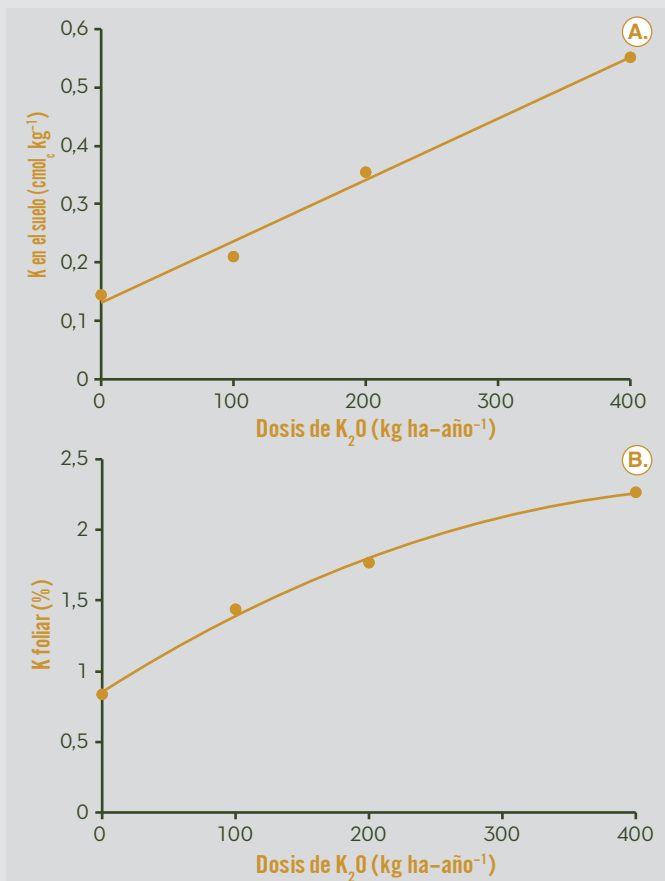


Figura 171.

A. Potasio intercambiable (K^+) en el suelo y **B.** en las hojas en función del suministro de potasio (K_2O). Tomado de Sadeghian y Álvarez (2011).

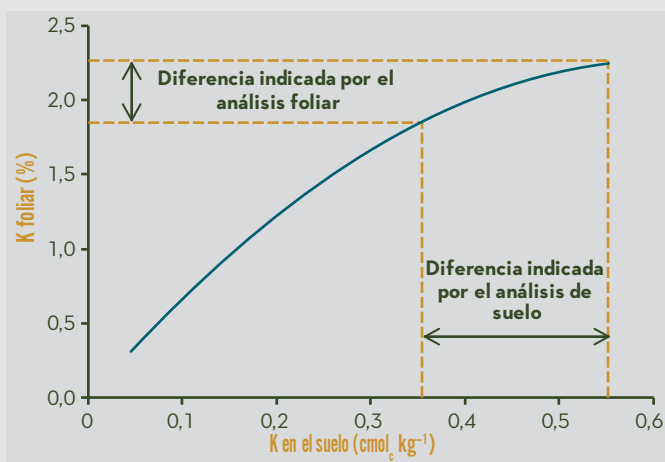


Figura 172.

Relación entre el nivel de potasio intercambiable (K^+) en el suelo y la concentración foliar de potasio en plantas de café. Tomado de Sadeghian y Álvarez (2011).

(Figura 172). Esto implica que, por encima del nivel crítico en las hojas, solo se darán cambios pequeños en la concentración del elemento, mientras que la disponibilidad del nutriente en el suelo se incrementa con una magnitud mayor. Lo expuesto sugiere que, los resultados del análisis foliar son particularmente útiles cuando la concentración del elemento objeto de estudio es baja, es decir, por debajo del rango crítico. Cuando la disponibilidad del nutriente sea alta o muy alta, el análisis foliar no será suficientemente sensible y, en razón de ello, sería más apropiado el análisis de suelos (Mengel et al., 2001).

Rangos críticos y relaciones de nutrientes

En la Tabla 58 se consignan las concentraciones de los nutrientes, sugeridas para hojas de café durante la etapa de producción en Colombia (Sadeghian, 2020). Cabe resaltar que no siempre el diagnóstico de un elemento, realizado de manera aislada, es suficiente para la evaluación del estado nutricional; en este sentido, para una nutrición adecuada deben cumplirse dos condiciones: i) que las concentraciones de todos los elementos requeridos se encuentren en los niveles adecuados y ii) la relación entre los nutrientes se conserve dentro de ciertos límites. En concordancia con lo expuesto, se han propuesto diferentes metodologías para el diagnóstico nutricional a partir de las relaciones entre los elementos, siendo la más empleada el Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS, por sus siglas en inglés), en el cual se comparan las relaciones de las concentraciones de nutrientes en el tejido foliar de pares de nutrientes con valores de referencia o normas de un grupo de alto rendimiento. Arboleda et al. (1988), basándose en una investigación con nitrógeno, fósforo y potasio, generaron normas DRIS para el cálculo de indicadores con fines de diagnóstico en el cultivo del café (Tabla 59).

Tabla 58.

Rangos críticos de nutrientes en hojas de café durante la etapa de producción. Tomado de Sadeghian (2020).

Nutriente	Rango crítico
Nitrógeno	2,36-2,78%
Fósforo	0,14-0,20%
Potasio	1,58-2,15%
Calcio	0,75-1,29%
Magnesio	0,18-0,45%
Azufre	0,15-0,19%
Manganeso	106-278 mg kg ⁻¹
Hierro	54-121 mg kg ⁻¹
Boro	29-55 mg kg ⁻¹
Cobre	8-17 mg kg ⁻¹
Zinc	6-12 mg kg ⁻¹

Tabla 59.

Valores de referencia o normas DRIS para el cálculo de indicadores con fines de diagnóstico en el cultivo del café. Tomado de Arboleda et al. (1988).

Forma de expresión	Media	CV (%)	Rango
P/N	0,0647	26	0,0642 - 0,0652
K/N	0,7445	31	0,7374 - 0,7516
Ca/N	0,4716	32	0,4669 - 0,4763
N/Mg	5,8066	46	5,7242 - 5,8890
Mn/100 N	0,7763	38	0,7671 - 0,7855
Fe/100 N	0,5101	41	0,5036 - 0,5166
B/100 N	0,2092	34	0,2070 - 0,2114
K/P	11,7349	28	11,6315 - 11,8383
P/Ca	0,1506	39	0,1488 - 0,1524
P/Mg	0,3670	49	0,3614 - 0,3726
Mn/100 P	13,2161	53	12,9994 - 13,4328
100 P/Fe	0,1464	44	0,1444 - 0,1484
B/100 P	3,2979	31	3,2661 - 3,3297
K/Ca	1,7677	49	1,7408 - 1,7946
K/Mg	4,4492	60	4,3668 - 4,5316
100 K/Mn	1,1880	70	1,1623 - 1,2137
100 K/Fe	1,6523	44	1,6299 - 1,6747
B/100 K	0,3117	53	0,3066 - 0,3168
Ca/Mg	2,5373	37	2,5084 - 2,5662
Mn/100 Ca	1,8659	54	1,8345 - 1,8973
100 Ca/Fe	1,0441	45	1,0296 - 1,0586
B/100 Ca	0,4877	51	0,4800 - 0,4954
Mn/100 Mg	4,5471	61	4,4609 - 4,6333
Fe/100 Mg	3,1267	78	3,0510 - 3,2024
B/100 Mg	1,2065	66	1,1817 - 1,2313
Mn/Fe	1,6509	41	1,6297 - 1,6721
Mn/B	4,2233	54	4,1521 - 4,2945
B/Fe	0,4669	49	0,4597 - 0,4741

Rango = La media más o menos el error estándar

A person wearing a blue cap, a light-colored long-sleeved shirt, khaki pants, and bright green gloves is bent over in a coffee field. They are holding a small brown cup and appear to be sampling soil or coffee cherries from a bush. A black bag is slung over their shoulder. The background shows rows of coffee plants with green leaves and some red cherries.

Manejo de nutrientes en sistemas de producción de café



Los planes de la nutrición de los cafetales pueden definirse según la información disponible acerca del sistema de producción. La mejor alternativa la constituyen los planes específicos de manejo, determinados con base en el análisis de suelos y ajustados según las características de la plantación, la cantidad y la distribución de la lluvia, el precio de los fertilizantes, entre otros. En algunas oportunidades los registros históricos de análisis de suelos a escala regional pueden servir de ayuda para establecer opciones de manejo para zonas homogéneas. En contraste, cuando no se cuenta con indicadores que permitan conocer la disponibilidad de los nutrientes en el suelo debe recurrirse a planes generales de manejo. Como es de esperarse, en la medida en que se utiliza una mayor información para la toma de decisiones, se reduce el riesgo de cometer errores en las recomendaciones y obtener el mayor beneficio económico y ambiental.

En el manejo de la fertilidad del suelo y la nutrición de café pueden diferenciarse las siguientes etapas: almácigo, establecimiento, levante y producción. Adicionalmente, la renovación de los sistemas de producción a través de la zoca convencional y otras alternativas requieren de un manejo especial.

Manejo de la nutrición en la etapa de almácigo

Esta etapa se inicia al momento de trasplantar la “chapola” (plántula de café) a una bolsa plástica, con sustrato que comúnmente se compone de una mezcla de suelo con abono orgánico, y finaliza con la siembra de la planta en el campo. Su duración, generalmente entre cuatro y seis meses, depende del tamaño de la bolsa, la fertilidad del sustrato, las condiciones climáticas predominantes (humedad, temperatura y luz, principalmente), el manejo fitosanitario y la época de la siembra. En cuanto a los aspectos relacionados con la nutrición, los puntos de mayor atención han sido dirigidos a la fertilización orgánica e inorgánica, el manejo

de la acidez, el uso de micorrizas y la aplicación de fertilizantes vía foliar.

Fertilizantes orgánicos

El empleo de los abonos orgánicos, además de aportar nutrientes, mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que favorece un mayor crecimiento y desarrollo de las plantas. Dos aspectos a considerar para su aplicación tienen que ver con la composición química de estos y el grado de la descomposición del material, es decir, su madurez.

La pulpa de café constituye la principal fuente orgánica de abono en las fincas cafeteras, en cuyo caso se sugiere mezclarla con el suelo en proporción 1 a 1 en volumen (Mestre, 1973). También puede utilizarse la lombriz roja californiana para acelerar su descomposición y obtener un producto de mejor calidad (Blandón et al., 1999). En algunas regiones del país existen otras alternativas, según la actividad agropecuaria, entre ellas, gallinaza, pollinaza, estiércol de bovinos y cenichaza. Tanto para la lombrinaza como para los demás abonos se recomienda mezclar tres partes de suelo por una parte del abono. Adicionalmente, se ha demostrado que el contenido de materia orgánica del suelo (MO) no es un factor para ajustar las proporciones sugeridas de las anteriores mezclas, pues esta difiere de los abonos orgánicos en su composición y propiedades químicas, los cuales normalmente ofrecen una mayor disponibilidad de los nutrientes a corto plazo (Salamanca & Sadeghian, 2008).

Un problema frecuente durante la etapa de almácigo se relaciona con el uso de fertilizantes orgánicos que no han alcanzado su madurez, los cuales llegan a ocasionar toxicidad en las plantas cuando se incorporan en las proporciones mencionadas. Investigaciones recientes demuestran que ante esta situación pueden ser favorables relaciones más amplias, por ejemplo 6 a 1 y hasta 9 a 1 (Sadeghian & Ospina, 2021). En el caso que se presente toxicidad por el uso de abonos orgánicos, podrán aminorarse los efectos negativos

mediante la aplicación de un fertilizante que reduzca el pH del suelo —por ejemplo, DAP—; con lo cual se reduce la actividad de las bacterias que descomponen los abonos orgánicos (Ávila et al., 2010).

Fósforo

En la mayoría de las veces, el nutriente más limitante durante la etapa del almácigo es el fósforo (P); condición que se relaciona con la reducida extensión radicular y la baja movilidad del elemento en el suelo. La dosis requerida para bolsas grandes (17 x 23 cm) es de 2,0 g/planta de P (P_2O_5), cantidad que puede suministrarse un mes luego del trasplante de la chapola o fraccionada en dos aplicaciones de 1,0 g/planta, uno y tres meses después del trasplante. Tratándose de bolsas más pequeñas (15 x 21 cm), por lo general es suficiente con la primera aplicación, siempre y cuando el trasplante se lleva a cabo antes de los cuatro meses. Los fertilizantes más comunes son DAP (18-46-0) y MAP (11-53-0). El uso de otros productos, enriquecidos con micronutrientes y azufre no ha presentado ventajas comparativas (Sadeghian & Ospina, 2021).

Nitrógeno, potasio y magnesio

Dosis de nitrógeno (N) mayores a 1,0 g/planta pueden resultar tóxicas para la planta (Salazar, 1977); entretanto, dosis iguales o menores de 0,6 g/planta resultan beneficiosas (Sadeghian & González, 2014); por lo tanto, se sugiere proporcionar este nutriente a través de fertilizantes que son ricos en P y contenidos relativamente bajos de N, tales como DAP o MAP que, en las dosis recomendadas para suplir el P, consiguen suministrar el N requerido. La aplicación superficial de potasio (K_2O) en dosis iguales o menores a 2,0 g/planta no afecta el crecimiento del café durante la fase de almácigo (Salazar, 1977), mientras que, al incorporar cantidades equivalentes al suelo, resultan perjudiciales. Efectos similares causa el magnesio (Mg) cuando se emplean fuentes solubles como el sulfato, resultado que

se relaciona con la salinidad generada por estas fuentes (Sadeghian, 2012).

Manejo de la acidez

La incorporación de abonos orgánicos contribuye a la corrección de la acidez del suelo (Ávila et al., 2010; Díaz et al., 2008), reduciendo así la necesidad de emplear enmiendas calcáreas. Cuando que no se apliquen estos abonos, podrá manejarse la acidez mediante el encalamiento; práctica que tendrá su soporte únicamente en los resultados de los análisis de suelo. Una recomendación general para los distintos suelos de Colombia, consiste en incorporar 1,0 kg de caliza dolomítica por cada metro cúbico (m^3) de suelo para elevar el pH en 0,2 unidades, en promedio. Por ejemplo, si el suelo presenta un pH igual o menor de 4,5, será necesario mezclar 2,5 kg de cal por cada m^3 de suelo; así se alcanzarán valores de pH cercanos a 5,0 y contenidos de aluminio intercambiable menores de $1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Cuando la cantidad de una enmienda excede la dosis requerida se afecta de manera negativa el crecimiento de las plantas, como consecuencia de los cambios químicos que trae consigo el sobre-encalamiento, condición que puede perdurar debido a la residualidad del producto y cuyo manejo no es fácil. Investigaciones recientes indican que las rocas fosfóricas que se producen en el país no ejercen efecto alguno en el crecimiento de las plantas durante esta etapa del cultivo (Sadeghian & Ospina, 2021); el mismo caso se presenta para los silicatos (Salamanca & Sadeghian, 2015).

Aplicación foliar de fertilizantes

Los resultados de las investigaciones de Cenicafé en torno a la aplicación de fertilizantes vía foliar no revelan ningún efecto en el vigor de las plantas, evaluado en términos del aumento en la materia seca (Guzmán y Riaño, 1996; Valencia 1975). Mediante esta práctica puede cambiarse el color de las hojas (efecto maquillaje), sin que ello contribuya al crecimiento de las plantas.

Micorrizas

El uso de las micorrizas, además de proporcionar nutrientes como el P a las plantas, puede favorecer a la raíz en contra de organismos patógenos, por ejemplo, nematodos (Leguizamón, 1995) y la mancha de hierro. Sin embargo, los resultados de investigaciones recientes no siempre revelan efecto favorable de la adición de micorriza comercial, suministrada con o sin adición de pulpa o fósforo, en el crecimiento de las plantas de café durante esta fase del cultivo (Sadeghian & Ospina, 2021).

Manejo de la nutrición en la etapa de establecimiento

Las labores que se realizan durante el establecimiento se verán reflejadas en el desarrollo del cultivo y, por lo tanto, en la producción de los siguientes ciclos de renovación, los cuales tendrán una duración de 15 años o más. La adecuación física y química del suelo debe realizarse antes de la siembra, según la información disponible.

La aplicación de abonos orgánicos, particularmente la pulpa de café descompuesta, resulta conveniente en suelos con bajos contenidos de MO, en dosis entre 3 y 6 kg por hoyo de $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}$. Para la corrección de la acidez es necesario incorporar al suelo entre 60 y 120 g de enmienda calcárea/hoyo, según el grado de la acidez y los contenidos de calcio intercambiable (Ca^{2+}). En vista de los bajos niveles de Mg en muchos de los suelos y la frecuencia en la aparición de las deficiencias, la dolomita constituye la principal fuente.

Cuando se plantan colinos pequeños, especialmente aquellos cuyo manejo nutricional durante la etapa de almácigo ha sido deficiente (bolsas pequeñas, poco o nulo aporte de abono orgánico y nutrientes),

es preferible iniciar el plan de manejo de los fertilizantes en los siguientes días a la siembra, cuando se inicia la época lluviosa; de lo contrario, podrá esperarse dos meses. En concordancia, conviene subrayar la pertinencia del suministro de P y N.

Manejo de la nutrición en la etapa de crecimiento

La etapa de crecimiento vegetativo, conocida comúnmente como la etapa de “levante”, se inicia desde pocos días después de plantar el colino en el campo y se extiende hasta las primeras floraciones, las cuales ocurren 10 a 12 meses luego del establecimiento. A partir de esta fecha tienen lugar simultáneamente crecimientos vegetativos y reproductivos (flores y frutos), como consecuencia de estímulos climáticos, especialmente períodos de lluvia y sequía. En las regiones cafeteras de Colombia donde ocurren dos cosechas durante el año coinciden los períodos de floración con el crecimiento de frutos y partes vegetativas (Figura 173). Ahora bien, por cuestiones prácticas, y en razón de que la primera floración es relativamente pequeña, se

acepta que la etapa de crecimiento o levante se extiende hasta los 18 meses posteriores al establecimiento.

Las dosis recomendadas de los nutrientes para esta etapa, expresadas en g/planta, pueden definirse según los resultados del análisis del suelo (Tabla 60). Se sugiere iniciar las fertilizaciones aproximadamente dos meses luego de la siembra, y continuarlas cada tres a cuatro meses, según la cantidad y la distribución de las lluvias. Al respecto, debe procurarse que los primeros 5 a 10 cm del suelo estén húmedos al momento de realizar la labor y esperar que haya una alta probabilidad de lluvia durante los siguientes dos meses.

En esta fase del cultivo, el N es el elemento de mayor requerimiento, por lo tanto, se sugiere incluirlo en la mayoría de las aplicaciones. La MO del suelo constituye la fuente primaria de N en el suelo, de allí que su contenido se tenga en cuenta para definir las dosis a proporcionar, las cuales varían entre 47 y 58 g/planta.

En el 80% de los departamentos en los que se cultiva café en Colombia, son bajos los niveles de P en el suelo (Sadeghian & Duque, 2017). Este panorama, sumado a la poca movilidad del elemento en el suelo y la reducida extensión radical durante los primeros meses después de la siembra, afecta la disponibilidad de P; condición que llega a reducir el crecimiento de las plantas, si no se realizan prácticas adecuadas de fertilización. En ocasiones, particularmente cuando no se llevan a cabo los aportes suficientes de P durante la fase de almácigo, será conveniente suministrar el nutriente, aun cuando sus contenidos en el suelo sean altos (mayor de 30 mg kg^{-1}), práctica que se conoce como fertilización de “arranque”. Una vez que las raíces toman parte del P suministrado, crecen y exploran un volumen mayor del suelo, encontrando así más P y otros nutrientes. Se consideran adecuadas, dosis hasta 15 g/planta de P (P_2O_5) durante los siguientes 18 meses al establecimiento; al respecto, la eficiencia de la aplicación puede incrementarse cuando el abono se dispone en forma localizada (no dispersa) en el área donde se encuentran las raíces. De esta



Figura 173.

Presencia de flores y frutos en una rama de café como evidencia de dos cosechas durante el año en algunas regiones cafeteras de Colombia.

Tabla 60.

Dosis recomendadas de nutrientes para cafetales en la etapa de crecimiento vegetativo, de acuerdo a los resultados de análisis de suelo. Adaptado de Sadeghian (2008a).

Resultado del análisis de suelos	Mes después de la siembra				
	2	6	10	14	18
Materia orgánica-MO (%)	Nitrógeno – N (g/planta)				
MO ≤8	7	9	12	14	16
MO >8	5	7	9	12	14
Fósforo-P (mg kg⁻¹)	Fósforo – P₂O₅ (g/planta)				
P ≤ 30	4		5		6
P > 30	4*		0		0
Potasio-K (cmol_c kg⁻¹)	Potasio – K₂O (g/planta)				
K ≤ 0,2	0	0	5	0	10
0,2 < K ≤ 0,4	0	0	0	0	10
K > 0,4	0	0	0	0	0
Magnesio-Mg (cmol_c kg⁻¹)	Magnesio – MgO (g/planta)				
Mg ≤ 0,3	0	0	2	0	3
0,3 < Mg ≤ 0,9	0	0	0	0	3
Mg > 0,9	0	0	0	0	0

*sólo cuando el aporte de P durante la etapa de almácigo haya sido deficiente.

manera, el suelo próximo al sitio de aplicación satura su capacidad de fijación, quedando parte importante de P disponible para ser absorbido por las raíces de las plantas.

El requerimiento de K aumenta con el llenado de los frutos. Cuando se emplea suficiente abono orgánico rico en este elemento para la obtención de almácigos (por ejemplo, pulpa de café), se cubren las necesidades durante algunos meses. En contraste, un sustrato pobre en abono orgánico, sumado al uso de bolsas pequeñas en el almácigo y un bajo contenido de K⁺ intercambiable, puede crear la necesidad de iniciar temprano las fertilizaciones potásicas (posiblemente en el primer semestre después de la siembra). De lo contrario, y según el nivel del K⁺ en el suelo, los planes de suministro pueden iniciarse en el décimo mes a partir del establecimiento, proporcionando hasta 15 g/planta de K₂O.

La demanda de Mg durante esta etapa es relativamente baja, por lo tanto, las dosis sugeridas tienden a ser pequeñas (hasta 5 g/planta) (Tabla 60). Con la corrección de la acidez del suelo mediante el empleo de la

caliza dolomítica, se cubren los requerimientos de Mg durante al menos un año, especialmente cuando se incorpora al suelo del hoyo.

En los suelos ácidos (pH<5,0), los requerimientos de calcio (Ca) se abastecen con el encalado; entretanto, ante una deficiencia del elemento (Ca²⁺<1,5 cmol_c kg⁻¹) en suelos sin problemas de acidez, se sugiere aplicar 40 g/planta de cal o yeso (Sadeghian, 2008a).

Con respecto a los micronutrientes, en contadas ocasiones ocurren deficiencias durante la etapa de crecimiento vegetativo, especialmente en suelos con altos contenidos de MO (mayor a 8%). Debido a ello, por lo general, se recomienda aplicarlos de manera correctiva, empleando dosis bajas, siempre y cuando se tenga la certeza de que se trata de una deficiencia como tal, pues en muchas ocasiones la presencia de patógenos, malformaciones de raíces, toxicidad por herbicidas, entre otros disturbios fisiológicos, pueden ocasionar una sintomatología similar. En algunas regiones del país, principalmente en Antioquia y Huila, ocurren de manera

más frecuente deficiencias de boro y, ocasionalmente, de zinc. Una recomendación aproximada incluye entre 0,2 y 0,4 g/planta de cada uno de los dos elementos, según la edad de las plantas.

Dado que durante esta etapa las dosis recomendadas de los nutrientes varían entre una aplicación y otra, es conveniente emplear fuentes simples de fertilizantes que permitan ajustar el plan de nutrición, de acuerdo a la fenología de la planta y las particularidades de cada elemento. En esta vía, las fuentes más comunes son urea (46-0-0), SAM (21-0-0-24 S), DAP (18-46-0), MAP (10-50-0), KCl (0-0-60), yeso (24% de Ca y 15% de S), óxido de Mg (hasta 90% de MgO) y Kieserita (25% de MgO y 20% de S). El sulfato de amonio (SAM) genera una mayor acidez en el suelo con respecto a la urea y, por consiguiente, se recomienda aplicarlo cuando el pH del suelo es mayor de 6,0 o en bajas dosis para cubrir la demanda de azufre. Las fuentes simples más comúnmente empleadas para cubrir los requerimientos de boro y zinc son bórax (10% a 15% de B) y sulfato de zinc (20% a 30% de Zn).

En relación con los abonos orgánicos, las dosis requeridas pueden variar entre 4 y 6 kg/planta durante los primeros dos años, según la composición del material y su contenido de humedad. Las fuentes más comunes, además de la pulpa de café descompuesta son lombrinaza, gallinaza y pollinaza, siendo las dos últimas más ricas en P, característica que puede aprovecharse para las primeras fertilizaciones.

En el caso de no disponer de los resultados del análisis de suelos, no será posible conocer el estado de los nutrientes; condición que conlleva a la aplicación de las dosis más altas de cada elemento, con el fin de garantizar los requerimientos que demanda el cultivo, procedimiento que puede incrementar los riesgos económicos y ambientales.

Respecto a la forma de aplicación, en las primeras dos o tres oportunidades, los fertilizantes se ubican en áreas cercanas al

tallo, donde se encuentra la biomasa radical, sin que entren en contacto con este (Figura 174), siempre teniendo en cuenta la disponibilidad de humedad en el suelo, condición regulada mayoritariamente por la precipitación. Cuando las plantas hayan adquirido cierto desarrollo (en el segundo año, cuando el tallo es más leñoso y las raíces han alcanzado una mayor extensión), será posible aplicar los fertilizantes al voleo en el plato del árbol.

Manejo de la nutrición en la etapa de producción

Los planes de fertilización durante esta etapa del cultivo deben satisfacer tanto los requerimientos de los órganos vegetativos como reproductivos, los cuales ocurren de manera simultánea. Así, una parte de los nutrientes absorbidos servirá para formar raíces, tallos, ramas y hojas, mientras que la otra se verterá en flores y frutos; adicionalmente, los nutrientes se re-movilizan de un órgano a otro, cuando se presentan demandas específicas. Un ejemplo lo constituye el crecimiento del fruto a partir de los elementos que “migran” desde las hojas y las ramas.

El desarrollo del fruto tarda aproximadamente ocho meses (32 semanas); así mismo, para la formación y la maduración de los nudos en donde se disponen las flores y los frutos se requieren cerca de diez meses; por consiguiente, el tiempo necesario para producir una cosecha de café es cerca de 18 meses. La anterior consideración permite inferir que para alcanzar las metas de productividad propuestas será necesario iniciar los planes de nutrición en un lapso de tiempo igual o mayor que este. En conclusión, los resultados de una fertilización se verán tanto en la cosecha actual como en la siguiente; en el mismo sentido, la producción que se obtiene hoy es la consecuencia de las labores que se iniciaron el año anterior.

Con relación a los requerimientos nutricionales de las plantas, son factores determinantes las características de la especie/variedad, las condiciones del clima, las propiedades del suelo y el manejo del cultivo. Debido a las diferencias que exhiben las regiones cafeteras de Colombia en cuanto al clima y suelo, surgen múltiples sistemas de producción, también diversos en sus requerimientos nutricionales. Las principales diferencias entre estos sistemas radican en la densidad de plantas y el nivel de sombra; factores que afectan la productividad y el ciclaje de nutrientes, según las especies acompañantes.

Actualmente en Colombia existen cerca de 870.000 ha cultivadas en café, de las cuales el 63% se encuentra a plena exposición solar o con muy bajo nivel de sombra (menor de 35%), en su mayoría con densidades entre 5.000 y 7.500 plantas/ha (Tabla 61), el 32% está bajo semisombra (nivel de sombra entre 35% y 55%, aproximadamente), siendo comparables las áreas con densidades medias (entre 5.000 y 7.500 plantas/ha) y bajas (menor de 5.000 plantas/ha). La representación porcentual de plantaciones con sombrío denso (nivel de sombra mayor de 55%) no supera el 5%.

Densidad de plantas y fertilización

Para variedades de porte bajo, como las que se cultivan en la mayor parte del territorio nacional, el incremento en la densidad de siembra se ve reflejado en un aumento lineal de la producción, siempre y cuando se establezcan menos de 3.500 plantas/ha



Figura 174. Ubicación de los fertilizantes durante la etapa de levante.

(Figura 175). Para una densidad mayor, la tendencia se torna de tipo cuadrático (Figura 176), logrando la máxima productividad con 14.740 plantas/ha; sin embargo, los incrementos obtenidos después de las 10.000 plantas/ha son pequeños y no se justifican económicamente; consideración a la que se suma la dificultad en el manejo de la plantación (Uribe & Mestre, 1988). Cuando se toma como punto de referencia una densidad de 10.000 plantas/ha, se espera que al establecer 2.500 plantas/ha la productividad se reduzca en 41%, con 5.000 plantas/ha el 20% y con 7.500 plantas/ha el 7% (Figura 177).

Tabla 61. Distribución porcentual del área cultivada en café, según nivel de sombra y densidad de plantas por hectárea (SICA, 2021).

Nivel de sombra	Densidad de plantas por hectárea			
	Mayor de 7.500	Entre 5.000 y 7.500	Menor de 5.000	Total
Sol	3,39%	36,96%	22,78%	63,14%
Semisombra	0,88%	17,17%	14,27%	32,32%
Sombra	0,14%	1,80%	2,60%	4,54%



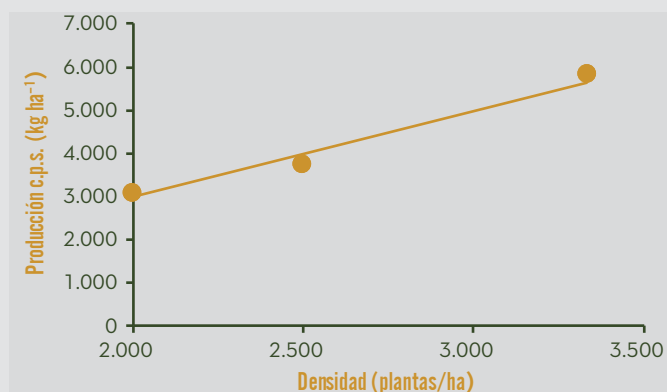


Figura 175.

Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta a densidad de siembra en plantaciones de café sin sombra y con menos de 3.500 plantas por hectárea. Tomado de Mestre (1977).

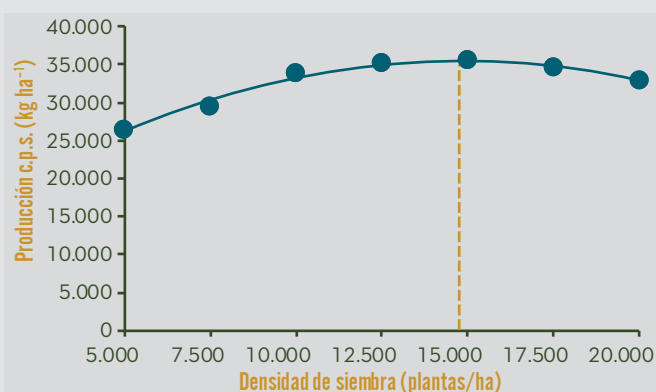


Figura 176.

Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en función de la densidad de siembra. Tomado de Uribe y Mestre (1988).

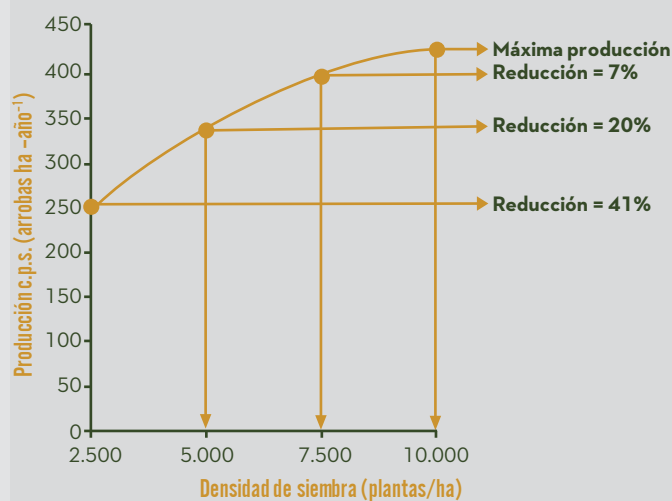


Figura 177.

Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en función de la densidad de siembra. Se estima la pérdida (%) al establecer densidades de siembra menores de 10.000 plantas/ha. Tomado de Sadeghian (2014). Datos originales de Uribe y Mestre, (1988).

la respuesta del café a 16 tratamientos, resultantes de cuatro densidades (2.500, 3.268, 4.444 y 6.410 plantas/ha) y cuatro dosis del fertilizante 12-12-17-2 (200, 400, 600 y 800 g/planta al año). Se reportan incrementos en la producción al reducir las distancias de siembra; así mismo, para la mayoría de las densidades se registraron aumentos al elevar las dosis (Figura 178). En ningún caso se presentó interacción estadística entre dosis y densidad, pero un análisis detenido de los datos permitió detectar incrementos reducidos en producción para las dosis más altas; motivo por el cual, estos autores recomiendan 2.500 kg ha-año⁻¹ del fertilizante empleado para densidades mayores de 4.000 plantas/ha y 2.000 kg ha-año⁻¹ para densidades menores; adicionalmente, sugieren que las dosis por planta deben calcularse de acuerdo a la densidad de siembra. En cuanto al fertilizante empleado (12-12-17-2), aunque carece de vigencia hoy, puede comentarse que con las dosis de 2.000 y 2.500 kg ha-año⁻¹ de éste se estarían aportando cantidades equivalentes a 240 y 300 kg ha-año⁻¹ de N, las cuales se aproximan a las actuales recomendaciones.

En concordancia con lo anterior, se presenta cierta relación entre la densidad de siembra y la dosis requerida de nutrientes, aspecto que ha sido valorado para densidades bajas y medias. En un estudio desarrollado en siete localidades de Colombia, Uribe y Salazar (1981) estudiaron

Sombrío y fertilización

La sombra es otro factor determinante de la productividad de café. En sitios con déficit hídrico prolongado (más de dos a tres meses

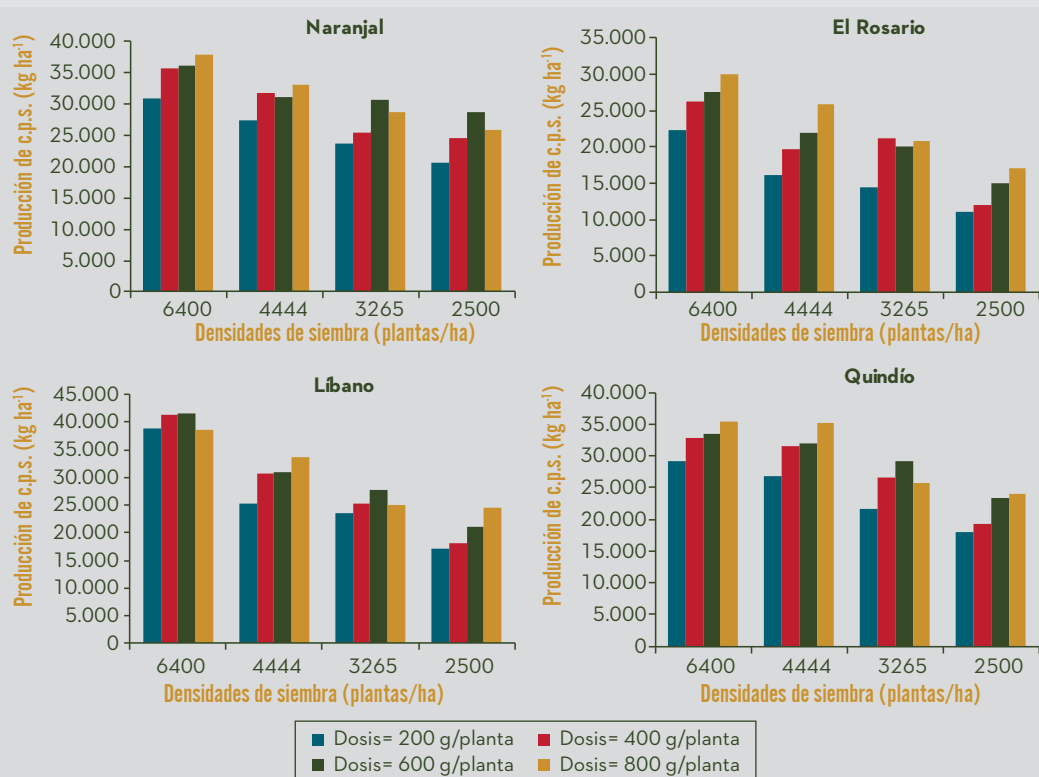


Figura 178. Efecto de la densidad de siembra y dosis de fertilizante en la producción de café pergamino seco (c.p.s.). Tomado de Uribe y Salazar (1981).

continuos durante el año), especialmente en suelos con bajos contenidos de MO y condiciones físicas que limitan la retención de humedad, el establecimiento de árboles que proporcionen sombra ayuda a menguar los efectos de las altas temperaturas y contribuye a la conservación del agua. Pese a lo anterior, un exceso de sombra puede afectar de manera negativa la productividad (Figura 179).

Se ha demostrado que cafetales viejos y bajo sombra densa de guamo (*Inga spp.*), no responden a la fertilización, razón por la cual se advierte que esta práctica resulta antieconómica (Figura 180). Para llegar a la anterior conclusión, se evaluó el efecto de dosis crecientes de un fertilizante del grado 12-6-24 en dos plantaciones establecidas en suelos derivados de cenizas volcánicas (Herrón & Valdés, 1966).

Con el propósito de determinar la necesidad de la fertilización en cultivos de café variedad Borbón con sombrío denso de guamo santafereño (625 árboles/ha), se llevó a cabo

un ensayo en seis localidades de la zona cafetera (Figura 181). Se concluyó que bajo las condiciones de sombra no se justifica aplicar más de 200 g del fertilizante de grado 17-6-18-2 por planta al año, cantidad que equivale a 500 kg ha-año⁻¹.

En siete localidades del departamento de Santander se determinó el efecto de la fertilización química, 0%, 50% y 100% de la recomendación del análisis de suelos, en cafetales jóvenes de variedad Colombia bajo sombra. No se registró efecto de los tratamientos en la producción anual ni en la acumulada de tres cosechas (Figura 182); tampoco se detectaron cambios en el porcentaje de pasilla o la relación de café cereza y café pergamino seco. Se corroboró de nuevo que, el café bajo sombrío no responde a la fertilización.

En un trabajo similar, desarrollado bajo condiciones de la zona cafetera central de Colombia, se evaluó el efecto de la aplicación de cuatro niveles de fertilizante inorgánico (0%, 25%, 50% y 75% de las

Figura 179.

Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en función de la densidad de árboles de guamo como sombrío permanente. Adaptado de Farfán y Mestre (2004).

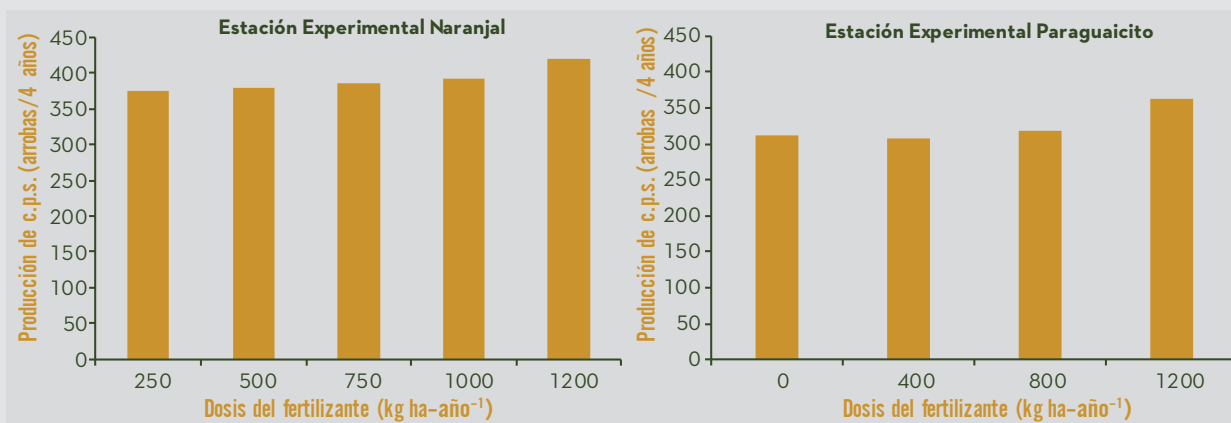
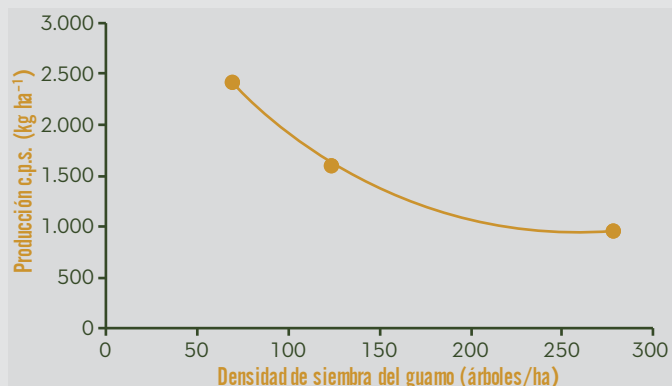


Figura 180.

Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta a la fertilización en plantaciones viejas y bajo sombra. Tomado de Herrón y Valdés (1966).

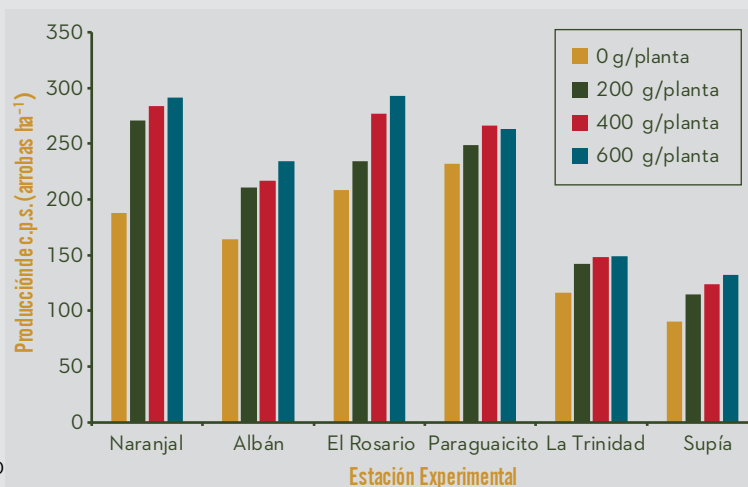


Figura 181.

Producción de café pergamino seco (c.p.s.) en respuesta a la fertilización en cultivos bajo sombrío denso de guamo santafereño. Tomado de Mestre (1996).

dosis recomendadas, según el análisis de suelo) y tres densidades de *Inga edulis* como sombrío (278, 123 y 70 árboles/ha) en la producción de café. En las densidades muy altas y altas de árboles de sombrío (278 y 123, respectivamente), no hubo respuesta a la fertilización, mientras que en el nivel medio (70 árboles/ha) se registró aumento en la producción, siendo iguales los efectos de las dosis empleadas (Figura 183).

Ajuste de la fertilización según densidad de plantas y sombrío

Con base en las investigaciones realizadas por Cenicafe en materia de la fertilización con respecto a la densidad de siembra y nivel de sombra, se sugiere realizar ajustes en las cantidades de los nutrientes con el fin de racionalizar el uso de los fertilizantes (Tabla 62). Para cafetales con altas densidades de siembra, entre 7.500 y 10.000 plantas o ejes/ha, y un nivel de sombra muy bajo, menor de 35%, se sugiere suministrar las máximas dosis recomendadas de los nutrientes, las cuales se toman como **criterio base**. En plantaciones con densidades entre 5.000 y 7.500 plantas/ha, podrán ser suficientes el 85% o el 95% del criterio base, según el nivel de sombra; de igual manera, cuando el número de plantas por hectárea es menor de 5.000, los ajustes incluyen desde dejar de aplicar el elemento en cafetales altamente sombreados, hasta el 85% del criterio base para cultivos con sombrío reducido (menor de 35%).

De acuerdo con los anteriores criterios, y teniendo en cuenta la distribución porcentual de las áreas cultivadas en café, según densidad de siembra y nivel de sombra (Tabla 61), se puede comentar que el país cuenta actualmente con sistemas de producción tecnificados, los cuales pueden llegar a ser más productivos, siempre que reciban el manejo apropiado, en particular con relación a la fertilización.

Manejo de la nutrición con base en el análisis de suelos

La principal herramienta de diagnóstico para el manejo nutricional de las plantas en los diferentes sistemas de producción de café es el análisis del suelo. La interpretación correcta de los resultados de este ayuda a definir la dosis correcta de cada nutriente para condiciones específicas, procedimiento que contribuye al uso racional de los fertilizantes, mejora la rentabilidad y disminuye el impacto negativo sobre el medio ambiente.

En la Tabla 63 se consignan las recomendaciones de N, P, K, Mg y S, según el nivel de sombra y densidad de plantas. En el caso de N, se sugiere aplicar entre 120 y 300 kg ha-año⁻¹, para el K (K₂O) entre 0 y 300 kg ha-año⁻¹, para magnesio (MgO) y P (P₂O₅) entre 0 y 60 kg ha-año⁻¹, y hasta 50 kg ha-año⁻¹ de azufre (S).

En ocasiones, los productores hacen uso del análisis de suelos, pero terminan aplicando

Tabla 62. Factores para ajustar la dosis de nutrientes según el nivel de sombra y la densidad. Tomado de Sadeghian (2008a).

Nivel de sombra	Densidad (plantas/ha)		
	Mayor de 7.500	Entre 5.000 y 7.500	Menor de 5.000
Inferior a 35% (muy bajo)	1,00*	0,95	0,85
Entre 35 y 45% (bajo)		0,85	0,75
Entre 45 y 55% (medio)			0,50
Mayor de 55% (alto)			0

* Criterio base. Corresponde a cafetales con altas densidades y muy bajo sombrío.
Nota: Se deben multiplicar las recomendaciones por el factor de ajuste de cada condición de manejo.



Figura 182.

Producción de café cereza bajo sombra en siete localidades del departamento de Santander, en respuesta a la fertilización, según análisis de suelo. Tomado de Sánchez (2000).

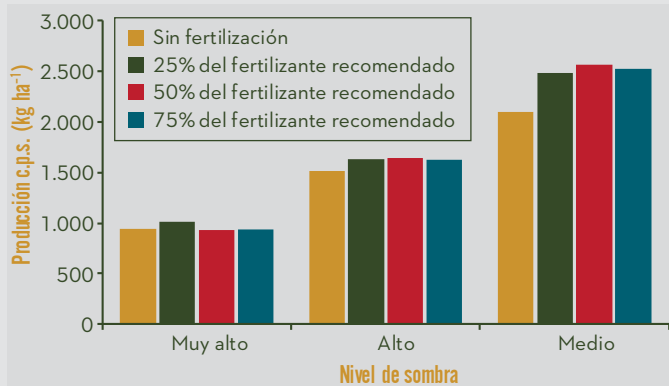
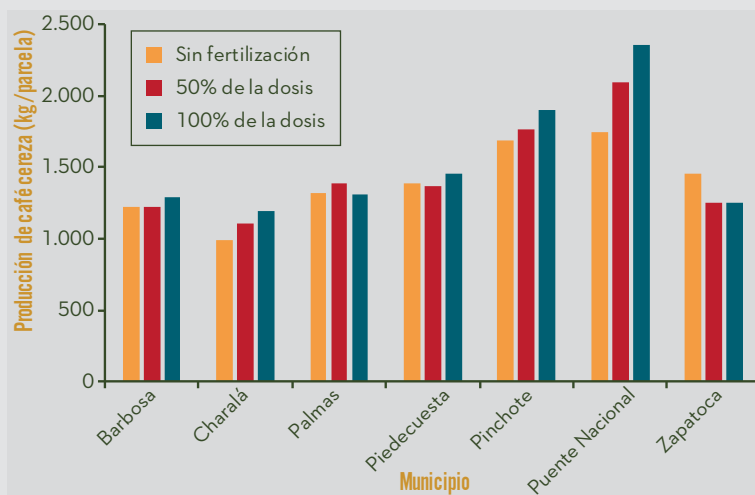


Figura 183.

Producción de café cereza bajo diferentes niveles de sombra, en respuesta a la fertilización, según análisis de suelos. Tomado de Farfán y Mestre (2004).

los planes de fertilización en dosis no mayores de 3 a 4 kg ha-año⁻¹. Para este micronutriente, se consideran como bajos, niveles inferiores a 0,2 mg kg⁻¹ en el suelo. La carencia de zinc es poco frecuente, sin embargo, algunos fertilizantes compuestos lo contienen, en especial los complejos granulados, a través de los cuales se llega a suministrar dosis similares a las del boro.

Con el propósito de sistematizar la interpretación de los análisis de suelos y las respectivas recomendaciones para el manejo de la nutrición de café se desarrolló el programa Siascafé (Sistema de Interpretación de Análisis de Suelos para Café), el cual se encuentra disponible en la página de Cenicafe en el enlace <https://www.cenicafe.org/es/index.php/servicios/siascafe>.

Alternativas generales de fertilización

Cuando los caficultores no disponen de análisis de suelos, se hace necesario implementar alternativas más generalizadas que permitan una nutrición balanceada, de acuerdo a las condiciones predominantes en las diferentes regiones cafeteras del país. Una vía para lograr este propósito es a través de la información disponible de la

fertilizantes compuestos cuya composición no corresponde a las recomendaciones que se derivan de esta herramienta. De conformidad con lo anterior, puede decirse que el beneficio de este análisis se maximiza cuando se aplica la cantidad requerida de cada nutriente mediante fuentes simples de fertilizantes, tales como urea, SAM, DAP, MAP, KCl, sulfato de potasio, óxido de Mg, sulfato de magnesio y yeso.

Dado que en algunas regiones de la zona cafetera se presentan de manera frecuente deficiencias de boro, es posible incluirlo en

Tabla 63.

Dosis recomendadas de macronutrientes para cafetales en la etapa de producción, de acuerdo a los resultados del análisis del suelo, nivel de sombra y densidad de plantas. Adaptado de Sadeghian (2008a).

Resultado del análisis de suelo	Sombrío menor de 35% (Muy bajo)			Sombrío entre 35% y 45% (Bajo)		Sombrío entre 45% y 55% (Medio)
	Densidad (plantas/ha)					
	Mayor a 7.500	Entre 5.000 y 7.500	Menor a 5.000	Entre 5.000 y 7.500	Menor a 5.000	Menor a 5.000
Materia orgánica-MO (%)	Dosis de nitrógeno-N (kg ha-año ⁻¹)					
MO ≤8	300	285	255	255	225	150
8 >MO ≤12	280	266	238	238	210	140
12 >MO ≤16	260	247	221	221	195	130
16 >MO ≤20	240	228	204	204	180	120
MO > 20	260	247	221	221	195	130
Fósforo-P (mg kg ⁻¹)	Dosis de fósforo-P ₂ O ₅ (kg ha-año ⁻¹)					
P ≤10	60	57	51	51	45	30
10 >P ≤20	40	38	34	34	30	20
20 >P ≤30	21	20	18	18	16	10
P >30	0	0	0	0	0	0
Potasio-K (cmol _c kg ⁻¹)	Dosis de potasio-K ₂ O (kg ha-año ⁻¹)					
K ≤0,2	300	285	255	255	225	150
0,2 >K ≤0,4	260	247	221	221	195	130
0,4 >K ≤0,6	180	171	153	153	135	90
0,6 >K ≤0,8	140	133	119	119	105	70
K > 0,8	100	95	85	85	75	0
Magnesio-Mg (cmol _c kg ⁻¹)	Dosis de magnesio-MgO (kg ha-año ⁻¹)					
Mg ≤0,3	60	57	51	51	45	30
0,3 >Mg ≤0,6	40	38	34	34	30	20
0,6 >Mg ≤0,9	15	14	13	13	11	8
Mg >0,9	0	0	0	0	0	0
Azufre-S (mg kg ⁻¹)	Dosis de azufre-S (kg ha-año ⁻¹)					
S ≤6	50	48	43	43	38	25
6 >S ≤12	25	24	22	22	19	13
S >12	0	0	0	0	0	0

fertilidad regional del suelo. Con base en los resultados de 255.019 muestras de suelos analizadas en 20 departamentos cafeteros de Colombia (Tabla 64), Sadeghian y Duque (2018) sugieren las siguientes dos alternativas de dosis y fórmulas de nutrientes para la fertilización de café, una con N, P y K y otra con adición de Mg:

Alternativa	Dosis nutriente (kg ha-año ⁻¹)			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
1	300	50	260	0
2	300	50	260	40
Alternativa	Fórmulas de nutrientes			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
1	6,0	1,0	5,2	0,0
2	6,0	1,0	5,2	0,8

Tabla 64.

Porcentaje (frecuencia) de muestras de suelo en la categoría baja de fertilidad para las propiedades de interés. Tomado de Sadeghian y Duque (2017).

Departamento	Número de muestras	Porcentaje de las muestras de suelo en la categoría baja			
		MO	Fósforo	Potasio*	Magnesio
Antioquia	79.227	56	61	65	47
Boyacá	806	57	70	91	66
Caldas	34.071	44	60	66	43
Caquetá	275	84	86	94	91
Casanare	63	89	60	94	75
Cauca	7.897	33	91	55	44
Cesar	969	71	62	72	26
Chocó	270	29	57	61	27
Cundinamarca	2.628	57	55	75	36
Huila	21.093	74	51	65	25
La Guajira	166	64	23	53	16
Magdalena	1.711	91	64	92	31
Meta	224	76	75	92	82
Nariño	452	75	41	32	17
Norte de Santander	7.101	79	49	80	46
Putumayo	27	89	82	100	100
Quindío	40.999	53	42	57	50
Risaralda	6.152	33	64	56	34
Tolima	25.072	70	50	70	35
Valle del Cauca	25.816	58	82	63	14
No. de departamentos con una frecuencia mayor a 50%		16	16	19	6
Porcentaje de frecuencias mayores de 50% **		80	80	95	25

Con el color gris se resaltan las frecuencias menores del 50%.

* Corresponde a la agrupación de las categorías baja y media.

** (Número de departamentos con una frecuencia mayor a 50% x 100) / Número total de departamentos.

Épocas de fertilización

Una vez seleccionados los fertilizantes, será necesario definir con anterioridad las épocas de su aplicación. Para ello, se debe tener en cuenta aspectos como: la cantidad y la distribución de la lluvia, las épocas fenológicas del cultivo, la cantidad y el tipo del fertilizante, entre otros.

Dado que las raíces de las plantas toman los nutrientes desde la solución del suelo, la cantidad de la lluvia debe ser suficiente para disolver los fertilizantes y mantener niveles adecuados de agua aprovechable para

cubrir los requerimientos de las plantas; es decir, el agua retenida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, generalmente estimada por el contenido de agua retenida con fuerzas desde 0,033 MPa hasta 1,5 Mpa. Además, es necesario recordar que esta “agua” corresponde en realidad a la solución del suelo (fase líquida acuosa y sus solutos), y es la que contiene los minerales requeridos.

En relación con la cantidad anual de la lluvia, es posible establecer las siguientes categorías:

- ♦ Baja: menor de 1.500 mm

- ♦ Media: entre 1.500 y 2.500 mm
- ♦ Alta: entre 2.500 y 3.500 mm
- ♦ Muy alta: mayor de 3.500

Acerca de la distribución anual de la lluvia, se distinguen dos tendencias en Colombia, la primera unimodal, con un pico máximo en el año, y la segunda bimodal, con dos picos máximos en el año. Otro aspecto a tener en cuenta se relaciona con la duración de los períodos de sequía y de lluvia, pues se consideran favorables las condiciones en las que no se presentan espacios prolongados de sequía o tiempos cortos con lluvia excesiva.

Con respecto a las épocas de fertilización, ante condiciones predominantemente secas en regiones con baja lluvia y años “El Niño”, es preferible distribuir los abonos en dos oportunidades, aproximadamente cada seis meses, para las cuales existe una mayor probabilidad de lluvia (Sadeghian et al., 2017). En los sitios donde normalmente ocurre una

alta precipitación o ante condiciones de años “La Niña” en lugares relativamente lluviosos, puede pensarse en tres aplicaciones, más o menos cada cuatro meses, con el fin de reducir los riesgos de la pérdida de nutrientes por lixiviación (lavado o percolación). Incluso, en las regiones que se caracterizan por ser muy lluviosas en los años de condición normal o Neutros (más de 3.500 mm) podrá incrementarse la cantidad de nutrientes en aproximadamente 25%, con el fin de compensar las pérdidas por lixiviación; además, se sugiere no fertilizar en los meses de mayor lluvia. Cuando la distribución de la lluvia es bimodal, las aplicaciones pueden llevarse a acabo al iniciar los períodos de mayor humedad, mientras que, en aquellas zonas caracterizadas por ser unimodales, la primera adición de los abonos debe realizarse con la entrada de las aguas y, la última, dos meses antes de que finalicen las lluvias, según el caso (Figura 184).

Ahora bien, en el sentido amplio puede comentarse que, un momento adecuado para

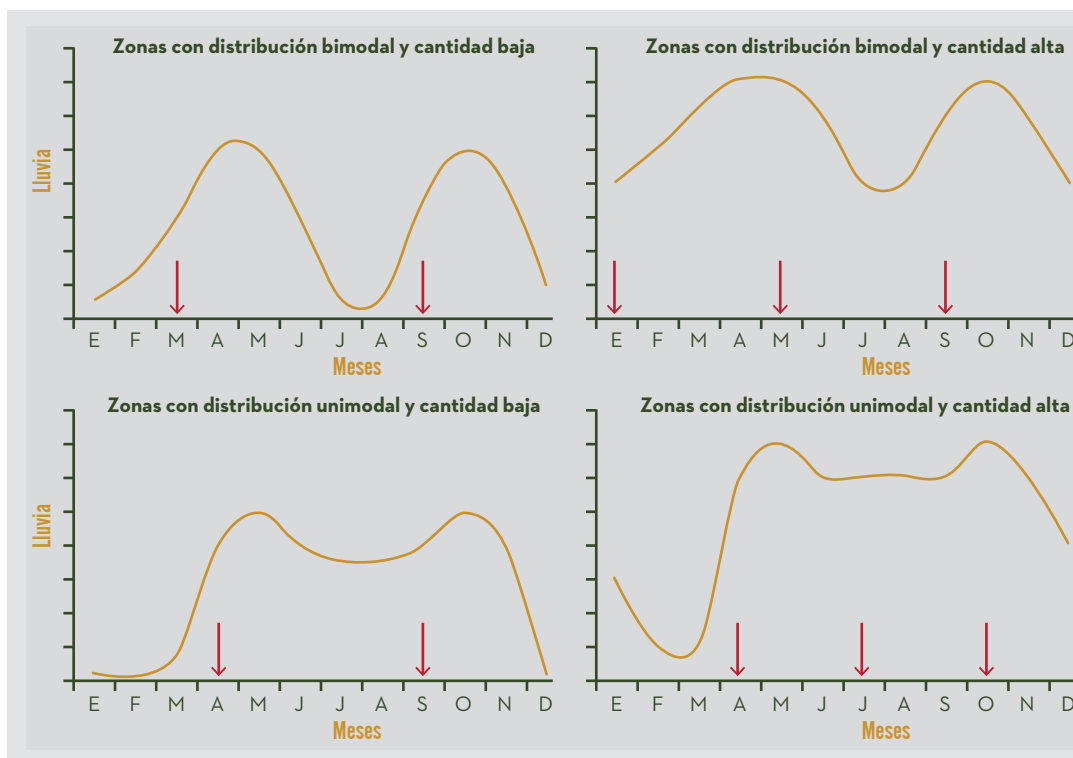


Figura 184. Épocas de fertilización según cantidad y distribución de la lluvia. Las flechas señalan los meses para la ejecución de la labor. Tomado de Sadeghian y Jaramillo (2016).

la aplicación de los abonos es aquel en el cual se cumplen las siguientes dos premisas o condiciones: i) que el suelo se encuentre húmedo en los primeros 5 a 10 cm y ii) que exista una alta probabilidad de que el suelo conserve esta condición durante al menos los próximos dos meses.

En lo que a la cantidad de fertilizantes concierne, cuando la dosis a suministrar es relativamente poca, como ocurre normalmente con el óxido de Mg o DAP, se recomienda que la totalidad del abono se suministre en una sola aplicación al año. En el caso del N, y en la mayoría de las veces del K, puede pensarse en fraccionarlo en dos o tres ocasiones al año. Sobre los micronutrientes, por ejemplo, el boro, a pesar de ser bajas las cantidades a suministrar, son preferibles dos aplicaciones, dadas las implicaciones de generar toxicidad.

En cuanto a la fenología de la planta se ha demostrado que la mayor acumulación de nutrientes en el fruto ocurre entre los dos y seis meses después de la floración (alrededor del 62%) y, en los dos meses antes de la cosecha, se presenta cerca del 25%. Esta condición sugiere que para la formación de los frutos resulta más beneficiosa la fertilización que se realiza durante los primeros dos a tres meses a partir de la floración que aquella que se realiza en los últimos dos meses previos a la recolección. En este punto es necesario recordar que un adecuado plan de nutrición debe satisfacer tanto la demanda del cultivo para la producción del grano como atender los requerimientos que tiene el crecimiento vegetativo (ramas, nudos y hojas) (Sadeghian et al., 2012).

Además de los criterios mencionados, también pueden tenerse en cuenta algunas propiedades físicas y químicas del suelo para definir el fraccionamiento de la fertilización. En suelos arenosos, con restricciones para retener agua y baja CIC, podrá pensarse en un mayor fraccionamiento, siempre y cuando las cantidades de las lluvias sean altas (Sadeghian y Jaramillo, 2016).

Forma de aplicación

La forma más aconsejable de aplicar los fertilizantes es esparciéndolos “al voleo” en el “plato” del árbol, sin quitar la hojarasca. Mediante esta práctica se logran los mismos resultados en producción que otras formas de aplicación, con beneficios económicos en lo concerniente a la mano de obra (Mestre & Salazar, 1989). Cabe resaltar que el plato del árbol debe estar libre de arvenses agresivas.

Manejo de la nutrición en cafetales renovados

Para los cafetales renovados por zoca común, se sugiere iniciar la fertilización luego de tres meses de haber realizado el corte y posterior a la selección de chupones. Nuevas investigaciones señalan que puede llevarse a cabo esta labor a partir de los seis meses, sin que se afecte la producción de la primera cosecha. La poca respuesta a la fertilización en los períodos inmediatamente posteriores al zoqueo se relaciona, en buena medida, con la reducción de la biomasa de las raíces (hasta en 60%), como consecuencia de la eliminación de casi la totalidad de la parte aérea de la planta (Salazar & Sadeghian, 2016).

En el primer año luego de la zoca, es decir, la etapa correspondiente al crecimiento vegetativo, las plantas pueden presentar un crecimiento mayor que las nuevas siembras, especialmente seis meses después de la renovación, razón por la cual las dosis sugeridas son parcialmente mayores que plantaciones renovadas por siembra (Sadeghian, 2008). A partir del segundo año, las cantidades recomendadas corresponden a la etapa de producción.

Tratándose de otros sistemas de renovación, en los cuales la magnitud de la intervención es más baja, por ejemplo las podas calavera y pulmón, se presenta una menor muerte de las raíces (50% o menos, según la intervención), haciendo que la recuperación

de las plantas ocurra de manera más rápida. Ante este horizonte, la absorción de los nutrientes es mayor que en la zoca tradicional y, a causa de ello, se incrementa la probabilidad de respuesta a la fertilización de manera más temprana. Por lo anterior, el manejo nutricional puede iniciarse dos a tres meses después de la renovación, cuando aparezcan las lluvias. En estos sistemas, especialmente la calavera, el desarrollo vegetativo exuberante durante el primer año se traduce en una cosecha considerable en el siguiente año, condición que sugiere las dosis más altas de nutrientes.

Aplicación foliar de nutrientes

Para las condiciones de Colombia, se ha corroborado que las aplicaciones foliares de N, P, K, Mg, B y Fe, conllevan a la absorción de estos nutrientes (Cardona, 1972); pese a ello, no se ha demostrado un efecto benéfico de la aplicación de fertilizantes foliares que contengan estos elementos, como complemento de la fertilización edáfica o en reemplazo de esta, en la producción de café (Salamanca & González, 2020). Por lo anterior, esta práctica no está incluida dentro de las recomendaciones que generan beneficios económicos.

Aspectos económicos de la fertilización

La fertilización, al igual que las demás prácticas agrícolas, debe justificarse desde el ámbito económico. Tanto las sub-dosis como las sobredosis de los nutrientes resultan perjudiciales para la producción potencial de los cultivos y su calidad, con consecuencias en la rentabilidad del negocio a corto y largo plazo.

Para determinar las cantidades necesarias de los fertilizantes se utiliza la información generada a través de la experimentación en

relación con la respuesta de los cultivos a la dosis del nutriente, el precio del fertilizante empleado, el precio del producto (café) y los resultados del análisis de suelos.

Ante niveles altos de un nutriente en el suelo, podrá prescindirse parcial o totalmente de su aplicación, con lo cual se reducen los costos de producción. Cuando los resultados del análisis revelen niveles bajos, será necesario suministrar el nutriente con el fin de mejorar la productividad. En ambos casos, conocer el estado de un nutriente en el suelo contribuye a tomar decisiones más acertadas y se considera una inversión económicamente beneficiosa.

La respuesta de los cultivos al suministro de los nutrientes vía fertilización puede explicarse por la “ley de los rendimientos decrecientes”, propuesta por el alemán E. A. Mitscherlich en 1909. Esta ley sugiere que los aumentos del rendimiento, en respuesta a dosis crecientes de un nutriente mediante la fertilización edáfica, se hacen cada vez menores a medida que se incrementan las cantidades suministradas. Así, las primeras unidades de fertilizante producen una mayor respuesta en el rendimiento que las unidades posteriores (Figura 185). Adicionalmente, el exceso de un nutriente en el suelo llega a reducir el rendimiento de las cosechas; premisa que se conoce como la “ley del máximo”.

Cuando el aumento del rendimiento es igual al costo del fertilizante aplicado, se alcanza la dosis más económica, conocida como el “óptimo económico” (Figura 186). Para el cultivo de café se ha demostrado que generalmente existe poca diferencia entre el “óptimo biológico” (dosis para obtener la máxima producción) y el óptimo económico (dosis para obtener el máximo beneficio económico), ello debido a que la relación entre el precio del fertilizante y el de café es muy pequeña (Duque & Mestre, 2001); situación que normalmente no se observa en la agricultura. Como ejemplo, en la Figura 187 se presentan los óptimos biológicos y económicos, determinados para N y K en dos localidades de la zona cafetera de

Figura 185.

Representación de la ley de los rendimientos decrecientes. Incrementos marginales de la producción (Y) en respuesta a dosis del nutriente (X).

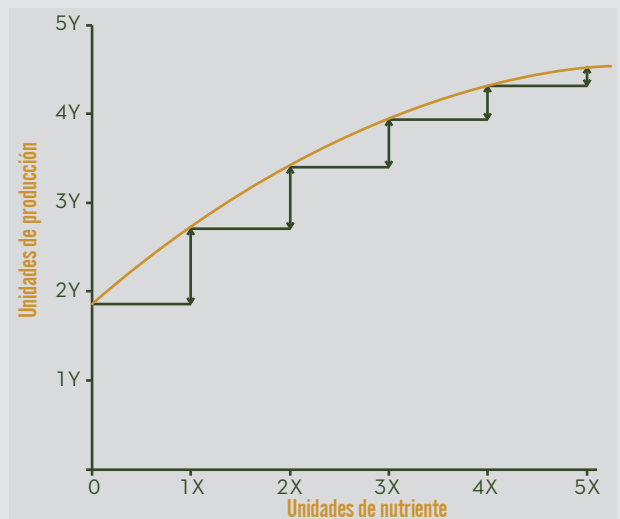
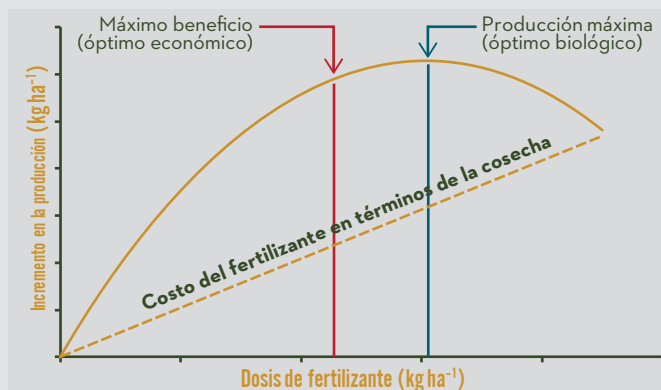


Figura 186.

Representación gráfica de la dosis más económica del fertilizante.



Colombia. Con respecto al N, las dosis óptimas, calculadas a partir de diferentes precios del fertilizante urea y del café (Tabla 65), distan en menos de 20 kg ha-año⁻¹ (281 a 295 kg ha⁻¹ año⁻¹); en cuanto al K, la dosis requerida para alcanzar el óptimo biológico puede variar entre 260 y 270 kg ha-año⁻¹ (Duque & Mestre, 2001; Sadeghian & Álvarez, 2011 ; Sadeghian & Duque, 2021), y las dosis óptimas económicas, al igual que para el N, presentan variaciones menores de 20 kg ha-año⁻¹ (Tabla 66).

Parte importante del éxito de la fertilización tiene que ver con la planificación de la labor en lo relacionado con la cantidad y la calidad de los fertilizantes, así como las épocas de su

aplicación. Cuando los productores no tienen una “hoja de ruta” definida o, en su defecto, no cuentan con los recursos económicos disponibles para la ejecución de esta tarea, afectan la producción actual y la futura, con consecuencias en la rentabilidad de la actividad.

En algunas oportunidades, las formulaciones comerciales de los fertilizantes se ajustan a los requerimientos nutricionales del cultivo. Ante esta condición se justifica el empleo de un fertilizante compuesto, siempre y cuando los costos de estos productos sean competitivos. Las investigaciones desarrolladas por Cenicafé han permitido demostrar que la producción y la calidad de café, obtenidas al aplicar los

Tabla 65.

Dosis óptimas económicas para diferentes precios de café y nitrógeno (N).

Precio urea (saco 50 kg)	Precio del café (arroba)					
	\$ 120.000	\$ 140.000	\$ 160.000	\$ 180.000	\$ 200.000	\$ 220.000
\$ 180.000	282	285	287	289	290	291
\$ 190.000	281	284	286	288	289	290
\$ 200.000	280	283	285	287	289	290
\$ 210.000	279	282	284	286	288	289
\$ 220.000	278	281	284	286	287	289
\$ 230.000	277	280	283	285	287	288
\$ 240.001	275	279	282	284	286	287

Tabla 66.

Dosis óptimas económicas para diferentes precios de café y potasio (K₂O).

Precio KCl (saco 50 kg)	Precio del café (arroba)					
	\$ 120.000	\$ 140.000	\$ 160.000	\$ 180.000	\$ 200.000	\$ 220.000
\$ 180.000	247	251	254	256	258	259
\$ 190.000	246	250	253	255	257	258
\$ 200.000	244	249	252	254	256	258
\$ 210.000	243	247	251	253	255	257
\$ 220.000	242	246	250	252	254	256
\$ 230.000	240	245	248	251	253	255
\$ 240.000	239	244	247	250	253	255

fertilizantes en mezcla física, es igual a la registrada con los complejos granulados. La mayor diferencia entre los dos tipos de productos radica en su costo por hectárea, siendo generalmente mayor en los complejos granulados (Sadeghian et al., 2007).

Fertilización con abonos orgánicos

Dentro de cualquier sistema de producción, bien sea orgánico o inorgánico, tecnificado o tradicional, certificado o no, el empleo de los fertilizantes orgánicos puede traer beneficios en la producción y las propiedades del suelo.

La fertilización con abonos químicos puede sustituirse parcial o totalmente por la fertilización orgánica, sin que se afecte la producción, siempre y cuando se suministren las fuentes apropiadas y las cantidades

requeridas. Adicionalmente, la aplicación de abonos orgánicos puede tener efectos favorables sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En este tema revisten importancia las altas dosis requeridas, la disponibilidad del abono y, por lo tanto, los mayores costos en los que se incurre, tanto del producto como los relacionados con su transporte y aplicación.

La aplicación de pulpa de café descompuesta en dosis de 6 y 12 kg/planta al año puede generar resultados similares en producción que la fertilización química, aun en suelos con altos contenidos de MO (Uribe & Salazar, 1983). Estas cantidades representan entre 25 y 50 t ha-año⁻¹ en cultivos con bajas densidades (menores de 5.000 plantas/ha). Resultados similares se han obtenido con la aplicación de 2 a 3 kg/planta al año de lombrinaza (en base seca) para cafetales a plena exposición solar y con 10.000 plantas/ha (Arcila & Farfán, 2007).



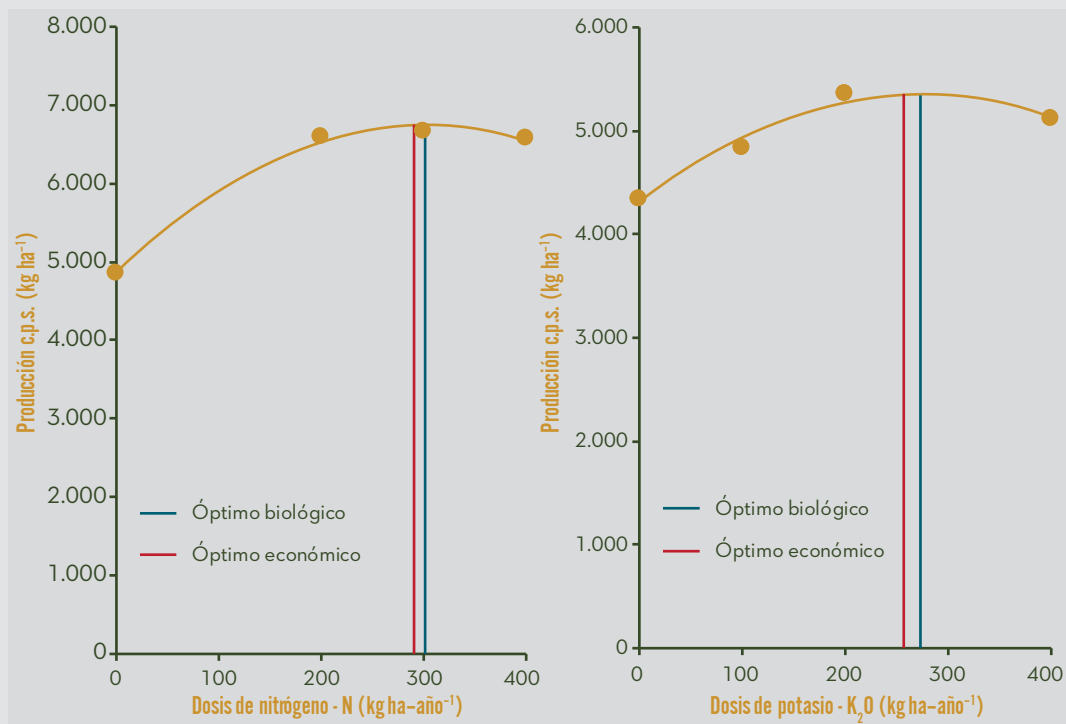


Figura 187.

Óptimos biológicos y económicos determinados para nitrógeno y potasio en dos localidades de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Sadeghian & Duque, (2021).

Fertilizantes





El progreso de cualquier país depende seriamente del desarrollo de su agricultura, el cual debe basarse en el uso sostenible de los recursos. El abono mineral es uno de los descubrimientos más importantes, sino el principal, de la química moderna. El uso adecuado de este mantiene, e incluso aumenta, la fertilidad de los suelos, eleva el rendimiento de las cosechas y llega a mejorar la calidad de los productos agrícolas. Sin embargo, cuando este se utiliza de manera inadecuada, se convierte en un agente muy peligroso que destruye la fertilidad de los suelos, disminuye los rendimientos y deteriora la calidad alimenticia de los productos agrícolas, con efectos graves en la salud de los animales y los hombres (Voisin, 1970).

Definición de fertilizantes

Se considera un fertilizante o abono cualquier producto orgánico o mineral, de origen natural o sintético, que una vez aplicado al suelo suministre a las plantas uno o más de los elementos esenciales para su crecimiento (Weil & Brady, 2017; Soil Science Society of America ([SSSA], 2008). Etimológicamente, el término fertilizante está ligado a la fertilidad y, por lo tanto, se espera que el efecto de su uso se refleje en las propiedades del suelo. Esta consideración excluye, de alguna manera, a la expresión comúnmente empleada **fertilizantes foliares**, cuando se refiere a productos que se aplican al follaje de las plantas para aportar nutrientes.

Aprovechabilidad de los fertilizantes

Los fertilizantes difieren en su composición y aprovechabilidad, término que hace referencia a la capacidad del producto para suministrar el o los nutrientes a través del tiempo, y está relacionada con la solubilidad y la efectividad de la fuente empleada (Guerrero, 2004). Algunos fertilizantes, tales

como nitrato de amonio, urea y sulfato de magnesio, son muy solubles en agua, por esta razón su aprovechabilidad por las plantas ocurre en un tiempo relativamente corto, pero con riesgo de perderse en mayor grado; en cambio otros, como el óxido de magnesio o yeso, son de menor solubilidad y, por lo tanto, sus beneficios se dan a mediano plazo, pero sufren menos pérdidas. La mayoría de los fertilizantes orgánicos presentan una mayor residualidad, siendo la excepción los abonos verdes o de cobertura ricos en N, principalmente leguminosas, como algunos tréboles, alfalfa y mucuna, los cuales se descomponen rápidamente, entregando a los cultivos los nutrientes que contienen.

Contenido nutricional de los fertilizantes

Con relación al contenido nutricional, la concentración porcentual de nitrógeno, azufre y los micronutrientes en los fertilizantes, se expresan comúnmente en su forma elemental (N, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo y Ni), en tanto que el fósforo, potasio, calcio y magnesio como óxidos (P_2O_5 , K_2O , CaO y MgO , respectivamente). Las anteriores expresiones no se relacionan necesariamente con las formas químicas de estos elementos en los fertilizantes; por ejemplo, el N presente en la urea se encuentra en forma de $CO(NH_2)_2$, el sulfato de amonio como $(NH_4)_2SO_4$ y nitrato de amonio como NH_4NO_3 . Con respecto al K, aunque puede estar unido a los iones cloruro (KCl), sulfato (K_2SO_4) o nitrato (KNO_3), entre otros, se expresa en términos de K_2O , sin que esa sea su forma química en los fertilizantes. Una situación similar ocurre con Mg, pues siendo las formas más comunes sulfato, carbonato, nitrato y óxido ($MgSO_4$, $MgCO_3$, $MgNO_3$ y MgO , respectivamente), es expresado como MgO .

A veces, la cantidad de los elementos contenidos en los fertilizantes se expresa como el porcentaje **total**, el cual hace referencia a

todas las formas de los elementos presentes en el producto, tanto las aprovechables por las plantas a corto tiempo como las aprovechables a mediano y largo plazo. Por regla general, las fracciones solubles en agua sugieren una alta aprovechabilidad a corto tiempo. En cuanto al N, las fracciones nítricas (NO_3^-) y amoniacales (NH_4^+) pueden estar disponibles rápidamente, no necesariamente así las orgánicas. Las formas asimilables de P son las solubles en agua y en ácidos débiles, por lo general citrato de amonio neutro, las cuales pueden representar sólo una fracción del total, valorada mediante el empleo de extractantes más fuertes, principalmente ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico (HNO_3). La expresión **soluble en HCl**, comúnmente empleado para Ca y Mg, no corresponde necesariamente a las formas aprovechables por las raíces en períodos cortos de tiempo; en este sentido, altos contenidos de Ca y Mg soluble en HCl pueden indicar una elevada presencia de carbonatos, óxidos, hidróxidos y/o silicatos de Ca y Mg, composición que corresponde más a una enmienda que a un fertilizante.

Grado de los fertilizantes

El grado del fertilizante hace alusión al contenido nutricional del producto, expresado en porcentaje (peso). Al respecto, la norma internacional establece que los primeros tres números corresponden en su orden al porcentaje de N, P_2O_5 y K_2O . Por ejemplo, el fertilizante 26-4-22 contiene 26% de N, 4% de P_2O_5 y 22% de K_2O . En este orden, el grado de la urea es 46-0-0, el del cloruro de potasio (KCl) es 0-60-0, y el del fosfato diamónico (DAP) es 18-46-0. En Colombia, se acepta que en la etiqueta del producto se incluyan hasta cuatro números; para tal caso, el porcentaje del cuarto nutriente se especifica entre paréntesis, por ejemplo:

- ♦ 21-0-0-24(S): Sulfato de amonio [$(NH_4)_2SO_4$]
- ♦ 0-0-22-18(MgO): Sulfato de potasio y magnesio ($K_2SO_4 \cdot 2MgO$ SO_4)

En la ficha técnica de cada fertilizante y en la información impresa en el saco de este, denominada “**composición garantizada**”, se encuentran más detalles acerca del contenido nutricional y las formas de los elementos presentes. A continuación, se da un ejemplo para el grado 26-4-22-3(MgO):

Nitrógeno (N)	
Total	26,0%
Ureico	25,0%
Amoniacal	1,0%
Fósforo asimilable (P_2O_5)	4,0%
Potasio soluble en agua (K_2O)	22,0%
Magnesio (MgO)	3,0%
Azúfre total (S)	4,0%

La fórmula de nutrientes de los fertilizantes

Se refiere a las proporciones relativas de los nutrientes contenidos en un fertilizante (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación & Asociación Internacional de la Industria de los fertilizantes, 2002). En este orden de ideas, el grado 25-5-25 tiene una razón 5:1:5 de $N-P_2O_5-K_2O$ y el grado 10-30-10 una razón 1:3:1. Ahora bien, dos o más fertilizantes pueden tener una fórmula igual o similar, pero diferentes grados; son ejemplos de esta situación 14-14-14, 15-15-15 y 18-18-18. Aunque los tres grados tienen una misma fórmula (1:1:1), sus concentraciones de nutrientes son diferentes. Para decidir cuál es el más conveniente, es necesario tener en cuenta aspectos como: la calidad de las materias primas, la disponibilidad del producto en el mercado y el costo de cada uno, entre otros.

Con respecto al costo, es pertinente aclarar que el precio por saco no debe ser el indicador económico para la selección del fertilizante

sino el costo total por hectárea, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Costo total del fertilizante } (\$ \text{ ha}^{-1}) = \text{Cantidad del fertilizante } (\text{kg ha}^{-1}) \times \text{Precio del fertilizante } (\$ \text{ kg}^{-1})$$

Fertilizantes minerales

Están representados principalmente por compuestos inorgánicos, de origen industrial, que se adicionan al medio en el que se cultiva la planta para proporcionar determinados nutrientes (Curi et al., 1993). Se consideran excepciones del mencionado, los compuestos orgánicos (los que contienen C), sintéticos o artificiales, como la urea- $CO(NH_2)_2$ y aquellos en forma de quelato (Alcarde, 2007). Entre los fertilizantes minerales se incluyen tanto los productos manufacturados que involucran procesos industriales con reacciones químicas, como las fuentes naturales que simplemente se refinan, por ejemplo, KCl (Guerrero, 2004). La presentación de los fertilizantes minerales sólidos es variada; según el proceso de fabricación, sus partículas pueden ser de diferentes tamaños y formas como gránulos, píldoras, perlas, cristales y polvo de grano grueso o fino.

Los fertilizantes minerales pueden ser simples o compuestos; a su vez, estos últimos se subdividen en dos clases: mixtos y complejos.

Fertilizantes simples

Son aquellos que contienen solo uno de los tres nutrientes primarios (NPK); por ejemplo, urea, nitrato de amonio, sulfato de amonio (SAM), KCl, sulfato de potasio o superfosfato triple (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación & Asociación Internacional de la Industria de los fertilizantes, 2002; Guerrero, 2004). La anterior definición no dejaría lugar a los fertilizantes que contienen elementos secundarios o menores, compuestos de un solo elemento, tales como el óxido de Mg y bórax.



Alcarde (2007) dista de la anterior definición, sugiriendo que un fertilizante simple es aquel constituido de un compuesto químico, el cual puede contener uno o más nutrientes, tanto macro como micronutrientes, o ambos. Por ejemplo, urea, nitrato de amonio, SAM, KCl, sulfato de potasio, fosfato monoamónico (MAP), DAP, bórax y sulfato de zinc. En la Tabla 67 se incluyen algunos fertilizantes simples de uso común en Colombia. Pueden notarse ciertas variaciones en los contenidos de los elementos según la pureza de la materia prima y el proceso de la fabricación, por ejemplo, es posible que el contenido de MgO en el óxido de Mg varíe entre 55% y 88%.

Fertilizantes compuestos

Cuando los fertilizantes contienen más de un macronutriente primario, se consideran compuestos. Estos, a su vez, se agrupan en las siguientes categorías:

Mixtos

También conocidos como fertilizantes mezclados, resultan de la mezcla física de dos o más productos. Por ejemplo, es posible obtener el grado 23-4-22-3 a partir de urea, MAP, KCl y sulfato de Mg.

Un aspecto determinante de la calidad física de los fertilizantes mezclados consiste en la homogeneidad del tamaño de sus partículas individuales, pues ante una desuniformidad, estas tienden a separarse durante su manejo, transporte y almacenamiento, problema que se conoce como segregación. Por ejemplo, el tamaño del gránulo de la urea, el DAP y el KCl es relativamente similar, por lo tanto, no presentan mayores problemas por su tamaño para mezclarse; caso contrario ocurre con el óxido de Mg, cuyas partículas son más finas y pesadas, razón por la que tienden a migrar hacia abajo; es por ello que no se sugiere mezclar este abono con los anteriores.

Complejos

También se denominan complejos granulados y resultan de reacciones químicas de materias

primas en que se forman dos o más compuestos químicos. A diferencia de las mezclas físicas, cada gránulo de estos presenta igual o similar composición química. Por lo general son fuentes de N, P y K, y en ocasiones contienen macronutrientes secundarios, principalmente Mg y S, y micronutrientes. Son ejemplos representativos de los fertilizantes de esta categoría 15-15-15, 10-30-10 y 17-6-18-2 (MgO); este último de uso frecuente en la caficultura colombiana.

Pese a las ventajas comparativas que se derivan de la mezcla física de los fertilizantes —principalmente el costo—, muchos agricultores prefieren los de tipo complejo, bien sea porque no requieren mano de obra adicional para su mezcla o debido a que creen obtener así rendimientos más altos. Las investigaciones desarrolladas por Cenicafé han demostrado que la producción y la calidad de café son similares cuando se emplean cualquiera de estos fertilizantes; en este caso, lo fundamental consiste en proporcionar los nutrientes que requiere el cultivo en forma balanceada, mediante materias primas de buena calidad (Sadeghian et al., 2007a). Lo dicho no descarta la posibilidad del efecto de algunas fuentes en casos particulares, por ejemplo, la acidificación que se genera con SAM o el poder alcalinizante del óxido de Mg.

Equivalente de acidez o basicidad residual

La aplicación de los fertilizantes puede cambiar el pH del suelo; de allí la importancia de conocer el grado de acidez o basicidad que estos generan. La acidez residual, también conocida como acidez potencial o equivalente, indica la cantidad de carbonato de calcio (CaCO_3), en kilogramos, necesaria para neutralizar la acidez que se genera al aplicar 100 kg de un fertilizante; cifra que se conoce como **índice de acidez residual**, y a la cual se antepone el signo menos (-). En el mismo sentido, la basicidad residual indica los kilogramos de CaCO_3 requeridos para generar un nivel de alcalinidad equivalente

Tabla 67.
 Contenido nutricional (%) de algunos fertilizantes de uso común en Colombia. Tomado de Alcarde (2007) y Havlin et al. (2017).

Fertilizante	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	S
Urea	45 - 46					
Sulfato de amonio (SAM)	21					24
Nitrato de amonio	28 - 34					
Nitrato de potasio	13		44	0,5	0,5	0,2
Nitrato de calcio	15			9 - 34		
Nitrato de magnesio	11				15	
Fosfato diamónico (DAP)	18	46 - 54				
Fosfato monoamónico (MAP)	11	48 - 55		2	0,5	1 - 3
Cloruro de potasio (KCl)			60 - 62			
Sulfato de potasio			48 - 52			15 - 18
Sulfato de potasio y magnesio (langbeinita)			22		18	22
Sulfato de calcio				17 - 24		14 - 19
Sulfato de magnesio (kieserita)					10 - 25	13 - 20
Óxido de magnesio					55 - 88	
Carbonato de magnesio					25 - 27	
Azufre elemental						90 - 100

al que ocasiona la aplicación de 100 kg del fertilizante, cifra que constituye el **índice de basicidad residual** y se le antepone el signo más (+). En el caso de que el fertilizante no genere acidez ni basicidad, se considera que el producto posee un residuo neutro y se indica con cero (0) (Tabla 68). Los fertilizantes que contienen amonio (NH₄⁺) o aquellos que lo generan, tales como sulfato de amonio, fosfatos de amonio, nitrato de amonio y urea, dejan en el suelo un residuo ácido, el cual resulta en el proceso de la nitrificación del amonio. Al respecto, cabe aclarar que los fertilizantes complejos contienen amonio y, en consecuencia, también generan acidez; en contraste, el nitrato y el cloruro de potasio, así como los sulfatos de Ca, Mg y K son de residualidad neutra.

Índice de salinidad de los fertilizantes

Por su naturaleza, los fertilizantes son sales y, en razón de ello, el exceso de estos en la solución del suelo llega a causar daño a las plantas, en especial cuando se aplican de

manera localizada durante los períodos secos y en las primeras etapas del cultivo (Figura 188). El indicador que se emplea para este caso es el **índice de salinidad**, el cual se refiere al grado en que una cantidad determinada del abono llega a incrementar la presión osmótica de la solución del suelo, en comparación con el aumento que ocasiona la aplicación de una cantidad igual de nitrato de sodio (Tabla 68).

En razón de su naturaleza salina, los fertilizantes solubles se humedecen al entrar en contacto con el aire atmosférico, especialmente si este tiene altos niveles de humedad; debido a ello es necesario que las mezclas físicas obtenidas en la finca se apliquen en el menor tiempo posible luego de su preparación, por ejemplo, uno o dos días.

Consideraciones acerca de algunos fertilizantes minerales

A continuación, se presenta información resumida por Sadeghian y Duque (2019), acerca de los fertilizantes minerales de uso frecuente en





Figura 188.
Síntomas de toxicidad generados por la aplicación de fertilizantes durante períodos secos. Tomado de Sadeghian et al. (2017).

Tabla 68.
Equivalentes de acidez o basicidad residual e índices de salinidad de algunos fertilizantes y enmiendas. Adaptado de Alcarde (2007), Guerrero (2004) y Havlin et al. (2017).

Fertilizante/enmienda	Equivalente de acidez (-) o basicidad (+) residual (kg de CaCO_3 /100 de fertilizante)	Índice de salinidad ($\text{NaNO}_3 = 100$)
Urea	-84	76
Sulfato de amonio	-112	69
Nitrato de amonio	-63	105
Nitrato de potasio	0	40
Fosfato diamónico (DAP)	-64	34
Fosfato monoamónico (MAP)	-65	30
Cloruro de potasio	0	116
Sulfato de potasio	0	46
Sulfato de potasio y magnesio	0	43
Sulfato de calcio	0	8
Sulfato de magnesio	0	-
Cales calcínicas	+80 a +95	5
Cales dolomíticas	+90 a +100	1

Colombia y algunas consideraciones para su empleo en los sistemas de producción de café.

- ♦ **Urea $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$.** Es el fertilizante con mayor concentración de N (46%) y comúnmente la fuente más económica del elemento, razón que lo convierte en una excelente opción para satisfacer los requerimientos de los cultivos. En los días siguientes a su aplicación, una fracción de N se pierde por volatilización; proceso que puede reducirse al aplicar este fertilizante en épocas lluviosas y de forma dispersa (“al voleo”). Casi la totalidad de la urea se aprovecha por las plantas como nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+), y solo una pequeña parte se absorbe en forma de urea- $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$. La producción que se obtiene con el suministro de urea, así como la calidad del café, es igual a la que se logran con otras formas del elemento en los fertilizantes complejos, por ejemplo, el nitrato de amonio.
- ♦ **Sulfato de amonio-SAM $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$.** Es una fuente alternativa de N (21%) y S (24%). En razón de su poder para acidificar el suelo (por el contenido de amonio), resulta particularmente útil en suelos básicos para el café ($\text{pH} > 6,0$).
- ♦ **Nitrato de calcio $[(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2)]$.** La importancia de este fertilizante, con 15% de N y 26% de CaO aproximadamente, radica fundamentalmente en su contenido de Ca; sin embargo, las investigaciones desarrolladas por Cenicafé no revelan efecto de este en la producción ni en la calidad del café, cuando se emplea en suelos con bajos niveles de Ca, razón por la cual no se recomienda actualmente. Cabe resaltar que las pérdidas por lixiviación del ion nitrato (NO_3^-) son más altas con respecto al ion amonio (NH_4^+), aspecto que afecta su eficiencia.
- ♦ **Fosfato diamónico-DAP $[(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4]$.** Se obtiene a partir de la roca fosfórica, azufre y amoníaco. Con 46% de P_2O_5 y 18% de N, es el fertilizante fosfórico de mayor uso en el mundo, pues presenta una alta

solubilidad y buenas propiedades físicas. Su disolución en el suelo aumenta el pH alrededor de los gránulos por un corto tiempo, cuando se inicia la nitrificación del amonio. Las diferencias entre DAP y MAP ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), con 52% de P_2O_5 y 10% de N, son pocas; de allí que su efecto en el crecimiento de las plantas es igual.

- ♦ **Escorias Thomas.** Corresponde a un subproducto de la industria del acero con 9% de P_2O_5 soluble y 40% de CaO . En lotes con bajos contenidos de P debe suministrarse en dosis relativamente altas, para cubrir los requerimientos del cultivo de café (más de 500 kg ha-año⁻¹) en comparación con fuentes como DAP, lo que aumenta los costos de transporte y aplicación. La Escoria Thomas presenta poder para neutralizar la acidez del suelo, por lo tanto, puede considerarse una enmienda antes que un abono, sin embargo, no se recomienda, debido a que en la actualidad es más económico un plan de manejo a base de fertilizantes fosfóricos solubles y control de la acidez con cal dolomítica.
- ♦ **Rocas fosfóricas.** En algunas regiones de Colombia, principalmente Norte de Santander, Boyacá y Huila, se encuentran rocas que contienen entre 20% y 30% de P (P_2O_5) total. Estas se muelen y se comercializan como abono fosfórico; sin embargo, el porcentaje de P soluble que las caracteriza es bajo. Investigaciones recientes demuestran que el efecto de estos productos como fuentes de P en las etapas de almácigo y levante de café, no es significativo; además, estas poseen una reducida capacidad correctiva de la acidez (Díaz-Poveda & Sadeghian, 2020). Las rocas fosfóricas también son tratadas con ácido sulfúrico para aumentar la disponibilidad del P (cerca del 10% de P soluble); a pesar de ello, el precio por unidad del nutriente es generalmente mayor que en los fertilizantes como DAP o MAP, por lo tanto, actualmente no se sugiere incluirlas en los planes de nutrición de café.

- ♦ **Cloruro de potasio (KCl).** Dada su alta concentración de K (60% de K_2O) y efecto en la producción y calidad de café, se considera una buena alternativa; además, su precio es menor frente a otras fuentes como el nitrato o sulfato de potasio, las cuales no han exhibido ventajas con respecto al KCl.
- ♦ **Kieserita ($MgSO_4 \cdot H_2O$).** Corresponde a un sulfato de magnesio monohidratado, proveniente de yacimientos marinos. Contiene 25% de MgO y 20% de S y, por su solubilidad, puede ser de rápido aprovechamiento por las plantas, sin que su persistencia en el suelo a través del tiempo sea alta.
- ♦ **Óxido de magnesio (MgO).** La composición de este fertilizante depende de las características de los yacimientos minerales de donde se extrae, los cuales, según la riqueza pueden contener hasta 90% de MgO . Es considerado una excelente alternativa como correctivo de la acidez del suelo y, en razón de su baja solubilidad, persiste más a través de tiempo que otras fuentes.
- ♦ **Silicatos de magnesio.** Corresponden a rocas (principalmente serpentinitas) que se muelen y, en ocasiones, se granulan. El beneficio de su uso en café es cuestionado, aspecto que se relaciona tanto con los beneficios de silicio como con la aprovechabilidad del Mg , debido a la baja solubilidad de la fuente. En razón de lo anterior, no se recomienda su uso.
- ♦ **Dolomita acidulada.** Cuando se adiciona ácido sulfúrico a la cal dolomítica, se forman sulfatos de Ca y Mg , siendo de mayor interés como fertilizante el sulfato de Mg . La cantidad final de estos compuestos depende del volumen del ácido empleado. Los productos que actualmente se comercializan en el país solo contienen 30% de sulfatos de Ca y Mg , es decir, que el restante 70% se conserva como dolomita, razón por la cual su valor como fertilizante soluble es bajo, especialmente en lo que al Mg se refiere. Otra alternativa que se ofrece en el mercado

nacional surge de aplicar ácido fosfórico a la dolomita, proceso a través del cual se forman fosfato de Ca y Mg . En los dos casos, por lo general resulta más económico emplear fuentes con mayor concentración, tales como kieserita, sulfatos de calcio (yeso agrícola) y fertilizantes con alto contenido de fósforo soluble.

Fertilizantes minerales para café

Se recomienda que los planes de fertilización de café, tanto para la etapa de levante como producción, se definan de acuerdo con los resultados del análisis de suelos, para lo cual es conveniente emplear fuentes simples, pues así se llega a suministrar lo necesario en forma balanceada, sin incurrir en costos adicionales. Cuando no se dispone de análisis de suelos, pueden emplearse fuentes simples o compuestos, como se indica a continuación para las dos etapas del cultivo:

Etapas de levante

Se sugiere incluir al N en tres o cuatro aplicaciones anuales y el P en dos oportunidades, a partir del establecimiento de la plantación; entre tanto, el suministro de K y Mg puede iniciarse luego del primer semestre (Sadeghian, 2008). Debido a que, durante esta etapa del cultivo, los planes de fertilización se modifican entre una aplicación y otra, se sugiere emplear fuentes como urea, DAP, MAP, KCl, óxido de Mg y kieserita en lugar de fertilizantes compuestos con N, P y K.

Etapas de producción

Durante esta etapa, las cantidades requeridas de N y K (K_2O) son, por lo general, cinco a seis veces mayores que las del P (P_2O_5), Mg (MgO) y S. En concordancia con lo anterior y con base en la información de la fertilidad del suelo en la zona cafetera de Colombia, Sadeghian y Duque (2017) recomiendan dos alternativas de dosis y fórmulas de nutrientes, para casos en los cuales no se cuenta con los resultados

de análisis de suelos. Estas se diferencian en sus contenidos de Mg:

Alternativa	Dosis nutriente (kg ha-año ⁻¹)*			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
1	300	50	260	0
2	300	50	260	40
Alternativa	Fórmula de nutrientes			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
1	6,0	1,0	5,2	0,0
2	6,0	1,0	5,2	0,8

* Sugerida para plantaciones con altas densidades de siembra (más de 7.500 plantas/ha) y niveles bajos de sombra (menor de 35%).

Las anteriores fórmulas pueden obtenerse a partir de la mezcla de fertilizantes simples, bien sea que se preparen en la finca o se adquieran ya mezclados. Otra alternativa consiste en el uso de fertilizantes complejos, particularmente aquellos cuya fórmula de nutrientes se aproxime a las relaciones sugeridas, es decir 6:1:5 (NPK) o 6:1:5:1 (NPKMg). En el sentido práctico, para la selección de los fertilizantes compuestos, se puede tener cierta flexibilidad con relación a las anteriores relaciones; sin embargo, conforme se emplean fórmulas distintas, tales como 1:3:1, 1:2:1, 1:1:1, 2:1:2 y 4:1:6, se generan desbalances nutricionales que afectan negativamente la productividad y la rentabilidad.

Cuando se refieren a **“fórmulas de nutrientes para café”** o **“grados de fertilizantes para café”**, se hace alusión a **las alternativas que se pueden emplear de manera continuada en los sistemas de producción de café para que se obtengan buenas cosechas**. En el ámbito de esta consideración, no tendrían cabida y, por lo tanto, no deben recomendarse los abonos diseñados para otros cultivos, tales como maíz, banano, plátano, pastos y palma de aceite. Son ejemplos de lo anterior 15-15-15, 18-18-18, 19-9-19, 20-10-20, 10-30-10, 15-4-25 y 15-9-20 (Sadeghian & Duque, 2019).

Con respecto a los micronutrientes, en ocasiones se presentan deficiencias de boro y

con menor frecuencia deficiencias de zinc. Ante estas condiciones pueden emplearse dosis equivalentes a 3,0 kg ha-año⁻¹, fraccionados en dos aplicaciones durante el año. Para cubrir la demanda de estos elementos podrán emplearse fuentes como bórax y sulfato de zinc; adicionalmente, algunos fertilizantes compuestos los contienen en cantidades suficientes.

Fertilizantes orgánicos

Corresponden a compuestos orgánicos, bien sea de origen vegetal o animal, que contienen suficiente cantidad de macro y micronutrientes para ser valorados como fertilizantes (más del 5%). En las fincas cafeteras, la principal fuente orgánica es la pulpa fresca de café, debido a que en el proceso de la obtención de 1.250 kg de café pergamino seco (c.p.s.), equivalentes a 100 arrobas, se generan cerca de 2.700 kg de este material orgánico. La composición elemental de la pulpa presenta algunas variaciones, de acuerdo a la localidad y el manejo de la plantación; al respecto, Sadeghian et al. (2006) encontraron los siguientes valores promedios para cinco muestras de pulpa fresca analizadas: 1,71% de N, 0,10% de P, 3,30% de K, 0,26% de Ca, 0,08% de Mg, 0,02% de S, 42,98 mg kg⁻¹ de Fe, 24,30 mg kg⁻¹ de Mn, 6,58 mg kg⁻¹ de Zn, 24,10 mg kg⁻¹ de Cu y 51,87 mg kg⁻¹ de B. De acuerdo con estos valores y teniendo en cuenta que el 47% de los elementos extraídos por los frutos de café en la cosecha se encuentran en la pulpa, puede afirmarse que la pulpa generada en el proceso de la producción de 100 arrobas de c.p.s. contiene 10,2 kg de N, 1,4 kg de P₂O₅, 23,8 kg de K₂O, 2,2 kg de CaO, 0,8 kg de MgO y 0,4 kg de SO₄ (Sadeghian et al., 2007b).

Es posible descomponer la pulpa fresca a través de volteos permanentes o mediante el empleo de la lombriz roja. En el proceso de la descomposición de la pulpa por la lombriz roja californiana, la masa inicial del material se reduce a una tercera parte (Dávila y Ramírez, 1996), y ocurren cambios químicos importantes que determinan la



calidad del abono resultante (Tabla 69), entre los que se encuentran: el incremento del pH y los contenidos de la proteína, la fibra y los elementos mayores y menores, mientras que se reducen las grasas, el carbono orgánico, los carbohidratos solubles y la relación C/N (Blandón et al., 1999).

Otros abonos orgánicos de importancia, según las actividades agropecuarias que se desarrollan en cada región y finca, entre otras son: la gallinaza, la pollinaza, la porquinaza, la bovinaza y la cenichaza (mezcla de ceniza y cachaza, que resulta del proceso de la fabricación del azúcar), las cuales se presentan en las Tablas 70 y 71. Las propiedades químicas de los anteriores abonos también pueden presentar diferencias frente a los reportados en la literatura, lo cual se relaciona con las

variaciones en las condiciones agroclimáticas predominantes de la zona, en donde se obtienen las materias primas (principalmente clima y suelo), el manejo de las plantaciones y de los animales, y el proceso de la descomposición o del compostaje.

La mayoría de los abonos se caracterizan por presentar una acidez próxima a la neutralidad (pH cercano a 7,0), son más ricos en N y K que otros elementos, como repuesta a la composición natural de los tejidos vegetales, y en ocasiones contienen altos niveles de Ca, debido a la adición de cales, principalmente para la desinfección de las “camas” de las aves.

Un aspecto relevante para su valoración es la humedad del producto, ya que la concentración de los nutrientes está dada en base seca; por

Tabla 69.
Propiedades físicas y químicas de pulpa de café sola y mezclada con mucílago, en tres etapas del proceso de descomposición. Tomado de Blandón et al. (1999).

Determinación	Pulpa de café sola			Pulpa de café mezclada con mucílago		
	Fresca	Pulpa de dos meses*	Lombrinaza**	Fresca	Pulpa de dos meses*	Lombrinaza**
Humedad (%)	74,83	79,60	78,05	87,90	83,33	79,48
pH	4,40	8,25	8,63	4,13	7,08	9,33
Cenizas (%)	6,66	14,68	44,06	7,30	10,17	50,21
Grasas (%)	1,60	1,49	0,16	2,00	1,82	0,20
Proteína (%)	11,00	19,91	23,25	12,11	18,14	25,89
Fibra (%)	11,43	29,47	12,55	17,16	25,04	16,84
CHO solubles (%)	69,31	34,47	20,00	61,44	44,83	6,86
MO (%)***	93,34	85,33	55,94	92,70	89,83	49,79
N (%)	1,76	3,19	3,72	1,94	2,90	4,14
C/N	30,72	15,55	8,73	27,95	18,60	6,98
P (%)	0,13	0,23	0,44	0,13	0,18	0,31
K (%)	2,82	6,55	9,64	2,75	3,79	5,50
Ca (%)	0,32	0,75	1,15	0,37	0,75	1,30
Mg (%)	0,08	0,18	0,21	0,11	0,18	0,25
Fe (mg kg ⁻¹)	158,75	1.575,00	3.062,50	700,00	1.170,00	2.201,67
Mn (mg kg ⁻¹)	69,00	95,50	163,33	43,00	96,50	179,83
Zn (mg kg ⁻¹)	8,25	76,00	149,17	45,75	83,50	118,67
Cu (mg kg ⁻¹)	9,75	15,00	6,92	17,75	17,00	7,33
B (mg kg ⁻¹)	21,75	45,00	73,67	18,75	38,00	67,08

* Pulpa apilada durante dos meses, antes de ser llevada a los lombricultivos. Correspondió a una pila de 600 kg, sin volteos.

** Con un tiempo de dos meses. Peso final 182 kg.

*** Materia orgánica. Diferencia entre materia seca (%) y cenizas (%).

Tabla 70.
Propiedades de algunos abonos orgánicos analizados en el laboratorio de suelos de Cenicafé.

Referencia	pH	N	P	K	Ca	Mg	Cenizas	Humedad
	(%)							
Pulpa descompuesta	5,9	2,99	0,19	2,52	1,74	0,40	19	58
Lombrinaza	6,6	2,62	0,41	2,08	1,81	0,40	43	61
Gallinaza	8,4	1,49	1,81	2,21	12,28	0,88	45	18
Pollinaza	8,7	2,07	2,20	3,03	5,80	0,91	37	39
Bovinaza	8,0	1,53	0,69	1,96	1,93	0,81	53	39
Porquinaza	SD	2,21	1,65	1,15	5,40	1,00	30	SD
Bocashi	7,9	1,31	1,04	0,97	4,02	0,79	64	41

SD: Sin dato. Tomado de Sadeghian (2010).

ejemplo, el N aportado por 100 kg de gallinaza de la Tabla 69 es mayor que el N aportado por otros abonos, como consecuencia de su baja humedad (18%).

Otro punto a considerar en la valoración de los abonos orgánicos es su residualidad a través del tiempo. Al respecto, Machado (1958) estima que estos pueden tener efectos hasta de cuatro años después de su aplicación, cuando se emplean en altas cantidades. López (1966) rechaza la validez de lo anterior para la pulpa de café descompuesta, pues al aplicarlo en dosis crecientes (hasta 64 t ha⁻¹) el tiempo de sustentación de N fue sólo de seis meses, el de K cuatro meses y el de Ca y Mg de un año. Resultados similares fueron obtenidos por Uribe y Salazar (1983) al incorporar 6 kg de este abono en el hoyo de la siembra de café.

Compatibilidad química de las mezclas

Una consideración importante en el momento de mezclar los productos es su compatibilidad química, pues algunos presentan apelmazamiento cuando entran en contacto con otros, como resultado del aumento de la higroscopicidad o pérdida gaseosa de N (Tabla 72). A continuación, se dan algunos ejemplos:

Tabla 71.
Contenido de elementos menores en algunos abonos orgánicos analizados en Cenicafé.

Abono orgánico	Fe	Mn	Zn	Cu	B
	(mg kg ⁻¹)				
Pulpa de café	3.322	176	86	33	67
Lombrinaza	5.507	312	133	61	84
Gallinaza	3.201	447	263	63	48
Pollinaza	3198	599	478	438	83
Bovinaza	4.950	428	122	26	69
Porquinaza	3.689	854	183	136	34
Bocashi	923	386	154	209	164

Tomado de Sadeghian (2010c).

- ♦ El nitrato de amonio y la urea son totalmente incompatibles, debido a que la humedad relativa crítica de la mezcla disminuye hasta un nivel muy bajo, impidiendo su manejo en estado sólido.
- ♦ Al mezclar la urea o los fertilizantes que contienen amonio con escorias Thomas, rocas fosfóricas o cales, se propicia la evaporación de amoníaco; la causa de esta incompatibilidad se relaciona con liberación de agua que genera la reacción, la cual ocasiona la pegajosidad severa en la mezcla.
- ♦ Los fertilizantes que contienen formas solubles de fósforo en agua, tales



como superfosfatos simples y triples, nitrofosfatos y fosfatos amónicos (DAP y MAP) no deben mezclarse con aquellos que contienen Ca; por ejemplo, nitrato de Ca, pues el Ca revertirá en forma insoluble el fosfato soluble en agua. En el mismo sentido, no es conveniente mezclar la urea con superfosfatos, fosfatos monoamónicos o diamónicos.

Por regla general, y con el propósito de prevenir un aumento en la higroscopicidad, se sugiere aplicar las mezclas realizadas en la finca, tan pronto como sea posible (FAO, 2002; Guerrero, 2004).

Consumo de fertilizantes en Colombia

Anualmente, la actividad cafetera emplea cerca de 300 mil toneladas de fertilizantes de síntesis química; cantidad que representa el 18% del volumen total comercializado en el país (1.600.000 t), y sitúa al renglón cafetero como el mayor consumidor de este insumo junto con la palma. Pese a lo anterior, el café es el cultivo con menor uso de fertilizantes por unidad de área en Colombia, pues en promedio se aplican menos de 400 kg ha-año⁻¹ (Sadeghian, 2014). Esta cantidad presenta variaciones considerables según la región, nivel de tecnificación, etapa fenológica, sistema de producción, densidad de siembra y sombrero, entre otros. Basta saber que en ocasiones se suministran más de 3.000 kg ha-año⁻¹, sin que existan criterios claros que definan esta cantidad, y a veces se aplican dosis muy bajas o no se fertiliza. Un estudio reciente de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia revela que los caficultores aplican cerca de la mitad de los requerimientos del cultivo, siendo más crítica la situación para algunos departamentos. En café, aproximadamente el 35% del volumen total empleado corresponde a fertilizantes tipo complejo granulado, el 40% resultan de mezclas físicas (en su mayoría a base de urea, MAP/DAP, KCl, sulfato de magnesio y

sulfato de potasio y magnesio) y el restante 25% a fuentes simples.

El costo de los fertilizantes para el cultivo de café hoy día representa entre el 15% y 25% de los costos totales de la producción, y entre el 80% y 90% de los insumos requeridos. Estas cifras parecen no tener mucha importancia como valor porcentual; sin embargo, su magnitud toma otra proporción al conocer que la cantidad que ella representa tiene hoy un costo cercano a los 1,3 billones de pesos (1.320.000.000.000) anuales (Sadeghian, 2014).

En cuanto a los abonos orgánicos se refiere, la principal fuente es la pulpa de café. En el país se generan cerca de 4.500.000 t de este material al año, las cuales pueden llegar a aportar las siguientes cantidades de nutrientes: 7.366 t de N, 1.022 t de P₂O₅ y 17.165 t de K₂O. Si las anteriores cifras se expresan en términos de los fertilizantes comerciales como urea, DAP y KCl, su costo estaría cerca de los 110 mil millones de pesos.

Cálculo de mezclas de fertilizante

Una vez que se definan las dosis de los nutrientes a aplicarse en el cultivo y las fuentes fertilizantes a emplear, es necesario realizar los cálculos para definir las cantidades de los fertilizantes, con el fin de preparar las mezclas. A continuación, se dan algunos ejemplos.

Ejemplo 1.

Calcular las cantidades de urea y KCl para proporcionar 280 kg de N y 180 kg de K₂O y obtener el grado y la proporción de la mezcla.

a. Cantidades de los fertilizantes:

100 kg de urea	—	46 kg de N
X kg de urea	—	280 kg de N

$$X = \frac{280 \text{ kg de N} \times 100 \text{ kg de urea}}{46 \text{ kg de N}}$$

X = 609 kg de urea

Tabla 72.

Compatibilidad de fertilizantes y enmiendas. Tomado de Instituto Colombiano Agropecuario-ICA (1992).

1. Cloruro de potasio	2. Sulfato de potasio	3. Sulfato de amonio	4. Sulfato de potasio y magnesio	5. Nitrato de amonio cálcico	6. Nitrato de potasio	7. Nitrato de calcio	8. Urea	9. Superfosfatos	10. Fosfatos de amonio	11. Calfos	12. Escorias y termofosfatos	13. Cales	14. Abonos orgánicos	
														1. Cloruro de potasio
														2. Sulfato de potasio
														3. Sulfato de amonio
														4. Sulfato de potasio y magnesio
														5. Nitrato de amonio cálcico
														6. Nitrato de potasio
														7. Nitrato de calcio
														8. Urea
														9. Superfosfatos
														10. Fosfatos de amonio
														11. Calfos
														12. Escorias y termofosfatos
														13. Cales
														14. Abonos orgánicos

	Fertilizantes compatibles para mezclarse
	Fertilizantes compatibles para mezclarse con poco tiempo previo a su uso
	Fertilizantes no compatibles para mezclarse por razones químicas



$$\begin{array}{rcl} 100 \text{ kg de KCl} & \text{—} & 60 \text{ kg de K}_2\text{O} \\ X \text{ kg de KCl} & \text{—} & 180 \text{ kg de K}_2\text{O} \end{array}$$

$$X = \frac{180 \text{ kg de K}_2\text{O} \times 100 \text{ kg de KCl}}{60 \text{ kg de K}_2\text{O}}$$

$$X = 300 \text{ kg de KCl}$$

Cantidad total de fertilizantes = 609 kg de urea + 300 kg de KCl = 909 kg

b. Grado de la mezcla

Porcentaje de N

$$909 \text{ kg de la mezcla} \text{ — } 280 \text{ kg de N}$$

$$100 \text{ kg de la mezcla} \text{ — } X \text{ kg de N}$$

$$X = \frac{100 \text{ kg de la mezcla} \times 280 \text{ kg de N}}{909 \text{ kg de la mezcla}}$$

$$X = 31 \text{ kg de N} = 31\% \text{ de N}$$

Porcentaje de K₂O

$$909 \text{ kg de la mezcla} \text{ — } 180 \text{ kg de K}_2\text{O}$$

$$100 \text{ kg de la mezcla} \text{ — } X \text{ kg de K}_2\text{O}$$

$$X = 20 \text{ kg de K}_2\text{O} = 20\% \text{ de K}_2\text{O}$$

Grado del fertilizante: 31-0-20

Proporción de la mezcla

$$\frac{609 \text{ kg de urea}}{300 \text{ kg de KCl}} = 2$$

Relación o proporción de mezcla aproximada: dos unidades de urea por cada unidad de KCl (2:1).

Ejemplo 2.

Calcular las cantidades de urea, DAP, KCl y sulfato de magnesio (kieserita) para proporcionar 300 kg de N, 60 kg de P₂O₅, 260 kg de K₂O y 40 kg de MgO.

a. Cantidades de los fertilizantes:

Se inicia con el cálculo de la cantidad de DAP para conocer su aporte de N, el cual se restará a la cantidad de N aportada por la urea.

$$\begin{array}{rcl} 100 \text{ kg de DAP} & \text{—} & 46 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \\ X \text{ kg de DAP} & \text{—} & 60 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \end{array}$$

$$X = \frac{60 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \times 100 \text{ kg de DAP}}{46 \text{ kg de P}_2\text{O}_5}$$

$$X = 130 \text{ kg de DAP}$$

N aportado por el DAP

$$100 \text{ kg de DAP} \text{ — } 18 \text{ kg de N}$$

$$130 \text{ kg de DAP} \text{ — } X \text{ kg de N}$$

$$X = \frac{130 \text{ kg de DAP} \times 18 \text{ kg de N}}{100 \text{ kg de DAP}}$$

$$X = 23 \text{ kg de N}$$

Cantidad de N a partir de urea = Cantidad total de N - Cantidad de N del DAP

$$300 \text{ kg de N} - 23 \text{ kg de N} = 277 \text{ kg de N}$$

$$100 \text{ kg de urea} \text{ — } 46 \text{ kg de N}$$

$$X \text{ kg de urea} \text{ — } 277 \text{ kg de N}$$

$$X = \frac{277 \text{ kg de N} \times 100 \text{ kg de urea}}{46 \text{ kg de N}}$$

$$X = 602 \text{ kg de urea}$$

$$100 \text{ kg de KCl} \text{ — } 60 \text{ kg de K}_2\text{O}$$

$$X \text{ kg de KCl} \text{ — } 260 \text{ kg de K}_2\text{O}$$

$$X = \frac{260 \text{ kg de K}_2\text{O} \times 100 \text{ kg de KCl}}{60 \text{ kg de K}_2\text{O}}$$

$$X = 433 \text{ kg de KCl}$$

$$100 \text{ kg de kieserita} \text{ — } 25 \text{ kg de MgO}$$

$$X \text{ kg de kieserita} \text{ — } 40 \text{ kg de MgO}$$

$$X = \frac{40 \text{ kg de MgO} \times 100 \text{ kg de kieserita}}{25 \text{ kg de MgO}}$$

$$X = 160 \text{ kg de kieserita}$$

Cantidad total de fertilizantes = 602 kg de urea + 130 kg de DAP + 433 kg de KCl + 160 de kieserita = 1.325 kg

Cantidad de azufre (S) aportada por kieserita

100 kg de Sulfato de Mg — 20 kg de S

160 kg de Sulfato de Mg — X kg de S

$$X = \frac{160 \text{ kg de kieserita} \times 20 \text{ kg de S}}{100 \text{ kg de kieserita}}$$

X = 32 kg de S

b. Grado de la mezcla

Porcentaje de N

1.325 kg de la mezcla — 300 kg de N

100 kg de la mezcla — X kg de N

$$X = \frac{100 \text{ kg de la mezcla} \times 300 \text{ kg de N}}{1.325 \text{ kg de la mezcla}}$$

X = 23 kg de N = 23% de N

Porcentaje de P_2O_5

1.325 kg de la mezcla — 60 kg de P_2O_5

100 kg de la mezcla — X kg de P_2O_5

$$X = \frac{100 \text{ kg de la mezcla} \times 60 \text{ kg de } P_2O_5}{1.325 \text{ kg de la mezcla}}$$

X = 5 kg de P_2O_5 = 5% de P_2O_5

Porcentaje de K_2O

1.325 kg de la mezcla — 260 kg de K_2O

100 kg de la mezcla — X kg de K_2O

$$X = \frac{100 \text{ kg de la mezcla} \times 260 \text{ kg de } K_2O}{1.325 \text{ kg de la mezcla}}$$

X = 20 kg de K_2O = 20% de K_2O

Porcentaje de Mg

1.325 kg de la mezcla — 40 kg de MgO

100 kg de la mezcla — X kg de MgO

$$X = \frac{100 \text{ kg de la mezcla} \times 40 \text{ kg de MgO}}{1.325 \text{ kg de la mezcla}}$$

X = 3 kg de MgO = 3% de MgO

Porcentaje de S

1.325 kg de la mezcla — 32 kg de S

100 kg de la mezcla — X kg de S

$$X = \frac{100 \text{ kg de la mezcla} \times 32 \text{ kg de S}}{1.325 \text{ kg de la mezcla}}$$

X = 2 kg de S = 2% de S

Grado del fertilizante: 23-5-20-3(MgO)

Proporción de la mezcla

$$\frac{602 \text{ kg de urea}}{130 \text{ kg de DAP}} = 4,6$$

$$\frac{433 \text{ kg de KCl}}{130 \text{ kg de DAP}} = 3,3$$

$$\frac{160 \text{ kg de Sulfato de Mg}}{130 \text{ kg de DAP}} = 1,2$$

Relación de mezcla de urea:DAP:KCl:Sulfato de Mg: 4,6:1,0:3,3:1,2

Ejemplo 3.

Preparar 1.000 kg de mezcla para obtener el grado 19-4-24 a partir de urea, MAP y KCl.

Si en 100 kg de la mezcla debe haber 19 kg de N, 4 kg de P_2O_5 y 24 kg de K_2O , en 1.000 kg de la mezcla debe haber 190 kg de N, 40 kg de P_2O_5 y 240 kg de K_2O .

Se inicia con el cálculo de la cantidad de MAP para conocer su aporte de N, el cual se restará a la cantidad de N aportada la urea.

100 kg de MAP — 50 kg de P_2O_5

X kg de MAP — 40 kg de P_2O_5

$$X = \frac{40 \text{ kg de } P_2O_5 \times 100 \text{ kg de MAP}}{50 \text{ kg de } P_2O_5}$$

X = 80 kg de MAP

N aportado por el MAP

100 kg de MAP — 11 kg de N

80 kg de MAP — X kg de N

$$X = \frac{80 \text{ kg de MAP} \times 11 \text{ kg de N}}{100 \text{ kg de MAP}}$$

$$X = 9 \text{ kg de N}$$

Cantidad de N a partir de urea = Cantidad total de N - Cantidad de N del MAP

$$190 \text{ kg de N} - 9 \text{ kg de N} = 181 \text{ kg de N}$$

$$100 \text{ kg de urea} \quad \text{—} \quad 46 \text{ kg de N}$$

$$X \text{ kg de urea} \quad \text{—} \quad 181 \text{ kg de N}$$

$$X = \frac{181 \text{ kg de N} \times 100 \text{ kg de urea}}{46 \text{ kg de N}}$$

$$X = 393 \text{ kg de urea}$$

$$100 \text{ kg de KCl} \quad \text{—} \quad 60 \text{ kg de K}_2\text{O}$$

$$X \text{ kg de KCl} \quad \text{—} \quad 240 \text{ kg de K}_2\text{O}$$

$$X = \frac{240 \text{ kg de K}_2\text{O} \times 100 \text{ kg de KCl}}{60 \text{ kg de K}_2\text{O}}$$

$$X = 400 \text{ kg de KCl}$$

Cantidad total de fertilizantes = 393 kg de urea
+ 80 kg de MAP + 400 kg de KCl = 873 kg

Nótese que la suma total de los fertilizantes no alcanza los 1.000 kg y, por lo tanto, será necesario adicionar 127 kg de un relleno para obtener el grado deseado. En la industria se emplean materiales como cal, yeso o abonos orgánicos secos granulados como relleno cuando quieren fabricar un grado comercial conocido a partir de la mezcla de fertilizantes simples. Cabe resaltar que la anterior estrategia puede ir en contravía de la calidad y el precio del producto, pues se estaría entregando en el saco del producto un relleno de poco valor.

Literatura citada

- Alcarde, J. C. (2005). Corretivos de acidez dos solos: Características e interpretações técnicas. *Boletim Técnico ANDA*, 6, 1–24. https://anda.org.br/wp-content/uploads/2019/03/boletim_06.pdf
- Alcarde, J. (2007). Fertilizantes. En R. Novais, V. Álvarez, N. Barros, R. Fontes, R. Cantarutti & J. C. Neves (Eds.), *Fertilidade do solo* (pp. 737–768). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Álvarez, V. H. (1994). Avaliação da fertilidade do solo. En Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior (Ed.), *Curso de fertilidade e manejo do solo: Módulo 11* (pp. 1–42). Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior.
- Álvarez, V. H. (1996). Correlação e calibração de métodos de análise de solos. En V. Álvarez, E. Fontes & P. Fontes (Eds.), *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Arboleda, C., Arcila, J., & Martínez, R. (1988). Sistema integrado de recomendación y diagnosis: una alternativa para la interpretación de resultados del análisis foliar en café. *Agronomía Colombiana*, 5(1–2), 17–30. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/20933>
- Arcila, J., & Farfán, F. F. (2007). Consideraciones sobre la nutrición mineral y orgánica en los sistemas de producción de café. En J. Arcila, F.F. Farfán, A. M. Moreno, L.F. Salazar, & E. Hincapié (Eds.), *Sistemas de producción de café en Colombia* (pp. 201–232). Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/720>
- Arias, E., & Sadeghian, S. (2011). Lixiviación del fósforo en suelos de la zona cafetera y su relación con la textura. *Suelos Ecuatoriales*, 41(2), 150–154.
- Arias, E., Sadeghian, S., Mejía, B., & Morales, C. (2009). Lixiviación del nitrógeno en algunos suelos de la zona cafetera y su relación con la textura. *Revista Cenicafé*, 60(3), 239–252. <http://hdl.handle.net/10778/154>
- Arnon, D. I., & Stout, P. R. (1939). The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology*, 14(2), 371–375. <https://doi.org/10.1104/pp.14.2.371>
- Ávila, W., Sadeghian, S., Sánchez, P., & Castro, H. (2010). Respuesta del café al fósforo y abonos orgánicos en la etapa de almácigo. *Revista Cenicafé*, 61(4), 358–369. <http://hdl.handle.net/10778/509>
- Bear, F. E., & Toth, S. J. (1948). Influence of calcium on availability of other soil cations. *Soil Science*, 65(1), 69–74. <https://doi.org/10.1097/00010694-194801000-00007>
- Blandón, G., Dávila, M. T., & Rodríguez-Valencia, N. (1998). Caracterización microbiológica y físico-química de los subproductos del beneficio del café en proceso de compostaje. *Revista Cenicafé*, 49(3), 169–185. <http://hdl.handle.net/10778/753>
- Bohn, H. L., McNeal, B. L., & O'Connor, G. A. (1993). *Química del suelo* (1.a ed.). Limusa.
- Bravo, E. (1978). Fertilización potásica en café. *Suelos Ecuatoriales*, 9(2):68–75.

Bravo, E., & Gómez, A. (1974). Capacidad de fijación de fósforo en seis unidades de suelos andosólicos de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 25(1), 19–29. <http://hdl.handle.net/10778/4291>

Caires, E. (2010). Manejo da acidez do solo. En L. I. Prochnow, V. Casarin & S. R. Stipp (Eds.), *Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: Contexto mundial e práticas de suporte* (Vol. 1, pp. 277–347). International Plant Nutrition Institute.

California Plant Health Association. (2004). *Manual de fertilizantes para cultivos de alto rendimiento* (M. Guzmán Ortiz, Trad.). Limusa.

Cantarutti, R., Barros, N., Martinez, H., & Novais, R. (2007). Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. En R. Novais, V. H. Álvarez, N. Barros, R. L. Fontes, R. Cantarutti & J. C. Neves (Eds.), *Fertilidade do solo* (pp. 769-850). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Cardona, C. (1972). *Estudio de absorción foliar de fertilizantes en plántulas de café crecidas en soluciones nutritivas* [Tesis de pregrado]. Universidad de Caldas, Colombia.

Cardona, D. A., & Sadeghian, S. (2005). Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Revista Cenicafé*, 56(4), 348–364. <http://hdl.handle.net/10778/197>

Carrillo, I. F., & Chaves, B. (1994, Octubre 5-8). La materia orgánica y su relación con el nitrógeno. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (Organizador), VII *Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo* (pp. 82–83). Bucaramanga, Santander, Colombia.

Cate, R. B., & Nelson, L. A. (1971). A Simple Statistical Procedure for Partitioning Soil Test Correlation Data Into Two Classes. *Soil Science Society of America Journal*, 35(4), 658–660. <https://doi.org/10.2136/sssaj1971.03615995003500040048x>

Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2005). *Informe Anual Cenicafé 2005*. <https://doi.org/10.38141/10783/2005>

Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2007). *Informe Anual Cenicafé 2007*. <https://doi.org/10.38141/10783/2007>

Centro Nacional de Investigaciones de Café (2010). *Informe Anual Cenicafé 2010*. <https://doi.org/10.38141/10783/2010>

Centro Nacional de Investigaciones de Café (2014). *Informe Anual Cenicafé 2014*. <https://doi.org/10.38141/10783/2014>

Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2012). *Informe anual Cenicafé 2012*. <https://doi.org/10.38141/10783/2012>

Centro Nacional de Investigaciones de Café (2016). *Informe Anual Cenicafé 2016*. <https://doi.org/10.38141/10783/2016>

Centro Nacional de Investigaciones de Café (2017). *Informe Anual Cenicafé 2017*. <https://doi.org/10.38141/10783/2017>

Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2018). *Informe Anual Cenicafé 2018*. <https://doi.org/10.38141/10783/2018>

Centro Nacional de Investigaciones de Café (2019). *Informe Anual Cenicafé 2019*. <https://doi.org/10.38141/10783/2019>

Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2020). *Informe Anual Cenicafé 2020*. <https://doi.org/10.38141/10783/2020>

Curi, N., Larac, J. O., Kämpf, N., Moniz, A. C. & Fontes, L. E. (1993). *Vocabulário de ciência do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas.

Dahnke, W. C. (1993). Soil test interpretation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 24(1–2), 11–27. <https://doi.org/10.1080/00103629309368778>

Dávila, M., & Ramírez, C. (1996). Lombricultura en pulpa de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 225, 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0225>

Dias, L. E., & Álvarez, V. H. (1996). Introdução à fertilidade do solo. En L. E. Dias (Coord.), *Curso de fertilidade e manejo do solo*. Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior.

Díaz, C., Sadeghian, S., & Morales, C. S. (2008). Cambios químicos ocasionados por encalamiento y uso de lombrinaza en la etapa de almácigo del café. *Revista Cenicafé*, 59(4), 295–309. <http://hdl.handle.net/10778/214>

Díaz, V., & Sadeghian, S. (2018). Adsorción de fósforo en suelos de la zona cafetera de Colombia. *Revista Cenicafé*, 69(2), 7–16. <http://hdl.handle.net/10778/4292>

Díaz-Poveda, V., & Sadeghian, S. (2020). Calidad de las enmiendas para corregir la acidez del suelo en la zona cafetera de Colombia. *Avances Técnicos Cenicafé*, 516, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0516>

Dow, A. I., & Roberts, S. (1982). Proposal: Critical Nutrient Ranges for Crop Diagnosis. *Agronomy Journal*, 74(2), 401–403. <https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400020033x>

Duque, H., & Mestre, A. (2001). Óptimos biológico y económico de la respuesta del café a la fertilización en dos localidades de Colombia. *Revista Cenicafé*, 52(1), 74–89. <http://hdl.handle.net/10778/770>

Eckert, D. (1987). Soil test interpretations: basic cation saturation ratios and sufficiency levels. En J. Brown (Ed.), *Soil testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation* (pp. 53-64). Soil Science Society of America.

Epstein, E., & Bloom, A. J. (2005). *Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives* (2nd ed.). Sinauer Associates, Inc.

Espinosa, J., & Molina, E. (1999). Acidez y encalado de los suelos (1a ed.) International Plant Nutrition Institute. <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/libros/Acidez%20y%20encalado%20de%20suelos,%20libro%20por%20J%20Espinosa%20y%20E%20Molina.pdf>

Essington, M. E. (2015). *Soil and water chemistry: an integrative approach* (2nd ed.). CRC Press.

Evans, C. (1987). Soil test calibration. En J. Brown (Ed.), *Soil testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation* (pp. 22-30). Soil Science Society of America.

Farfán, F., & Mestre, A. (2004). Respuesta del café cultivado en un sistema agroforestal a la aplicación de fertilizantes. *Revista Cenicafé* 55(2), 161–174. <http://hdl.handle.net/10778/168>

Fassbender, H. (1987). *Química de los suelos con énfasis en suelos de América latina* (H. Fassbender & E. Bornemisza, Eds.; 2a ed.). IICA.

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia & Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2017). *Atlas Cafetero de Colombia*. Imprenta Nacional de Colombia.

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2021, diciembre 20). *Sistemas de Información Cafetera SIC@* [Plataforma]. Ingreso SIC@. <https://sica.cafedecolombia.com/sica/faces/index.jsp>

Foth, H. D., & Ellis, B. G. (1997). *Soil fertility* (2nd ed.). CRC Press.

Gómez, C., Carrillo, I., & Estrada, G. (1982). Adsorción de potasio en andosoles de la zona cafetera. *Revista Cenicafé*, 33(4), 104–128. <http://hdl.handle.net/10778/4293>

Gomez, L., Caballero, A., & Baldión, J. V. (1991). *Ecotopos cafeteros de Colombia*. Cenicafé.

González, H., & Sadeghian, S. (2006). Efecto de corto plazo de distintas fuentes de azufre sobre la acidez y la disponibilidad de este elemento en la zona radical del café (*Coffea arabica* L.). *Revista Cenicafé*, 57(2), 132–145. <http://hdl.handle.net/10778/173>

González, H., & Sadeghian, S. (2012a). Lixiviación de nitrógeno en suelos de la zona cafetera a partir de diferentes fuentes fertilizantes. *Revista Cenicafé*, 63(1), 111–119. <http://hdl.handle.net/10778/516>

González, H., & Sadeghian, S. (2012b). Volatilización del nitrógeno a partir de diferentes fuentes fertilizantes en la etapa de crecimiento vegetativo del café. *Revista Cenicafé*, 63(1), 132–143. <http://hdl.handle.net/10778/518>

González, H., Sadeghian, S., & Mejía, B. (2003). Caracterización del azufre en algunos suelos de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 54(3), 226–233. <http://hdl.handle.net/10778/267>

González, H., Sadeghian, S., Medina, R., & Castro, A. (2015). Alternativas para disminuir la volatilización de nitrógeno producida por la fertilización con urea. *Revista Cenicafé*, 66(1), 7–16. <http://hdl.handle.net/10778/604>

Graham, E. (1959). An explanation of theory and methods of soil testing. *Missouri Agricultural Experimental Station Bulletin*, 734, 1–20. <https://hdl.handle.net/10355/54881>

Guerrero, R. (2004). *Manual técnico: Propiedades generales de los fertilizantes* (4a ed.). Monómeros. <http://www.monmeros.com/descargas/dpmanualfertilizacion.pdf>

Guzmán, C. A., & Riaño, N. M. (1996). Respuesta de plantas de café en etapa de almácigo a la fertilización foliar. *Avances Técnicos Cenicafé*, 232, 1–4. <https://doi.org/10.38141/10779/0232>

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2017). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson.

Henao, M., & Delvaux, B. (1998). Propiedades de intercambio K-Mg en suelos derivados de materiales volcánicos de la zona cafetera central de Colombia. *Revista Cenicafé*, 49(2), 136–150. <http://hdl.handle.net/10778/823>

Henao, M., & Hernández, E. (2002). Disponibilidad de potasio en suelos derivados de cenizas volcánicas y su relación con la nutrición del café en la etapa vegetativa. *Revista Cenicafé*, 53(4), 293–305. <http://hdl.handle.net/10778/789>

Hernández, E., & Suarez, S. (2002, Septiembre 18–20). Respuesta del café a la fertilización con nitrógeno y potasio en la etapa de crecimiento vegetativo. En Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (Organizador), *Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo* (11a ed. pp. 118–125). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Cali, Valle del Cauca, Colombia.

Herrón, A., & Valdés, H. (1966). Respuesta a la aplicación de fertilizante en dos proyectos de cafetos bajo sombra. *Revista Cenicafé*, 17(4), 142–146. <http://hdl.handle.net/10778/4303>

Hincapié, G. E., & Henao, M. C. (2008, Octubre 29–31). Efecto de la fertilización del café sobre la composición de la fase líquida en suelos derivados de cenizas volcánicas. En Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (Organizador), *Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo* (14a ed., pp. 118–125). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Villavicencio, Meta, Colombia.

Instituto Colombiano Agropecuario (1992). *Fertilización en diversos cultivos: Quinta aproximación. Manual de asistencia técnica No. 25*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/14124>

Jenny, H. (1941). *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. McGraw-Hill.

Kirkby, E. (2012). Introduction, definition and classification of nutrients. In P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed., pp. 3–5). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00001-7>

Kirkby, E. A., & Römheld, V. (2007). Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. *Encarte de Informações Agronômicas*, 118, 1–24. [http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/8A79657EA91F52F483257AA10060FACB/\\$FILE/Encarte-118.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/8A79657EA91F52F483257AA10060FACB/$FILE/Encarte-118.pdf)

Leal, L., Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2007). Pérdidas de nitrógeno por volatilización en cafetales en etapa productiva. *Revista Cenicafé*, 58(3), 216–226. <http://hdl.handle.net/10778/224>

Leguizamón, J. E. (1995, Julio 5-7). Interacción de una mezcla de micorrizas y el complejo *Meloidogyne* spp. en almácigos de café. En Asociación Colombiana de Fitopatología y Ciencias Afines (Organizadore), *Congreso de La Asociación Colombiana de Fitopatología y Ciencias Afines* (16a ed., pp. 50-56). Asociación Colombiana de Fitopatología y Ciencias Afines, Medellín, Antioquia, Colombia.

Leikam, D., Lamond, R., & Mengel, D. (2003). Providing flexibility in phosphorus and potassium fertilizer recommendations. *Better Crops*, 87(3), 6–10. <http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/issue/BC-2003-3>

Lince, L. A., & Sadeghian, S. (2012). Número de muestras simples para el análisis de las propiedades del suelo. *Suelos ecuatoriales*, 42(2), 129–137.

Lopes, A., & Guilherme, L. R. (2007). Fertilidade do solo e produtividade agrícola. En R. Novais, V. H. Álvarez, N. Barros, R. L. Fontes, R. Cantarutti, J. & C. Neves (Eds.), *Fertilidade do solo*. (pp. 1-64). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

López, M. (1960). Valoración de las formas de fósforo, orgánica e inorgánicas, de un suelo de la zona cafetera de Colombia. *Revista Cenicafé*, 11(7), 189–204. <http://hdl.handle.net/10778/4294>

López, M. (1966). Cambios químicos en el suelo ocasionados por adición de materia orgánica: su valor residual y su efecto sobre plántulas de café hasta un año de edad. *Revista Cenicafé*, 17(4), 121–131. <http://hdl.handle.net/10778/4308>

Luna, C., & Suárez, S. (1978). El potasio en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Suelos Ecuatoriales*, 9(2), 37–44.

Machado, A. (1958). Algunos resultados experimentales con fertilizantes en cafetos. *Revista Cenicafé*, 9(7-8), 157–198. <http://hdl.handle.net/10778/4309>

Malavolta, E. (1993). *Nutrição mineral e adubação do cafeeiro: Colheitas econômicas máximas*. Editora Agronômica Ceres.

Malavolta, E. (2006). *Manual de nutrição mineral de plantas*. Editora Agronômica Ceres.

Malavolta, E., Vitti, G. C., & Oliveira, S. A. (1989). *Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações*. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato.

Mengel, K., Kirkby, E. A., Kosegarten, H., & Appel, T. (Eds.). (2001). *Principles of Plant Nutrition* (5th ed.). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-1009-2>

Mestre, A. (1973). Utilización de la pulpa en almácigos de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 28, 1–2. <https://doi.org/10.38141/10779/0028>

Mestre, A. (1977). Determinación de la rata óptima de fertilización en plantaciones de café sin sombrío. *Revista Cenicafé*, 28(2), 51–60. <http://hdl.handle.net/10778/4304>

Mestre, A. (1996). Respuesta del café bajo sombra a la fertilización. *Avances Técnicos Cenicafé*, 231, 1–4. <https://doi.org/10.38141/10779/0231>

Mestre, A. (2000, Julio 24-28). Fertilización del café en crecimiento y producción. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Organizador), *Simposio sobre suelos de la zona cafetera colombiana*: (14a ed., 3 p.). Centro Nacional de Investigaciones de Café, Manizales, Caldas, Colombia.

Mestre, A., & Salazar, J. N. (1989). Comparación de cinco formas de aplicación de fertilizantes en café. *Revista Cenicafé*, 40(3), 80–85. <http://hdl.handle.net/10778/690>

Navarro, G., & Navarro, S. (2013). *Química agrícola, química del suelo y de nutrientes esenciales para las plantas* (3a ed.). Mundi-Prensa.

Nelson, L., & Anderson, R. (1977). Partitioning of soil test-crop response probability. En J. Brown (Ed.), *Soil testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation* (pp. 19-38). Soil Science Society of America.

Ochoa, M. (2001). *Variabilidad espacial del nitrógeno disponible en dos andisoles de la zona cafetera* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Colombia.

Ochoa, W. A., Suárez, S., & Sadeghian, S. (2003). Variabilidad espacial del nitrógeno disponible en andisoles de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 54(2), 179–189. <http://hdl.handle.net/10778/258>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, & Asociación Internacional de la Industria de los fertilizantes. (2002). *Los Fertilizantes y su uso*. FAO. <https://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>

Ortiz, M. E., Zapata, R. D., Sadeghian, S., & Franco, H. F. (2004). Aluminio intercambiable en suelos con propiedades ándicas y su relación con la toxicidad. *Revista Cenicafé*, 55(2), 101–110. <http://hdl.handle.net/10778/165>

Patiño, M. (2005). *Caracterización de la fertilidad del suelo en la zona cafetera del departamento del Valle del Cauca* [Tesis de pregrado]. Universidad de Caldas.

Peck, T., & Soltanpour, P. (1990). The principles of soil testing. En R. Westerman (Ed.), *Soil testing and plant analysis* (8th ed., pp. 1–9). Soil Science Society of America.

Raij, B. (2011). *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. International Plant Nutrition Institute.

Rendón, J., & Sadeghian, S. (2018). Aplicación de índices espectrales para identificar necesidades de fertilización nitrogenada en café. *Revista Cenicafé*, 69(1), 7–15. <http://hdl.handle.net/10778/1088>

Riaño, N., Arcila, J., Jaramillo, A., & Chaves, B. (2004). Acumulación de materia seca y extracción de nutrimentos por *Coffea arabica* L. cv. Colombia en tres localidades de la zona cafetera central. *Revista Cenicafé*, 55(4), 265–276. <http://hdl.handle.net/10778/263>

Roy, R. N., Finck, A., Blair, G. J., & Tandon, H. L. (2006). *Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Sadeghian, S. (2003). Efecto de la fertilización con nitrógeno fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café. *Revista Cenicafé*, 54(3), 242–257. <http://hdl.handle.net/10778/273>

Sadeghian, S. (2008a). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica. *Boletín Técnico Cenicafé*, 32, 1-44. <http://hdl.handle.net/10778/587>

Sadeghian, S. (2008b). Actualización y tendencia en la fertilización de café. En: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (Organizador), *Actualización en fertilización de cultivos y uso de fertilizantes*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá., Colombia.

Sadeghian, S. (2009). Calibración de análisis de suelo para N P K y Mg en cafetales al sol y bajo semisombra. *Revista Cenicafé*, 60(1), 7–24. <http://hdl.handle.net/10778/179>

Sadeghian, S. (2010a). Evaluación de la fertilidad del suelo para una adecuada nutrición de los cultivos. Caso café. *Suelos Ecuatoriales*, 41(1), 46–64.

Sadeghian, S. (2010b). Fertilización: Una práctica que determina la producción de los cafetales. *Avances Técnicos Cenicafé*, 391, 1–8. <http://hdl.handle.net/10778/377>

Sadeghian, S. (2010c). *La materia orgánica: Componente esencial en la sostenibilidad de los agroecosistemas cafeteros*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0018>

Sadeghian, S. (2011). Respuesta de cafetales al sol y bajo semisombra a nitrógeno y su relación con la materia orgánica del suelo. *Revista Facultad Nacional De Agronomía Medellín*, 64(1), 5781–5791. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/26380>

Sadeghian, S. (2012). *Efecto de los cambios en las relaciones de calcio, magnesio y potasio intercambiables en suelos de la zona cafetera colombiana sobre la nutrición de café Coffea arabica L. en la etapa de almácigo*[Tesis de Doctorado], Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8983>

Sadeghian, S. (2013). Nutrición de cafetales. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (Ed.), *Manual del cafetero colombiano: investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Vol. 2, pp. 85–116). Cenicafé.

Sadeghian, S. (2014). Manejo integrado de nutrientes para una caficultura sostenible. *Suelos Ecuatoriales*, 44(2), 74–89. http://unicauca.edu.co/revistas/index.php/suelos_ecuatoriales/article/view/40

Sadeghian, S. (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 466, 1–12. <http://hdl.handle.net/10778/704>

Sadeghian, S. (2017). Síntomas visuales de deficiencias nutricionales en café: Diagnóstico y manejo. *Avances Técnicos Cenicafé*, 478, 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0478>

Sadeghian, S. (2018). Interpretación de los resultados de análisis de suelo: Soporte para una adecuada nutrición de cafetales. *Avances Técnicos Cenicafé*, 497, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0497>

Sadeghian, S. (2020). Análisis foliar: Una guía para evaluar el estado nutricional del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 515, 1–4. <https://doi.org/10.38141/10779/0515>

Sadeghian, S., & Álvarez, V. (2011). Calibración de análisis de suelos para potasio en café a partir de resultados obtenidos en una localidad. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 2, 13–15. <http://nla.ipni.net/article/NLA-3023>

Sadeghian, S., & Arias, E. (2018). Lixiviación del potasio en suelos de la zona cafetera y su relación con la textura. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 16(1), 34–42. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/1140>

Sadeghian, S., & Díaz-Marín, C. (2020a). Corrección de la acidez del suelo: Alteraciones químicas del suelo. *Revista Cenicafé*, 71 (1), 7–20. <https://doi.org/10.38141/10778/1116>

Sadeghian, S., & Díaz-Marín, C. (2020b). Corrección de la acidez del suelo: Efectos en el crecimiento inicial del café. *Revista Cenicafé*, 71(1), 21–31. <https://doi.org/10.38141/10778/1117>

Sadeghian, S., & Duque, H. (2019). Fertilizantes minerales para café en Colombia Consideraciones técnicas. *Avances Técnicos Cenicafé*, 503, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0503>

Sadeghian, S., & Duque, H. (2017). Formulaciones generales de fertilizantes: alternativas para una nutrición balanceada de los cafetales en Colombia. *Avances Técnicos Cenicafé*, 483, 1–4. <http://hdl.handle.net/10778/4272>

- Sadeghian, S., & González, H. (2012). Respuesta del café a la fertilización con azufre. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 181–185.
- Sadeghian, S., & González, H. (2014). Respuesta del café (*Coffea arabica* L.) a fuentes y dosis de nitrógeno en la etapa de almácigo. *Revista Cenicafé*, 65(1), 34–43. <http://hdl.handle.net/10778/542>
- Sadeghian, S., & Jaramillo, A. (2016). Nutrición de los cafetales en Colombia, en escenarios de La Niña. *Avances Técnicos Cenicafé*, 473, 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0499>
- Sadeghian, S., & Lince, L. A. (2014). Variabilidad del suelo en lotes cafeteros. Consideraciones para el muestreo. *Avances Técnicos Cenicafé*, 446, 1–8. <http://hdl.handle.net/10778/485>
- Sadeghian, S., & Ospina-Penagos, C. (2021). Manejo nutricional de café durante la etapa de almácigo. *Avances Técnicos Cenicafé*, 532, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0532>
- Sadeghian, S., & Salamanca, A. (2015). Micronutrientes en frutos y hojas de café. *Revista Cenicafé*, 66(2), 73–87. <http://hdl.handle.net/10778/656>
- Sadeghian, S., & Zapata, R. D. (2012). Propiedades relacionadas con la adsorción de cationes intercambiables en algunos suelos de la zona cafetera de Colombia. *Revista Cenicafé*, 63(2), 79–89. <http://hdl.handle.net/10778/537>
- Sadeghian, S., Alarcón, V. F., Díaz-Poveda, V., Lince-Salazar, L. A., & Rey-Sandoval, J. C. (2019). Fertilidad del suelo y manejo de la nutrición. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.), *Aplicación de ciencia tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila* (pp. 80–105). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0005_4
- Sadeghian, S., González, H., & Arias, E. (2015). Lixiviación de nutrientes en suelos de la zona cafetera: prácticas que ayudan a reducirla. *Boletín Técnico Cenicafé*, 40, 1–36. <https://doi.org/10.38141/10781/040>
- Sadeghian, S., Hernández, E., & González, H. (2007a). Mezcla de fertilizantes en la finca, una buena opción para el caficultor. *Avances Técnicos Cenicafé*, 362, 1–8. <http://hdl.handle.net/10778/363>
- Sadeghian, S., Hernández, E., Ross, M., & Guerrero, R. (2006, Octubre 4-6). Fuentes solubles de magnesio y azufre en la producción y calidad del café. En Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (Organizador), *Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo* (13a ed., pp. 118-125). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá D. C., Colombia.
- Sadeghian, S., Jaramillo, A. & Duque, H. (2017). Nutrición de los cafetales en Colombia en escenarios de El Niño. *Avances Técnicos Cenicafé*, 477, 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0477>
- Sadeghian, S., Mejía, B., & Arcila, J. (2006). Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. *Revista Cenicafé*, 57(4), 251–261. <http://hdl.handle.net/10778/117>
- Sadeghian, S., Mejía, B., & Arcila, J. (2007). Composición elemental de los frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha. *Avances Técnicos Cenicafé*, 364, 1–8. <http://hdl.handle.net/10778/343>
- Sadeghian, S., Mejía, B., & González, H. (2012). Acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio en los frutos de café (*Coffea arabica* L.). *Revista Cenicafé*, 63(1), 7–18. <http://hdl.handle.net/10778/519>

Sadeghian, S., Mejía, B., & González, H. (2013). Acumulación de calcio magnesio y azufre en los frutos de café (*Coffea arabica* L.) variedad Castillo. *Revista Cenicafé*, 64(1), 7–18. <http://hdl.handle.net/10778/522>

Sadeghian, S., Murgueitio, E., Mejía, C. E., & Rivera, J. M. (2010). Efecto de los sistemas de uso y manejo del suelo en la zona cafetera del departamento del Quindío, Colombia. En D. Lobo, D. Gabriels, F. Cisneros & P. Cisneros (Eds.), *Física de suelos y el manejo de la tierra y el agua en zonas de ladera*. (pp. 20–26). International Centre for Eremology.

Sadeghian, S., Murgueitio, E., Mejía, C., & Rivera, M. (2001). Ordenamiento ambiental y reglamentación del uso y manejo del suelo en la zona cafetera. En Universidad Tecnológica de Pereira (Ed.). *Suelos del eje cafetero* (pp. 96–108). Proyecto UTP-GTZ.

Salamanca, A., & González-Osorio, H. (2020). Respuesta del café a la aplicación foliar de nutrientes. *Revista Cenicafé*, 71(2), 124–142. <https://doi.org/10.38141/10778/71210>

Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2004). La densidad aparente en suelos de la zona cafetera y su efecto sobre el crecimiento del cafeto. *Avances Técnicos Cenicafé*, 326, 1–8. <http://hdl.handle.net/10778/393>

Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 56(4), 381–397. <http://hdl.handle.net/10778/163>

Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2008). Almacigos de café con distintas proporciones de lombrinaza en suelos con diferente contenido de materia orgánica. *Revista Cenicafé*, 59(2), 91–102. <http://hdl.handle.net/10778/217>

Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2015). Respuesta del café a la aplicación de silicio y lombrinaza durante la etapa de almacigo. *Revista Cenicafé*, 66(2), 88–109. <http://hdl.handle.net/10778/657>

Salazar, J. N. (1977). Respuesta de plántulas de café a la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio. *Revista Cenicafé*, 28(2), 61–66.

Salazar, L. F., & Sadeghian, S. (2016). Respuesta de café (*Coffea arabica* L.) a la fertilización antes y después de la zoca. *Revista Cenicafé*, 67(1), 81–93. <http://hdl.handle.net/10778/681>

Salazar, M. R., Chaves, B., Riaño N. M., Arcila, J. & Jaramillo, A. (1994). Crecimiento del fruto de café *Coffea arabica* var. Colombia. *Revista Cenicafé*, 45(2), 41–50. <http://hdl.handle.net/10778/4275>

Sánchez, P. M. (2000, julio 24-28). Validación de la fertilización del cafeto bajo sombrío regulado. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Organizador), *Simposio sobre suelos de la zona cafetera colombiana* (14a ed., 10 p.). Cenicafé, Manizales, Caldas, Colombia.

Sims, J. (1999). Soil fertility evaluation. En M. Sumner (Ed.), *Handbook of soil science* (pp. 113–153). CRC Press.

Soil Science Society of America. (2008). *Glossary of Soil Science Terms 2008*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/2008.glossarysoilscienceterms>

Sousa, D. M., Miranda, L., & Oliveira, S. A. (2007). Acidez do solo e sua correção. En R. Novais, V. H. Álvarez, N. Barros, R. L. Fontes, R. Cantarutti & J. C. Neves (Eds.), *Fertilidade do solo* (pp. 205–274). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Sparks, D. L. (1995). *Environmental soil chemistry*. Academic Press.

Statistical Analysis System Institute. (2008). The SAS System for Windows (version 9.2 TS2M0). [Software computacional].

Stevenson, F. J. (1982). *Humus chemistry: Genesis, composition, reactions* (1st ed.). Wiley.

Suárez, F., & Rodríguez, A. (1956). Aplicación de la cal en cafetos jóvenes. *Revista Cafetera de Colombia*, 12(129), 4294–4301.

Suárez, S., & Carrillo, I. (1984). Comportamiento de tres fertilizantes potásicos en un Typic Dystrandept. *Revista Cenicafé*, 35(2), 31–39. <http://hdl.handle.net/10778/4295>

Urhan, M. (1953). El análisis de hojas y la respuesta de los cafetos a algunos fertilizantes. *Revista Cenicafé*, 4(42), 36–38. <http://hdl.handle.net/10778/4296>

Uribe, A. & Mestre, A. (1976). Efecto del nitrógeno, el fósforo y el potasio sobre la producción de café. *Revista Cenicafé*, 27(4), 158–173. <http://hdl.handle.net/10778/4273>

Uribe, A. (1983). Efecto del fósforo en la producción de café. *Revista Cenicafé*, 34(1), 3–15. <http://hdl.handle.net/10778/4297>

Uribe, A., & Mestre, A. (1988). Efecto de la densidad de población y de la disposición de los árboles en la producción de café. *Revista Cenicafé*, 39(2), 31–42. <http://hdl.handle.net/10778/4306>

Uribe, A., & Salazar, J. N. (1983). Influencia de la pulpa del café en la producción del cafeto. *Revista Cenicafé*, 34(2), 44–58. <http://hdl.handle.net/10778/4307>

Uribe, A., & Salazar, J. N. (1981a). Distancias de siembra y dosis de fertilizante en la producción de café. *Revista Cenicafé*, 32(3), 88–105.

Uribe, A., & Salazar, J. N. (1981b). Efecto de los elementos menores en la producción de café. *Revista Cenicafé*, 32(4), 122–142. <http://hdl.handle.net/10778/4299>

Uribe, A., & Salazar, J. N. (1983). Influencia de la pulpa del café en la producción del cafeto. *Revista Cenicafé*, 34(2), 44–58. <http://hdl.handle.net/10778/4307>

Valencia, G. (1964). La deficiencia de Boro en el cafeto y su control. *Revista Cenicafé*, 15(3), 115–125. <http://hdl.handle.net/10778/4300>

Valencia, G. (1975). Fertilización foliar en almácigos de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 49, 1–2. <https://doi.org/10.38141/10779/0049>

Valencia, G. (1979, Enero 24-26). Fuentes de potasio para cafetales. En Sociedad Colombiana de Control de Malezas y Fisiología Vegetal (Organizador), *Seminario de la Sociedad Colombiana de Control de Malezas y Fisiología Vegetal* (11a ed., pp. 118-125). Sociedad Colombiana de Control de Malezas y Fisiología Vegetal, Medellín, Antioquia, Colombia.

Valencia, G. (1991). *Efecto del tipo de fertilización potásica en el crecimiento y en la producción del cafeto*. Cenicafé.

Valencia, G., & Arcila, J. (1977). Efecto de la fertilización con N, P, K a tres niveles en la composición mineral de las hojas del cafeto. *Revista Cenicafé*, 28(4), 119–138. <http://hdl.handle.net/10778/4298>

Valencia, G., & Bravo, E. (1981). Influencia del encalamamiento en la producción de cafetales establecidos. *Revista Cenicafé*, 32(1), 3–14. <http://hdl.handle.net/10778/1109>

Valencia, G., & Franco, H. F. (1988). Calibración entre métodos de extracción de micronutrientes para análisis de suelos y las necesidades del cafeto. *Revista Cenicafé*, 39(4), 95–110. <http://hdl.handle.net/10778/4301>

Valencia, G., Gómez, A., & Bravo, E. (1975). Efecto de diferentes portadores de nitrógeno en el desarrollo del cafeto y en la fertilidad de los suelos. *Revista Cenicafé*, 26(3), 131–142. <http://hdl.handle.net/10778/4276>

Valencia, G., Mestre, A., & Duran, M. (1968). Respuesta a la aplicación de boro y zinc en un cafetal de Fredonia (Antioquia). *Revista Cenicafé*, 19(3), 95–101. <http://hdl.handle.net/10778/4302>

Voisin, A. (1970). *Leyes científicas en la aplicación de los abonos*. Editorial Tecnos.

Weil, R.R. & Brady, N.C. (2017). *The nature and properties of soil* (15th ed.). Pearson.

Wendling, A., Eltz, F. L. F., Cubilla, M. M., Amado, T. J. C., & Mielniczuk, J. (2008). Recomendação de adubação potássica para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(5), 1929–1939. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500014>

Zapata, R. (2004). *Química de la acidez del suelo*. Cargraphics.



Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia

ISBN: 978-958-8490-59-5



9 789588 490595