

CASSIO PEREIRA HONDA FILHO

Manejo de la fertilidad del suelo y nutrición mineral en el cultivo del café



EDITORIA
SCHREIBEN



CASSIO PEREIRA HONDA FILHO

Manejo de la fertilidad del suelo y nutrición mineral en el cultivo del café



EDITORA
SCHREIBEN

2025

© Cassio Pereira Honda Filho - 2025
Diagramación y portada: Schreiben
Imagen de la portada: ALEXSTUDIO - Freepik.com
Revisión y traducción: el autor
Libro publicado en: 29/09/2025
Acta de publicación: TP0902025

Editorial Board (Editora Schreiben):

Dr. Adelar Heinsfeld (UPF)
Dr. Airtón Spies (EPAGRI)
Dra. Ana Carolina Martins da Silva (UERGS)
Dr. Cleber Duarte Coelho (UFSC)
Dr. Daniel Marcelo Loponte (CONICET – Argentina)
Dr. Deivid Alex dos Santos (UEL)
Dr. Douglas Orestes Franzen (UCEFF)
Dr. Eduardo Ramón Palermo López (MPR - Uruguay)
Dr. Fábio Antônio Gabriel (SEED/PR)
Dra. Geuciane Felipe Guerim Fernandes (UENP)
Dra. Ivânia Campigotto Aquino (UPF)
Dr. João Carlos Tedesco (UPF)
Dr. Joel Cardoso da Silva (UFPA)
Dr. José Antonio Ribeiro de Moura (FEEVALE)
Dr. Klebson Souza Santos (UEFS)
Dr. Leandro Hahn (UNIARP)
Dr. Leandro Mayer (SED-SC)
Dra. Marcela Mary José da Silva (UFRB)
Dra. Marciane Kessler (URI)
Dr. Marcos Pereira dos Santos (FAQ)
Dra. Natércia de Andrade Lopes Neta (UNEAL)
Dr. Odair Neitzel (UFFS)
Dr. Waniilton Dudek (UNESPAR)

Esta obra es una producción independiente. La exactitud de las informaciones, opiniones y conceptos emitidos, así como el origen y la presentación de las tablas, cuadros, mapas, fotografías y referencias, es de exclusiva responsabilidad del/los autor(es).

Editora Schreiben
Linha Cordilheira - SC-163
89896-000 Itapiranga/SC
Tel: (49) 3678 7254
editoraschreiben@gmail.com
www.editoraschreiben.com

Datos Internacionales de Catalogación en la Publicación (CIP)

H771 Honda Filho, Cassio Pereira.
Manejo de la fertilidad del suelo y nutrición mineral en el cultivo del café /
Cassio Pereira Honda Filho. – Itapiranga, SC : Schreiben, 2025.
80 p. ; e-book.
Inclui bibliografía
E-book no formato PDF.
ISBN: 978-65-5440-521-8
DOI: 10.29327/5674930
1. Cafeicultura - Fertilizantes e adubação. 2. Fertilidade do solo.
3. Nutrição mineral de plantas. 4. Café (Planta) - Nutrição. I. Título.

CDD 633.738

Bibliotecaria responsable: Juliane Steffen CRB14/1736

RESUMEN

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LA

FERTILIDAD DEL SUELO EN EL CULTIVO DEL CAFÉ.....5

CAPÍTULO 2

MACRONUTRIENTES ESENCIALES PARA EL CAFETO.....9

CAPÍTULO 3

MICRONUTRIENTES Y SU

PAPEL FISIOLÓGICO EN EL CULTIVO DEL CAFÉ.....17

CAPÍTULO 4

DINÁMICA DE LOS NUTRIENTES EN EL PERFIL DEL SUELO E
INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS.....27

CAPÍTULO 5

MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO
Y DEL ESTADO NUTRICIONAL DEL CAFETO.....35

CAPÍTULO 6

PRÁCTICAS DE ENCALADO Y YESADO EN EL CULTIVO DEL CAFÉ:
EFECTOS Y RECOMENDACIONES.....39

CAPÍTULO 7

MANEJO DE LA MATERIA ORGÁNICA Y EL
CARBONO EN EL SUELO DE LA CAFEICULTURA.....47

CAPÍTULO 8

NUTRICIÓN MINERAL Y

SUS EFECTOS EN LA CALIDAD DEL CAFÉ.....53

CAPÍTULO 9

RECOMENDACIÓN TÉCNICA Y

PRÁCTICA DE FERTILIZACIÓN PARA CAFETOS.....57

CAPÍTULO 10

DESAFÍOS FUTUROS E INNOVACIONES EN

FERTILIDAD Y NUTRICIÓN EN LA CAFEICULTURA.....65

CONSIDERACIONES FINALES.....69

AGRADECIMIENTOS.....71

REFERÊNCIAS.....73

INTRODUCCIÓN A LA FERTILIDAD DEL SUELO EN EL CULTIVO DEL CAFÉ

El cultivo del café en Brasil surgió como una actividad agrícola destacada desde el siglo XIX, consolidándose como uno de los principales productos de exportación nacional. Sin embargo, los suelos utilizados inicialmente presentaban, en su mayoría, una baja fertilidad natural o se agotaron rápidamente debido a prácticas agrícolas rudimentarias. La falta de conocimientos técnicos en aquella época dio lugar a la adopción de métodos empíricos como el barbecho, la sucesión de cultivos y el uso esporádico de estiércol animal, que, aunque mínimamente eficaces, no eran suficientes para mantener altos niveles de productividad a lo largo del tiempo. La situación comenzó a cambiar con el avance de la ciencia del suelo en Brasil, especialmente a partir de la segunda mitad del siglo XX, cuando surgieron instituciones dedicadas al estudio sistemático de la fertilidad y el manejo adecuado de los suelos agrícolas.

Con la creación de la Sociedad Brasileña de Ciencias del Suelo, la consolidación del Instituto Agronómico de Campinas (IAC) y, más tarde, con el fortalecimiento de Embrapa Solos y Embrapa Café, el país pasó a contar con un cuerpo técnico-científico capaz de fundamentar la transición de la cafeicultura tradicional a una agricultura tecnificada. La fundación de Embrapa, en 1973, representa un hito en este proceso. A partir de entonces, las recomendaciones sobre fertilización, corrección de la acidez, uso de cal y yeso agrícola, así como el manejo de macro y micronutrientes, pasaron a basarse en pruebas experimentales y a publicarse en boletines técnicos y manuales de campo. El Manual del Café y los documentos del Consorcio de Investigación del Café se convirtieron en una referencia nacional en materia de manejo de la fertilidad, orientando a los productores sobre buenas prácticas que combinan ciencia y eficiencia agronómica.

En las últimas décadas, ha cobrado importancia un nuevo enfoque: el denominado «construcción de la fertilidad del suelo». A diferencia del manejo correctivo aislado, esta estrategia supone la preparación anticipada del ambiente edáfico para que el cafeto se desarrolle en condiciones óptimas desde la implantación del cultivo. Esto implica la aplicación criteriosa de correctivos y fertilizantes, la incorporación de materia orgánica, la adopción de cultivos de cobertura como la *brachiaria* entre las hileras y el cumplimiento riguroso de las llamadas 4 C: la cantidad correcta, la época correcta, el lugar correcto y la fuente correcta de nutrientes. Al proponer esta visión integrada, investigadores como Reis, Guimaraes y Oliveira contribuyeron a consolidar un modelo productivo que combina eficiencia y sostenibilidad.

La comprensión de la fertilidad del suelo como un concepto multidimensional ha llevado, a su vez, a una creciente valoración de la calidad física del suelo. Estudios sobre la agregación, la porosidad, la densidad y la infiltración del agua han demostrado que la estructura del suelo influye directamente en la dinámica de los nutrientes y el crecimiento radicular del cafeto. Por ello, prácticas conservacionistas como la descompactación mecánica en profundidad, el cultivo mínimo, el uso de plantas de cobertura y el mantenimiento del mantillo han pasado a formar parte del paquete tecnológico de la cafeicultura moderna. Este enfoque permite un mayor aprovechamiento de los fertilizantes aplicados, reduce las pérdidas por lixiviación y mejora el rendimiento fisiológico de la planta.

La materia orgánica pasó a entenderse como un elemento central de la fertilidad, no solo por sus efectos químicos directos, como el aumento de la CTC, la liberación gradual de nutrientes y la complejación de metales tóxicos, sino también por sus funciones físicas y biológicas. Mejora la retención de agua, favorece la actividad microbiana y contribuye a la estabilidad de la estructura del suelo. Investigaciones recientes realizadas en la región mogiana de São Paulo, por ejemplo, han demostrado que los cultivos de café bajo manejo intensivo presentan un menor contenido de carbono orgánico y una mayor degradación estructural, en comparación con áreas con cobertura perenne o vegetación nativa. Esto refuerza la importancia de la materia orgánica no solo como insumo agronómico, sino también como indicador de sostenibilidad.

El monitoreo periódico de la fertilidad se ha convertido en parte integrante del calendario de la cafeicultura tecnificada. Se recomienda realizar el análisis del suelo después de la cosecha, en los meses de julio y agosto, lo que permite ajustar el plan de fertilización de acuerdo con las pérdidas ocasionadas por la producción. Estos ajustes se realizan basándose en principios clásicos de fertilidad, como la Ley del Mínimo, que establece que el nutriente más limitante es el que determina la productividad, y la Ley de los Incrementos Decrescentes, según la cual los aumentos sucesivos de fertilización tienden a generar rendimientos progresivamente menores. Al integrar estos conceptos con datos locales y análisis de laboratorio, el productor reduce los costos y el impacto ambiental sin comprometer el rendimiento del cultivo.

Un avance reciente en los estudios de fertilidad del suelo en cafetos fue el experimento ClimapestFACE (Free Air Carbon-Dioxide Enrichment), realizado por Embrapa Meio Ambiente, que simuló el aumento de la concentración atmosférica de CO₂ en cultivos con brachiaria entre hileras. Los resultados mostraron una reducción del fósforo disponible y alteraciones en la dinámica del potasio, lo que evidenció la necesidad de ajustar el manejo de la fertilización ante los cambios climáticos. Estos hallazgos confirman el carácter dinámico de la fertilidad del suelo, influenciado por factores edafoclimáticos y por el sistema de cultivo.

La fertilidad del suelo en el cultivo del café en Brasil se sustenta en tres pilares: químico (pH, macro y micronutrientes), físico (estructura, porosidad, retención hídrica y compactación) y biológico (materia orgánica, actividad microbiana y ciclaje de nutrientes). Estudios realizados en Muzambinho (MG) han demostrado que los cultivos sombreados presentan un mejor equilibrio químico y una mayor estabilidad física en comparación con los cultivados a pleno sol. El sombreado contribuye a regular la temperatura del suelo y a reducir la evaporación, lo que favorece el microclima edáfico, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes. Además, la adopción de gramíneas como cobertura entre hileras promueve la formación de macroporos y microporos, el aumento de la materia orgánica y el ciclo de los nutrientes, fortaleciendo los atributos físicoquímicos y biológicos del suelo. Teniendo en cuenta que muchos suelos cafeteros en Brasil son naturalmente ácidos y de baja

fertilidad, prácticas como el encalado, la fertilización equilibrada y el manejo profundo del perfil son esenciales para mantener y mejorar estos tres pilares de manera sostenible.

La producción científica nacional ha reforzado este enfoque integrador. Trabajos recientes abordan, por ejemplo, los efectos de diferentes fuentes y dosis de fósforo sobre el desarrollo inicial del café, los impactos de la extracción simultánea de cationes con diferentes soluciones extractoras y el uso de fertilizantes organominerales como alternativa prometedora para el equilibrio nutricional en viveros y áreas recién implantadas. La combinación de datos experimentales, análisis económicos e indicadores de sostenibilidad ambiental se ha valorado como criterio de validación de nuevas tecnologías.

Así, la historia del estudio de la fertilidad del suelo en la cafeicultura brasileña muestra una trayectoria de profunda evolución técnica y científica. Partiendo de prácticas empíricas, se avanzó hacia métodos basados en el diagnóstico, el pronóstico y el monitoreo, culminando en modelos de manejo que combinan alta productividad, conservación de los recursos naturales y mitigación de los impactos ambientales. El éxito de esta trayectoria se debe, en gran parte, al trabajo continuo de investigación y extensión de instituciones como Embrapa, el IAC, universidades federales y estatales, cooperativas y empresas del sector productivo. Ante los retos que plantean la intensificación agrícola y el cambio climático, es imperativo mantener la inversión en la ciencia del suelo, valorando la fertilidad como base de sistemas productivos resilientes y sostenibles.

MACRONUTRIENTES ESENCIALES PARA EL CAFETO

La nutrición mineral es uno de los pilares de la productividad de los cafetales. La planta del café requiere grandes cantidades de nutrientes, especialmente durante el crecimiento vegetativo, la formación y el llenado de los granos. Entre los elementos esenciales, los macronutrientes se requieren en mayores cantidades y desempeñan funciones fisiológicas fundamentales en las estructuras vegetativas, el metabolismo y la reproducción. En los cultivos comerciales, las deficiencias de macronutrientes perjudican el desarrollo vegetativo, la resistencia al estrés y la calidad y el rendimiento de los granos.

En el manejo moderno de la cafeicultura, la nutrición con macronutrientes se basa en diagnósticos como el análisis del suelo y del tejido foliar, además de la aplicación estratégica de fertilizantes según la demanda de la planta, la dinámica de los nutrientes en el suelo y las pérdidas por lixiviación o volatilización.

1. NITRÓGENO (N)

Funciones en la planta del café

El nitrógeno es el nutriente más exigido por la planta del café, desempeñando un papel fundamental en la construcción de estructuras celulares y en el metabolismo energético. Compone aminoácidos, proteínas, enzimas, ácidos nucleicos (ADN y ARN) y nucleótidos como el ATP y el NADPH, siendo también un elemento esencial de la molécula de clorofila. Su presencia influye directamente en la tasa de fotosíntesis neta, promoviendo una mayor acumulación de biomasa, el desarrollo radicular y la expansión foliar. En el cafeto, el nitrógeno estimula la emisión de ramas ortotrópicas y plagiotrópicas, lo que confiere una arquitectura equilibrada

a la copa y favorece la interceptación de la luz. Además, está asociado a la regulación de genes relacionados con la senescencia, lo que contribuye a la longevidad funcional de las hojas, lo que repercute directamente en el rendimiento en floradas sucesivas.

Síntomas de deficiencia

- Clorosis generalizada en las hojas más viejas, con coloración amarillenta uniforme.
- Crecimiento reducido de la planta y acortamiento de los entrenudos.
- Reducción significativa de la producción y la calidad de los frutos.

Fuentes comunes de fertilización

- Urea (45 % N)
- Nitrato de amonio (33 % N)
- Sulfato de amonio (21 % N)
- Fuentes orgánicas: tortas vegetales, compuestos orgánicos, estiércol curado.

2. FÓSFORO (P)

Funciones en la planta del café

El fósforo es esencial para el metabolismo energético y para los procesos bioquímicos vitales para la fisiología del cafeto. Participa en la composición del ATP, NADP⁺, coenzimas y ácidos nucleicos, siendo fundamental para la división celular y el crecimiento de los tejidos meristemáticos. Su presencia adecuada favorece el desarrollo del sistema radicular, especialmente de las raíces laterales, que garantizan una mejor absorción del agua y los nutrientes.

Síntomas de deficiencia

- Crecimiento retardado, especialmente de las raíces.
- Hojas verde azuladas con tonalidad violácea en los bordes.
- Retraso en la floración y reducción en la pegada de frutos.
- Reducción de la producción.

Fuentes comunes de fertilización

- Superfosfato simple (18 % P_2O_5)
- Superfosfato triple (41-45 % P_2O_5)
- Fosfato natural reactivo (dependiente del pH y del P remanente)
- MAP – Fosfato monoamónico (11 % N; 52 % P_2O_5)

3. POTASIO (K)

Funciones en la planta del café

El potasio, aunque no forma parte de las estructuras orgánicas de la planta, es determinante para la funcionalidad celular del cafeto. Actúa como activador de decenas de sistemas enzimáticos, participa en la regulación del potencial osmótico celular y desempeña un papel fundamental en el control de la apertura y el cierre estomático, influyendo directamente en la transpiración y la eficiencia en el uso del agua. En el metabolismo, contribuye a la translocación de fotoasimilados, facilitando el transporte de carbohidratos desde los tejidos vegetativos hacia los frutos, proceso esencial para el llenado uniforme de los granos y la sincronización de la maduración. En condiciones adversas, el potasio ayuda a mantener el turgor y la tolerancia al estrés hídrico y a la salinidad, además de reducir la susceptibilidad del cafeto a enfermedades foliares, como la cercosporiosis. También interviene en el metabolismo de los azúcares y los compuestos fenólicos, que pueden influir en atributos relacionados con la calidad de la bebida.

Síntomas de deficiencia

- Clorosis marginal en las hojas más viejas, seguida de necrosis.
- Granos malformados y vacíos.
- Caída prematura de hojas y frutos.

Fuentes comunes de fertilización

- Cloruro de potasio (60 % K_2O)
- Sulfato de potasio (50 % K_2O y 17 % S)
- Nitrato de potasio (13 % N y 44 % K_2O)
- Cenizas vegetales (en cultivos agroecológicos)

4. CALCIO (Ca)

Funciones en la planta del café

El calcio es un nutriente estructural de gran importancia para el café, ya que forma las lamelas medias de las paredes celulares en forma de pectato de calcio, lo que confiere rigidez y cohesión a los tejidos vegetales. También actúa como segundo mensajero intracelular en los procesos de crecimiento y defensa, participando en la regulación de la expresión génica y la señalización entre organitos. Su disponibilidad es esencial para el desarrollo de las yemas apicales y florales, garantizando la continuidad del crecimiento vegetativo y reproductivo. Además, el calcio estabiliza las membranas plasmáticas y modula la actividad de diversas enzimas, favoreciendo una mayor tolerancia a los desequilibrios iónicos y a la toxicidad por aluminio en suelos ácidos. Los niveles adecuados de calcio están asociados a la integridad del sistema radicular y a una mayor adherencia de las flores y los frutos, lo que contribuye a la productividad y longevidad del café.

Síntomas de deficiencia

- Necrosis y muerte del meristemo apical (yemas).
- Hojas jóvenes deformadas, gruesas y con clorosis.
- Sistema radicular con crecimiento atrofiado.
- Reducción del cuajado de la floración y aumento de la caída de frutos.

Fuentes comunes de fertilización

- Caliza dolomítica o calcítica
- Yeso agrícola (también fuente de azufre)
- Nitrato de calcio (15,5 % N y 19 % Ca)
- Fosfato de Araxá (con contenido secundario de Ca)

5. MAGNESIO (Mg)

Funciones en la planta del café

El magnesio está íntimamente ligado a la fotosíntesis en el café, ya que constituye el átomo central de la molécula de clorofila, siendo

indispensable para la absorción de la luz y la fijación del carbono atmosférico. Actúa como cofactor de diversas enzimas implicadas en la transferencia de fosfato, en la síntesis de carbohidratos y en el metabolismo de los ácidos nucleicos. Es fundamental para la activación de la ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa (Rubisco), la principal enzima del ciclo de Calvin, y participa en el transporte de sacarosa, el principal fotoasimilado dirigido a los frutos en desarrollo. En el cafeto, el magnesio presenta una alta movilidad en el floema, lo que permite la redistribución de nutrientes a los órganos con mayor demanda, especialmente durante la fructificación. Una nutrición adecuada con magnesio previene los desequilibrios nutricionales, principalmente con potasio y calcio, y contribuye a la formación de granos con una mejor acumulación de azúcares y compuestos de calidad, lo que puede elevar el nivel sensorial de la bebida.

Síntomas de deficiencia

- Clorosis internerval en hojas más viejas.
- Necrosis marginal y caída prematura de las hojas en casos graves.
- Reducción de la tasa fotosintética y del vigor vegetativo.

Fuentes comunes de fertilización

- Sulfato de magnesio (9 % Mg y 13 % S).
- Caliza dolomítica (en encalados).
- Termofosfatos magnésicos.
- Fertilizantes foliares específicos (Mg quelatado, sulfato, nitrato, suspensión concentrada).

6. AZUFRE (S)

Funciones en la planta del café

El azufre desempeña funciones esenciales en la bioquímica del cafeto, integrando aminoácidos sulfurados como la cisteína y la metionina y participando en la composición de vitaminas como la tiamina (B₁) y biotina. Es fundamental para la conformación tridimensional de las proteínas, mediante puentes disulfuro, y para la actividad de las enzimas

implicadas en la asimilación del nitrógeno y en el metabolismo redox. En el café, el suministro adecuado de azufre contribuye a la síntesis de compuestos secundarios, algunos de los cuales actúan como precursores del aroma y el sabor de la bebida, y favorece los mecanismos antioxidantes asociados a la tolerancia al estrés abiótico. La deficiencia de S reduce la eficiencia de la nutrición nitrogenada y compromete la síntesis de proteínas y metabolitos esenciales, lo que se traduce en un menor vigor y productividad.

Síntomas de deficiencia

- Clorosis generalizada en hojas jóvenes, similar a la deficiencia de nitrógeno.
- Reducción del crecimiento y desarrollo vegetativo.
- Disminución de la síntesis de compuestos secundarios.

Fuentes comunes de fertilización

- Sulfato de amonio (21 % N y 24 % S)
- Sulfato de potasio (50 % K₂O y 17 % S)
- Yeso agrícola (15 % S)
- Elemento elemental (azufre en pastillas)

El silicio en el cultivo del café: elemento beneficioso con potencial estratégico

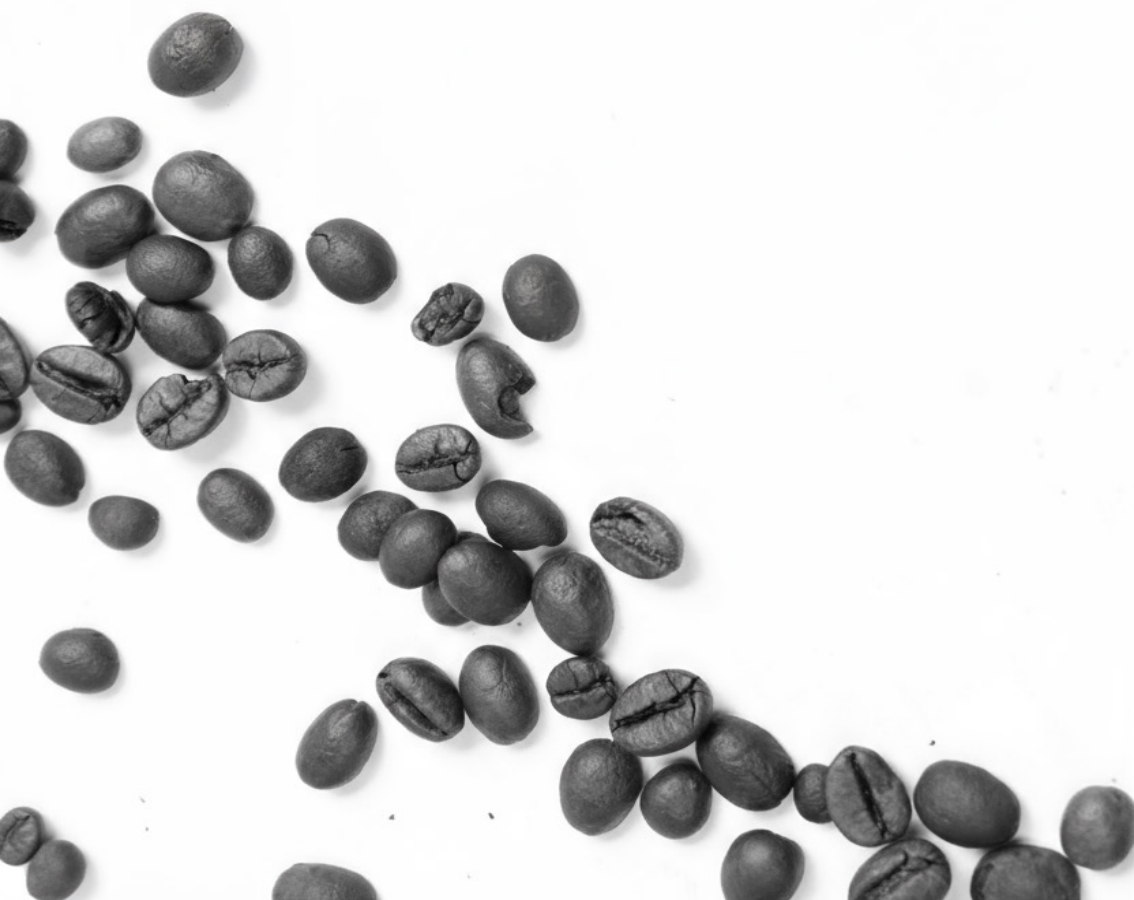
Aunque no se considera esencial, el silicio (Si) se clasifica como elemento beneficioso para diversos cultivos, incluido el café, debido a su acción en la tolerancia al estrés biótico y abiótico. El Si se deposita en las paredes celulares en forma de sílice amorfa, aumentando la rigidez estructural, reduciendo la pérdida de agua por transpiración y dificultando la penetración de patógenos. También participa en procesos de defensa inducida, estimulando la síntesis de fitoalexinas, compuestos fenólicos y lignina. En condiciones tropicales, su aplicación puede dar lugar a una mayor eficiencia fotosintética, un mejor aprovechamiento de los nutrientes, la sincronización de la maduración y una mayor resistencia de la planta frente al estrés.

Su aplicación está asociada a:

- Reducción de enfermedades: menor incidencia y gravedad de la roya (*Hemileia vastatrix*) y la cercosporiosis (*Cercospora coffeicola*).
- Tolerancia al déficit hídrico: mayor rigidez celular, mejor control estomático y activación de enzimas antioxidantes.
- Mejora de la calidad y uniformidad de la maduración: aumento de la eficiencia fotosintética, translocación de asimilados y sincronía en el desarrollo de los frutos.
- Estabilidad fotosintética: preservación de los cloroplastos, retraso de la senescencia foliar y activación de enzimas como la superóxido dismutasa y la catalasa.

Fuentes utilizadas

- Silicato de potasio (vía foliar)
- Escorias siderúrgicas (vía suelo)
- Ácido ortosilícico estabilizado
- Fertilizantes con Si soluble asociados a K o Ca



MICRONUTRIENTES Y SU PAPEL FISIOLÓGICO EN EL CULTIVO DEL CAFÉ

El cafeto (*Coffea arabica*) requiere, además de los macroelementos esenciales (N, P, K, Ca, Mg y S), un conjunto de micronutrientes minerales, entre ellos: boro (B), cloro (Cl), hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), molibdeno (Mo) y níquel (Ni), además de elementos beneficiosos como el cobalto (Co). Aunque se necesitan en cantidades extremadamente reducidas (mg kg^{-1} de materia seca), estos elementos desempeñan un papel determinante en el desarrollo saludable de las plantas, en el rendimiento y en la calidad sensorial tanto del fruto verde como del grano procesado. La absorción, la movilidad interna y las interacciones entre estos nutrientes influyen directamente en la salud del cafeto, la eficiencia fisiológica y la resistencia a enfermedades y a estreses bióticos y abióticos.

HIERRO (Fe)

Función fisiológica

En el cafeto (*Coffea arabica*), el hierro (Fe) es esencial para la fotosíntesis y la respiración celular. Forma parte de proteínas de hierro-azufre (Fe-S), citocromos y diversas reductasas, participando activamente en la cadena de transporte de electrones tanto en la fotosíntesis (fotosistemas I y II) como en la respiración mitocondrial. El Fe es indispensable para la actividad de la nitrato reductasa y la nitrito reductasa, además de actuar en la regeneración de sistemas antioxidantes, como la catalasa, la peroxidasa y la superóxido dismutasa dependiente del Fe. Su disponibilidad adecuada garantiza la eficiencia energética, la asimilación del nitrógeno y el mantenimiento del crecimiento vegetativo. En el suelo, la forma Fe^{2+} (ferrosa) es más soluble y se moviliza principalmente por ácidos orgánicos y fenoles exudados por las raíces, lo que favorece su absorción, especialmente en suelos ácidos.

Síntomas de deficiencia

Se caracteriza por una clorosis internerval acentuada en las hojas jóvenes, debido a la baja movilidad del Fe en el floema, pudiendo evolucionar hasta la ausencia casi total de clorofila. En casos graves, se observa marchitamiento parcial de los folíolos, alteraciones en la ultraestructura de los cloroplastos y reducción de la tasa fotosintética, lo que da lugar a un menor crecimiento vegetativo y una mayor susceptibilidad a los estreses bióticos y abióticos.

Fitotoxicidad

El exceso de hierro, más común en suelos hidromórficos o con pH muy bajo, puede provocar toxicidad radicular, inducir la producción excesiva de radicales libres (vía reacción de Fenton) y generar antagonismo en la absorción de manganeso (Mn) y zinc (Zn).

Fuentes de fertilización

Sulfato ferroso, cloruro ferroso y quelatos de Fe (EDTA, DTPA, EDDHA), siendo estos últimos más eficaces en suelos con pH elevado. La aplicación puede ser vía suelo (en cobertura o en hoyos) o vía foliar en situaciones de deficiencia aguda, respetando las dosis para evitar la fitotoxicidad.

MANGANESO (Mn)

Función fisiológica

El manganeso (Mn) es un componente esencial del complejo de evolución del oxígeno (*Oxygen Evolving Complex*, OEC) en el fotosistema II, donde actúa como cofactor en la fotólisis del agua, promoviendo la liberación de oxígeno molecular, protones y electrones a la cadena transportadora. Forma parte de la enzima superóxido dismutasa dependiente del manganeso (Mn-SOD), crucial para la desintoxicación de especies reactivas de oxígeno (ROS) en los cloroplastos. Actúa como activador o cofactor de más de 35 enzimas, incluidas las implicadas en la biosíntesis de lignina, flavonoides y aminoácidos aromáticos (vía

shikimato), contribuyendo a la resistencia estructural y a la defensa contra patógenos. Además, el Mn está asociado a la regulación de la formación de la pared celular y al funcionamiento del meristemo apical, especialmente en tejidos de crecimiento activo.

Síntomas de deficiencia

La deficiencia de Mn en el cafeto se manifiesta inicialmente por clorosis internerval en las hojas jóvenes, generalmente con un aspecto más claro que la deficiencia de Fe, y puede evolucionar a manchas necróticas puntiformes. Hay una reducción significativa de la tasa fotosintética, una disminución en la acumulación de carbohidratos y alteraciones en la ultraestructura de los cloroplastos, que pueden ser irreversibles en casos graves.

Fitotoxicidad

El exceso de manganeso, más común en suelos ácidos y mal drenados, puede reducir la absorción de hierro (Fe) y zinc (Zn) por antagonismo iónico. Los síntomas foliares incluyen manchas marrón-negruzcas, necrosis marginal y, en casos graves, deformaciones foliares. En niveles tóxicos, también puede afectar negativamente al sistema radicular.

Fuentes de fertilización

Sulfato de manganeso, cloruro de manganeso y quelatos de Mn (por ejemplo, EDTA-Mn), aplicados al suelo (en surcos o hoyos) o por vía foliar, según el diagnóstico visual o el análisis foliar/del suelo. En suelos ácidos, se recomienda un manejo conjunto con el encalado para evitar la toxicidad.

COBRE (Cu)

Función fisiológica

El cobre (Cu) es un micronutriente esencial que actúa como cofactor de la plastocianina, proteína clave en el transporte de electrones entre el fotosistema II y el fotosistema I, etapa crítica de la fotosíntesis. Participa en diversas enzimas oxidorreductasas, incluida la superóxido dismutasa Cu/Zn (Cu/Zn-SOD), que actúa en la detoxificación de especies reactivas

de oxígeno (ROS), protegiendo contra el estrés oxidativo. Las enzimas dependientes del Cu, como la polifenol oxidasa, catalizan la oxidación de compuestos fenólicos, promoviendo la lignificación y reforzando la rigidez y la integridad de la pared celular, especialmente en los tejidos xilemáticos y floemáticos. De este modo, el Cu integra procesos relacionados con el metabolismo energético, la formación y el fortalecimiento de los tejidos conductores y la defensa enzimática contra los patógenos.

Síntomas de deficiencia

La deficiencia de Cu en el cafeto se manifiesta por hojas pálidas, a menudo con márgenes marrones o necrosados, crecimiento atrofiado y acortamiento de los entrenudos. Puede producirse una acumulación de fenoles no oxidados, una menor lignificación y una mayor susceptibilidad a las infecciones fúngicas y bacterianas. En casos graves, las ramas jóvenes pueden presentar marchitez y necrosis apical.

Fitotoxicidad

El exceso de Cu, más común en suelos con antecedentes de uso intensivo de fungicidas cúpricos o con baja capacidad de adsorción, puede causar antagonismo con el zinc (Zn) y el hierro (Fe), reduciendo su absorción. La fitotoxicidad puede manifestarse como clorosis generalizada y reducción del crecimiento debido al bloqueo de otros micronutrientes.

Fuentes de fertilización

Sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), óxido cúprico (CuO), óxido cuproso (Cu_2O), oxiclورو de cobre ($3\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{CuCl}_2$) y nitrato de cobre [$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$], aplicados preferentemente de forma localizada y en dosis controladas para evitar una acumulación excesiva en el suelo.

ZINC (Zn)

Función fisiológica

En el cafeto (*Coffea arabica*), el zinc (Zn) actúa como cofactor esencial en diversas enzimas relacionadas con la fotosíntesis, el metabolismo de

las hormonas vegetales y el equilibrio antioxidante. Es un componente fundamental de la carbonato anhidrasa, que cataliza la interconversión entre el CO_2 y el bicarbonato, favoreciendo la asimilación del carbono en las hojas. Participa en la superóxido dismutasa Zn/Cu (Cu/Zn-SOD), responsable de la neutralización de los radicales superóxido (O_2^-), protegiendo las células contra el daño oxidativo.

El Zn también estimula la biosíntesis de auxinas a partir del triptófano, favoreciendo el crecimiento vegetativo, el alargamiento de los entrenudos y la formación de raíces laterales, lo que repercute directamente en la arquitectura de la planta. Además, unos niveles adecuados de Zn preservan la integridad de las membranas celulares y reducen la peroxidación lipídica, contribuyendo a la eficiencia fisiológica y a la productividad sostenida.

Los estudios demuestran que la aplicación foliar de Zn, especialmente en forma de sulfato de zinc o nanopartículas de óxido de zinc (ZnO), aumenta la concentración foliar del nutriente, eleva las tasas fotosintéticas, incrementa el contenido de clorofila y promueve una mayor acumulación de biomasa foliar.

Síntomas de deficiencia

Hojas más pequeñas y estrechas, clorosis generalizada o internerval, acortamiento de los entrenudos, mala división y expansión celular, además de acumulación de azúcares no metabolizados en los tejidos afectados.

Fitotoxicidad

El exceso de Zn puede retrasar el desarrollo vegetal, antagonizar la absorción de hierro (Fe) y cobre (Cu) e inducir necrosis o síntomas visuales similares a la deficiencia de otros micronutrientes.

Fuentes de fertilización

Sulfato de zinc (ZnSO_4), óxido de zinc (ZnO), cloruro de zinc (ZnCl_2), nitrato de zinc [$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$] y quelatos sintéticos como Zn-EDTA. La aplicación puede realizarse por vía edáfica o foliar, debiéndose ajustar las dosis según el análisis del suelo y del tejido para evitar la toxicidad.

BORO (B)

Función fisiológica

Aunque no forma parte directamente de las enzimas, el boro (B) es crucial en la formación de puentes entre las moléculas de pectina de la pared celular, estabilizando su estructura y permeabilidad, lo que confiere estabilidad y regula la porosidad de la pared celular. Desempeña un papel importante en el transporte de carbohidratos a través del floema, en el mantenimiento de la integridad de las membranas celulares y en la viabilidad y el crecimiento del tubo polínico, siendo indispensable para la fertilización y el llenado de los frutos. En el cafeto (*Coffea arabica*), el boro influye directamente en la maduración de la floración, la adherencia y la uniformidad de los frutos, lo que repercute en la calidad final del grano. Esto se debe principalmente a su participación en la translocación de azúcares, la división celular y la diferenciación de los meristemos.

Síntomas de deficiencia

Aborto floral, caída de flores y frutos, muerte del meristemo apical, deformación de los frutos, hojas nuevas gruesas y quebradizas, y menor intensidad de fructificación. En casos graves, puede producirse una paralización del crecimiento apical.

Fitotoxicidad

El exceso de boro, generalmente asociado a aplicaciones foliares o fertilizaciones mal calibradas, provoca necrosis de los márgenes foliares, clorosis generalizada y una reducción acusada de la productividad. Dado que el margen entre la deficiencia y la toxicidad es estrecho, la aplicación debe controlarse rigurosamente.

Fuentes de fertilización

Ácido bórico, bórax (tetraborato de sodio) y ulexita (minerales boratados, utilizados preferentemente vía suelo). Las aplicaciones pueden realizarse vía suelo, en dosis bajas y bien distribuidas, y/o vía foliar en situaciones de deficiencia diagnosticada.

MOLIBDENO (Mo)

Función fisiológica

El molibdeno (Mo) es un micronutriente esencial que forma parte del centro activo de enzimas clave en el metabolismo del nitrógeno, como la nitrato reductasa (NR) y la nitrogenasa. La nitrato reductasa cataliza la reducción del nitrato (NO_3^-) a nitrito (NO_2^-), que posteriormente se convierte en amonio (NH_4^+), etapa fundamental para la síntesis de aminoácidos y proteínas. La nitrogenasa, presente en microorganismos fijadores de nitrógeno, depende de un cofactor molibdeno-hierro (FeMo-co), siendo crucial para la fijación biológica del nitrógeno (FBN) en sistemas consorciados con leguminosas. En el café, aunque no se produce la FBN directa, el Mo optimiza el aprovechamiento del nitrógeno procedente tanto de la fertilización mineral como de la mineralización de la materia orgánica, favoreciendo la síntesis proteica y la fotosíntesis. Su absorción se produce predominantemente en forma de molibdato (MoO_4^{2-}), que presenta movilidad tanto en el xilema como en el floema, lo que permite la redistribución interna y contribuye a la eficiencia en el uso del N.

Síntomas de deficiencia

Clorosis difusa en las hojas más viejas, reducción del crecimiento y la producción, acumulación de nitrato en los tejidos debido a la menor actividad de la nitrato reductasa y, en casos más graves, necrosis marginal. En las plántulas, puede provocar síntomas similares a la deficiencia de nitrógeno, pero con altos contenidos foliares de NO_3^- .

Fitotoxicidad

La toxicidad por molibdeno es extremadamente rara en sistemas agrícolas, y suele producirse solo en suelos con aplicación excesiva o contaminación industrial. En niveles muy elevados, puede causar un desequilibrio en la absorción de cobre (Cu) y otros metales, lo que da lugar a antagonismos nutricionales.

Fuentes de fertilización

Molibdato de amonio $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ y molibdato de sodio $(\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O})$, aplicados al suelo. La aplicación foliar también es eficaz, especialmente en viveros o en situaciones de deficiencia confirmada.

CLORO (Cl)

Función fisiológica

El cloruro (Cl^-) actúa como cofactor esencial en el fotosistema II, participando en la fotólisis del agua y ayudando a estabilizar el complejo de evolución del oxígeno (*Oxygen Evolving Complex*, OEC), etapa fundamental para la liberación de O_2 y electrones en el proceso fotosintético. También desempeña un papel importante en la osmorregulación celular, especialmente en las células guardianas de los estomas, donde acompaña el flujo de potasio (K^+) para regular la apertura y el cierre estomático, contribuyendo al control de los intercambios gaseosos y la transpiración.

El Cl^- influye también en la actividad de las ATPasas de membrana, como la V-ATPasa del tonoplasto, modulando el turgor celular, la eficiencia en el uso del agua y la tolerancia a estreses moderados, como el déficit hídrico y la salinidad. Aunque se requiere en cantidades relativamente mayores que otros micronutrientes (en concentraciones cercanas a los macronutrientes secundarios), su papel es específico e indispensable para la fisiología y la homeostasis iónica de las plantas.

Síntomas de deficiencia

La deficiencia de Cl^- en el café se manifiesta por una menor apertura estomática, reducción de la turgencia foliar, menor tolerancia a la sequía y disminución de la eficiencia fotosintética. Visualmente, puede producirse clorosis difusa, bronceado foliar, marchitez parcial y crecimiento radicular reducido.

Fitotoxicidad

El exceso de Cl^- , especialmente cuando la concentración foliar supera aproximadamente el 0,35-0,50 % de la materia seca, puede provocar necrosis marginales, marchitamiento y síntomas similares al estrés salino, incluyendo deshidratación foliar y reducción del crecimiento.

Fuentes de fertilización

La suplementación de cloro suele venir «a cuestras» con la suplementación de otros nutrientes. Cloruro de potasio (KCl), cloruro de calcio (CaCl_2), cloruro de magnesio (MgCl_2). La aplicación debe tener en cuenta el equilibrio iónico del sistema y la conductividad eléctrica (CE) del suelo, con el fin de evitar la salinidad excesiva y la toxicidad.



DINÁMICA DE LOS NUTRIENTES EN EL PERFIL DEL SUELO E INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

La eficiencia con la que los nutrientes se ponen a disposición de las raíces está directamente relacionada con la dinámica físico-química del suelo, que determina la movilidad y la retención de los elementos esenciales. En un Latosolo típico de las regiones cafeteras tropicales, los horizontes superficiales concentran la mayor parte de la materia orgánica y los nutrientes minerales en forma disponible, mientras que los horizontes subsuperficiales constituyen reservas minerales que pueden abastecer a la planta de forma gradual mediante la exploración radicular profunda. En este contexto, procesos como la mineralización de la materia orgánica, la adsorción a coloides, los intercambios iónicos, la fijación en minerales primarios (en particular óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio) y las pérdidas por lixiviación controlan la disponibilidad de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y micronutrientes.

La textura del suelo, definida por la proporción relativa de arena, limo y arcilla, desempeña un papel decisivo en la disponibilidad y la dinámica de los nutrientes. En los latosoles de textura arcillosa, la elevada superficie específica y el predominio de microporos favorecen la adsorción de nutrientes, como el fósforo (P), que se une fuertemente a los óxidos e hidróxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al), lo que reduce su disponibilidad en la solución del suelo, incluso cuando el contenido total es elevado. Por el contrario, los suelos más arenosos tienen menor capacidad de adsorción, pero son más susceptibles a las pérdidas por lixiviación de formas móviles, como el nitrato (NO_3^-) y el potasio (K^+), especialmente en condiciones de riego frecuente o precipitaciones intensas. Además, la porosidad, en particular la relación entre macroporos y microporos, influye directamente

en la infiltración y el almacenamiento de agua, la aireación del perfil y la capacidad del sistema radicular para acceder a reservas más profundas de nutrientes.

La estructura y la agregación del suelo desempeñan un papel fundamental en la regulación de la dinámica de los nutrientes. Los agregados estables, especialmente en forma granular, protegen la materia orgánica contra la descomposición acelerada, favorecen la liberación gradual de nutrientes, aumentan la disponibilidad de agua para las raíces y reducen la susceptibilidad a la erosión. La estabilidad estructural no solo es resultado de la presencia de materia orgánica, sino también de la intensa actividad biológica, incluyendo el crecimiento radicular, la acción de microorganismos y el entrelazamiento de hifas fúngicas, así como de la presencia de cationes polivalentes, como el calcio (Ca^{2+}) y el magnesio (Mg^{2+}), que promueven la formación de puentes iónicos entre las partículas. Por el contrario, los suelos compactados o con estructura degradada presentan una reducción de la porosidad total y de los macroporos, un drenaje deficiente, una menor actividad biológica y una menor capacidad de retención y reciclaje de nutrientes, lo que favorece las pérdidas por escorrentía superficial y compromete la sostenibilidad del sistema productivo.

La textura arcillosa, asociada a una elevada capacidad de intercambio catiónico (CTC) y al contenido de materia orgánica, influye no solo en la disponibilidad de macronutrientes, sino también en la de micronutrientes esenciales como el hierro (Fe), el manganeso (Mn), el zinc (Zn), el cobre (Cu) y el boro (B). En los latosoles tropicales, la alta concentración de óxidos e hidróxidos de Fe y Al promueve una fuerte adsorción de fósforo (P) y de micronutrientes como Fe y Mn en condiciones de pH ácido, reduciendo su solubilidad y disponibilidad, incluso cuando las reservas totales son elevadas. La materia orgánica, por su parte, contribuye al aumento de la CTC orgánica y forma complejos estables con Zn y Cu, elevando su disponibilidad y minimizando los riesgos de fitotoxicidad. En los sistemas cafetaleros, prácticas como el mantenimiento de mantillo natural o el cultivo asociado con gramíneas han demostrado su potencial para aumentar la retención y la movilización de Fe y Mn en las capas superficiales, favoreciendo la nutrición de la planta durante las etapas fenológicas de alta demanda, como la fase reproductiva.

El pH del suelo es uno de los principales reguladores de la disponibilidad de nutrientes. En los latosoles tropicales, que suelen presentar un pH inferior a 5,5, la solubilidad del hierro (Fe), el aluminio (Al) y el manganeso (Mn) aumenta significativamente, lo que puede intensificar la fijación del fósforo (P) por el Al y el Fe y, en el caso del Mn, provocar toxicidad en condiciones severas. Por el contrario, micronutrientes como el zinc (Zn), el cobre (Cu) y el boro (B) presentan una menor disponibilidad en pH ácido, mientras que el molibdeno (Mo), generalmente absorbido como molibdato (MoO_4^{2-}), también ve reducida su vida media y su aprovechamiento. La corrección de la acidez del suelo mediante el encalado aumenta la disponibilidad de P y de diversos micronutrientes, además de crear un ambiente más favorable para el desarrollo radicular y la actividad microbiana, optimizando el ciclo de los nutrientes.

La materia orgánica (MO) es un componente esencial en la retención y el ciclo de los nutrientes. Proporciona sitios adicionales de intercambio catiónico, actúa como reserva de nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) y diversos micronutrientes que se liberan gradualmente por mineralización, además de mejorar la capacidad de retención de agua y la estabilidad estructural del suelo. En sistemas cafetaleros integrados con cultivos de cobertura, como la brachiaria (*Urochloa decumbens*), se observa un aumento en la retención de nutrientes en el perfil, un aumento de la actividad enzimática del suelo (como la ureasa y la fosfatasa), una mayor incorporación de OM y una reducción de las pérdidas de N y P por lixiviación. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es naturalmente elevada en suelos arcillosos con contenidos adecuados de MO, presentando una fuerte correlación con la fertilidad natural y la resiliencia del sistema productivo.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), resultante de la interacción entre la fracción arcillosa y la materia orgánica (MO), define la cantidad de cationes, como calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y amonio (NH_4^+), que pueden retenerse en el complejo coloidal del suelo, reduciendo las pérdidas por lixiviación y contribuyendo a la estabilidad del pH y la fertilidad. Los suelos con una CTC elevada tienen una mayor reserva de nutrientes disponibles para las plantas; sin embargo, la aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados, especialmente en forma de amoníaco, puede promover la acidificación del suelo, elevar la

concentración de aluminio tóxico (Al^{3+}) y, en consecuencia, perjudicar la absorción radicular y la disponibilidad de fósforo (P).

El proceso de mineralización y el ciclo mediado por microorganismos convierten la materia orgánica (MO) y los residuos vegetales en formas minerales asimilables por las plantas: nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) para el nitrógeno (N); fosfatos solubles para el fósforo (P); además de micronutrientes previamente adsorbidos, que se liberan de forma gradual. La intensidad de esta actividad microbiana está directamente relacionada con el contenido de MO, el pH moderado, la aireación adecuada y la disponibilidad de humedad, atributos que dependen de la estructura y la porosidad del suelo. En los sistemas cafetaleros, las prácticas regenerativas que elevan el contenido de MO han demostrado tener un efecto positivo sobre la eficiencia en el uso de fertilizantes y sobre la sostenibilidad de la nutrición mineral.

Estos parámetros están directamente relacionados con el manejo de los fertilizantes nitrogenados. En sistemas irrigados o sometidos a altas dosis de fertilización nitrogenada, la distribución vertical del nitrato (NO_3^-) y de la materia orgánica, asociada a la percolación del agua en períodos de alta precipitación, hace que la estructura física y química del suelo sea determinante para la mitigación de las pérdidas.

Una de las primeras dimensiones que se deben evaluar es la dinámica del nitrógeno (N) en el perfil del suelo. En los sistemas cafetaleros, las investigaciones muestran que tanto el manejo del dosel como el tipo de fertilizante nitrogenado utilizado, ya sea orgánico, inorgánico o combinado, influyen significativamente en la distribución vertical del amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-), además de afectar a la biomasa microbiana responsable de la mineralización. En sistemas agroforestales de café en Indonesia, por ejemplo, los árboles sometidos a poda presentaron un aumento del 10 % al 56 % en el N total del suelo y en la biomasa microbiana en la capa de 0-20 cm, como resultado del rápido retorno de los residuos vegetales al suelo y de la intensificación de la actividad biológica. Por el contrario, las áreas sin poda presentaron mayores concentraciones de NO_3^- y NH_4^+ a profundidades de 20-40 cm. Estos resultados refuerzan la interacción entre las prácticas de manejo físico, como la poda, y las propiedades químicas del suelo, como el contenido de materia orgánica total (MAT), la biomasa microbiana de N (NBM) y las formas minerales de N, en la retención y el ciclo de los nutrientes.

Paralelamente, la dinámica del fósforo (P) en latosoles tropicales de textura arcillosa está fuertemente influenciada por la intensa adsorción del nutriente a óxidos e hidróxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al) en condiciones de pH ácido, lo que restringe su disponibilidad, incluso cuando los contenidos totales en el suelo son elevados. Estudios recientes con fertilizantes de liberación controlada (CRF) y mezclas físicas de MAP (fosfato monoamónico) han dado buenos resultados en la fase de establecimiento del cafeto, promoviendo la liberación gradual de P durante hasta seis meses y dando lugar a aumentos consistentes del área foliar, la biomasa y los contenidos de P en el suelo, de forma proporcional a la dosis aplicada. Estos resultados ilustran cómo el perfil físico-químico del suelo, la mineralogía de la fracción arcillosa y el pH desempeñan un papel determinante en la eficiencia de la fertilización fosfatada.

Además, la fertilización foliar puede estimular la síntesis de enzimas clave, como las fosfatasas y las reductasas, favoreciendo el aprovechamiento del fósforo (P) y el nitrógeno (N) directamente por las hojas, independientemente de su disponibilidad en el suelo, aspecto particularmente relevante en condiciones de compactación o alta acidez. Como práctica de manejo, se recomienda realizar análisis foliares antes del período de floración, con el fin de obtener un diagnóstico nutricional rápido y preciso. A partir de estos resultados, la aplicación foliar debe calibrarse en cuanto a la dosis y el pH del caldo (mantenido entre 5,0 y 6,0) para evitar la fitotoxicidad y garantizar una movilidad adecuada en el floema.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) actúa como un amortiguador natural de las variaciones en la disponibilidad de cationes esenciales, como potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y amonio (NH_4^+). Los suelos con mayor contenido de arcilla y materia orgánica presentan una CTC más elevada, lo que contribuye a estabilizar el pH, preservar los nutrientes en el complejo coloidal y reducir las pérdidas por lixiviación, lo que se traduce en una menor variación en los contenidos de las formas disponibles, factor particularmente importante en condiciones de alta pluviosidad o riego frecuente. En el cultivo del café, prácticas como el mantenimiento de la cobertura viva con la plantación de gramíneas entre hileras favorecen la acumulación de materia orgánica y el aumento de la

CTC, además de promover una mayor retención de nutrientes y mejorar la estabilidad de los agregados del suelo.

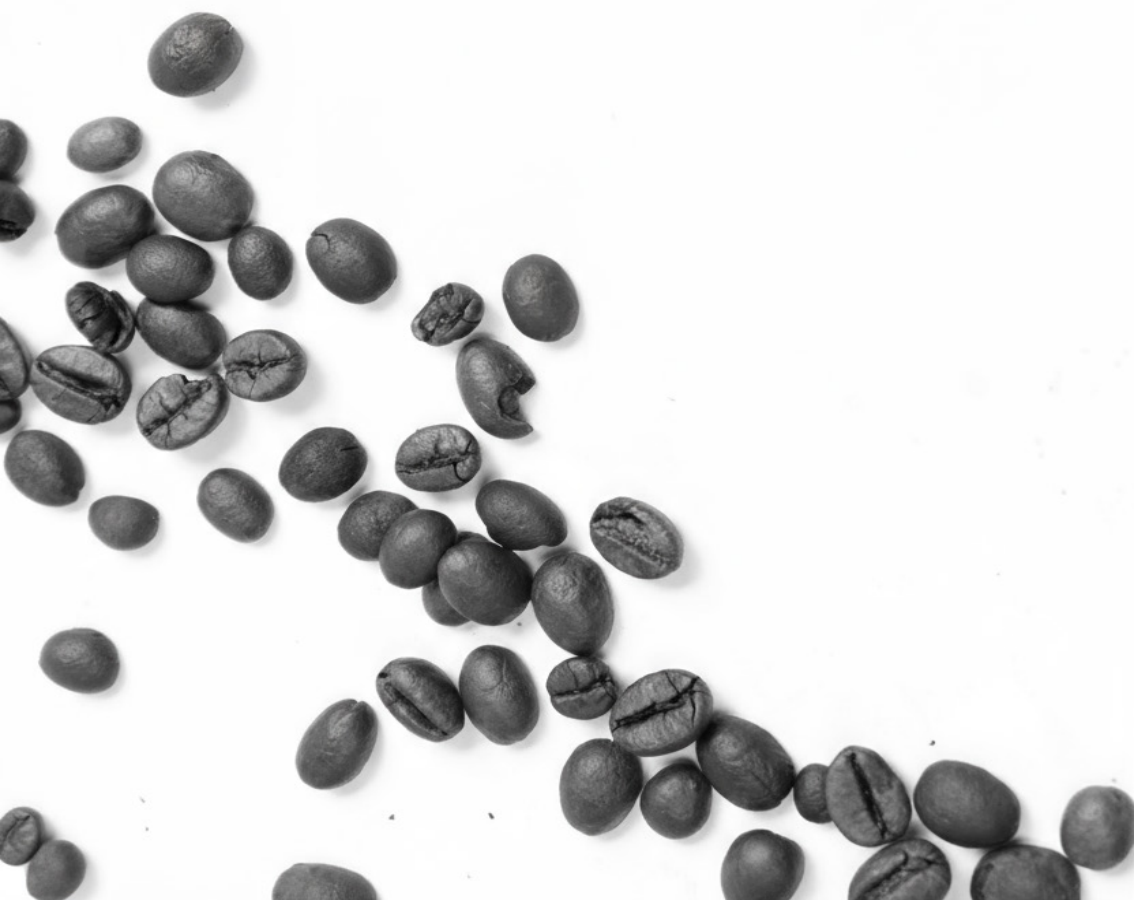
La estructura física del suelo, caracterizada por la distribución y estabilidad de los agregados, influye directamente en procesos como la infiltración y el almacenamiento de agua, la aireación, la resistencia a la erosión y la movilidad de los solutos. Los agregados granulares estables reducen la pérdida acelerada de materia orgánica y nutrientes, contribuyendo a una matriz nutritiva más equilibrada. En los latosoles con plantaciones recientes de café, prácticas como la aplicación de yeso agrícola, el uso de cubiertas vegetales y la fertilización con fertilizantes organominerales han demostrado su potencial para mejorar la estabilidad de los agregados y la organización del espacio poroso, favoreciendo el crecimiento radicular y la conservación de nutrientes a lo largo del perfil.

Otro aspecto fundamental es la porosidad del suelo y su densidad aparente, que determinan el equilibrio entre los macroporos, esenciales para el drenaje y la oxigenación, y los microporos, responsables de la retención del agua disponible para las plantas. Los suelos compactados presentan una alta densidad aparente, una menor proporción de macroporos y, en consecuencia, una restricción del crecimiento radicular, lo que dificulta el ciclo y la absorción de nutrientes. Los suelos de textura arcillosa tienden a presentar un mayor volumen de microporos, lo que favorece la retención de agua, mientras que los suelos arenosos presentan una mayor proporción de macroporos, lo que favorece un drenaje rápido, pero aumentando el riesgo de lixiviación de formas móviles de nutrientes, como el nitrato (NO_3^-) y el potasio (K^+), especialmente cuando la estructura es deficiente.

La materia orgánica (MO) actúa como un depósito de liberación lenta de nutrientes, incluyendo nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) y diversos micronutrientes. Además, contribuye al aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y estimula la actividad de la microflora del suelo, así como de enzimas como la ureasa y la fosfatasa, que participan activamente en los ciclos biogeoquímicos. En los sistemas cafetaleros que presentan un incremento gradual de la OM, ya sea por el mantenimiento de la cobertura vegetal o por el uso de abonos verdes, se observa una mayor retención de minerales en el perfil, una reducción de las pérdidas por lixiviación y un aumento de la actividad biológica, lo que favorece el ciclo de los nutrientes y la estabilidad del sistema productivo.

Las propiedades químicas del suelo, como el pH, la conductividad eléctrica (CE) y la composición mineralógica de la fracción arcillosa, ejercen una fuerte influencia sobre la solubilidad, la adsorción y la fijación de nutrientes. En condiciones de pH ácido, iones como el aluminio (Al^{3+}) y el hierro (Fe^{3+}) se vuelven predominantes en la solución del suelo y promueven la fijación del fósforo (P), reduciendo su disponibilidad; el molibdeno (Mo), absorbido en forma de molibdato (MoO_4^{2-}), también presenta una disponibilidad reducida en estas condiciones. La corrección de la acidez mediante el encalado eleva el pH, aumentando la disponibilidad de P y de varios micronutrientes, además de estimular la actividad biológica y mejorar las condiciones para el crecimiento radicular. Por su parte, los valores elevados de EC pueden indicar riesgo de salinidad, lo que afecta a la retención de potasio (K) y a la movilidad iónica en el suelo.

En resumen, la interacción entre las propiedades físicas y químicas del suelo es dinámica e interdependiente. La textura y la agregación influyen en la estructura, la porosidad y el drenaje; la materia orgánica contribuye al aumento de la CTC, a la mejora de la estructura y a la formación de reservas de nutrientes; el pH regula la solubilidad y la adsorción de los elementos; y la CTC determina la capacidad de retención de cationes en el complejo coloidal. Esta red de interacciones condiciona la disponibilidad de nutrientes en cada horizonte del perfil y, en consecuencia, la eficiencia de la nutrición mineral del café.



MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO Y DEL ESTADO NUTRICIONAL DEL CAFETO

En la cafeicultura, maximizar la productividad, la calidad y la rentabilidad requiere diagnósticos precisos tanto del suelo como de las plantas. Los análisis aislados, solo del suelo o solo foliares, reducen la eficacia de las recomendaciones de fertilización. Un suelo puede presentar contenidos adecuados de nutrientes, pero si existen restricciones físicas, químicas o fisiológicas que limitan la absorción por las raíces, se produce un desperdicio de insumos y un riesgo de desequilibrios nutricionales. De manera similar, concentraciones adecuadas de nutrientes en las hojas pueden ocultar deficiencias en el suelo o indicar desequilibrios en las relaciones entre los elementos. Por ello, el diagnóstico integrado suelo-hoja se consolida como una práctica esencial en la gestión nutricional del cafeto.

En sistemas de café arábica en latosoles tropicales, con elevada acidez y bajo contenido de materia orgánica, el análisis combinado del suelo y del tejido vegetal permite interpretar con mayor precisión el estado nutricional del cultivo. Este enfoque se complementa con métodos de interpretación consolidados, rangos de suficiencia y nivel crítico y, cuando se desea una mayor sensibilidad a los desequilibrios entre elementos en la planta, con el uso del DRIS en el análisis foliar. Este conjunto sustenta decisiones más acertadas de corrección y fertilización a lo largo del ciclo productivo.

MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO

Muestreo y laboratorio

La representatividad del análisis comienza en la recolección. En parcelas homogéneas, se recomienda componer la muestra con un mínimo

de veinte submuestras por parcela, recolectadas en la capa de cero a veinte centímetros y, periódicamente, también en la capa de veinte a cuarenta centímetros para evaluar posibles limitaciones en la subsuperficie. La recolección después de la cosecha es una práctica habitual para planificar la corrección y la fertilización del nuevo ciclo. En los laboratorios, los análisis incluyen el pH, la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, las bases intercambiables (calcio, magnesio y potasio), el fósforo extraíble y micronutrientes como zinc, cobre, hierro, manganeso y boro.

Interpretación tradicional y rangos adecuados en el suelo

Los niveles críticos y los rangos de suficiencia se definen por consenso regional y ensayos de calibración. Para el café, los manuales y estudios regionales indican un pH del suelo deseable cercano a 5,5-6,0, con una saturación por bases ajustada en función de la capacidad de intercambio a pH 7: en suelos de baja capacidad, se necesitan objetivos de saturación más altos (~80 %) para alcanzar el pH adecuado; en suelos de capacidad media, objetivos intermedios del 60-70 %; y en suelos de buena capacidad, los objetivos en torno al 60 % suelen ser suficientes.

Para los contenidos de nutrientes del suelo obtenidos con el extractor Mehlich-1, las referencias ampliamente utilizadas en la cafeicultura brasileña indican, como guías prácticas: fósforo disponible adecuado cuando es superior a 20 mg dm⁻³; potasio con clase media entre 100 y 160 mg dm⁻³ y alto por encima de este intervalo; calcio entre 1,5 y 3,0 cmol de carga por dm⁻³ y magnesio entre 0,5 y 1,0 cmol de carga por dm⁻³; azufre entre 5,0 y 10,0 mg dm⁻³; zinc entre 1,5 y 3, mg dm⁻³. Estos valores orientan el ajuste de la cal y la fertilización de mantenimiento, teniendo siempre en cuenta el historial y los objetivos de productividad.

DIAGNÓSTICO DEL ESTADO NUTRICIONAL DEL CAFETO

Recolección de la muestra foliar

Se muestrean hojas completamente expandidas en el tercer o cuarto par en la porción media de la planta en un período estandarizado, recordando que el análisis foliar puede realizarse en cualquier momento, siempre que se sigan los patrones de referencia para cada época. Para cultivos en producción,

se recomienda recolectar cuatro hojas por planta en al menos veinticinco plantas por parcela homogénea, lo que suma un total de aproximadamente cien hojas por muestra compuesta. Se evitan las plantas con síntomas de plagas, enfermedades o daños mecánicos, y la recolección no debe realizarse inmediatamente después de las pulverizaciones.

Rangos de suficiencia foliar

Los contenidos obtenidos se comparan con los rangos de suficiencia establecidos regionalmente para las hojas recolectadas en la época recomendada. Las síntesis de trabajos clásicos sobre el arábica indican como intervalos de referencia frecuentes: nitrógeno entre 28,0 y 32,0 g kg⁻¹; fósforo entre 1,5 y 2,0 g kg⁻¹; potasio entre 16,0 y 31,0 g kg⁻¹; calcio entre 10,0 y 19,0 g kg⁻¹; magnesio entre 3,5 y 5,0 g kg⁻¹; azufre entre 1,5 y 2,0 g kg⁻¹. Para micronutrientes, boro entre cincuenta y ochenta miligramos por kilogramo; zinc entre seis y veinticuatro miligramos por kilogramo; cobre entre diez y veinte miligramos por kilogramo; hierro entre ochenta y uno y ciento veinticuatro miligramos por kilogramo; manganeso entre ochenta y nueve y ciento ochenta y dos miligramos por kilogramo.

Interpretación por rangos críticos y por el DRIS

Los rangos críticos relacionan el contenido foliar y la productividad y son directos y operativos. Por su parte, el DRIS (Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación) interpreta el equilibrio entre los nutrientes en la hoja, generando índices para cada elemento: los valores más negativos sugieren una mayor probabilidad de limitación relativa, mientras que los positivos pueden reflejar un exceso relativo en el balance. En el café, el DRIS ha demostrado una buena capacidad para discriminar los cultivos en cuanto al orden de limitación nutricional y orientar ajustes precisos en la fertilización, sobre todo cuando hay desequilibrios entre los elementos.

Ventajas prácticas del DRIS en la hoja

- Permite clasificar el orden de limitación nutricional, priorizando las intervenciones.

- Reduce el riesgo de fertilización excesiva o insuficiente al considerar las relaciones entre los elementos, no solo los valores absolutos.
- Complementa los rangos críticos cuando el cultivo presenta múltiples desequilibrios nutricionales.

Correlación suelo-hoja y diagnóstico integrado

Comparar simultáneamente los resultados del suelo y de las hojas ayuda a distinguir las restricciones de disponibilidad en el suelo de los problemas de absorción. Por ejemplo, un nivel adecuado de fósforo en el suelo, pero bajo en las hojas, puede indicar fijación por óxidos de hierro y aluminio o limitaciones del sistema radicular; por otro lado, un nivel elevado de potasio en el suelo sin respuesta foliar puede indicar un desequilibrio con el calcio y el magnesio. Los estudios que relacionan los atributos del suelo y el análisis foliar en arábica refuerzan la utilidad de este cruce para interpretar las respuestas de productividad.

Directrices prácticas y flujo operativo recomendado

1. Después de la cosecha: realizar un muestreo del suelo en capas de 0-20 centímetros y, periódicamente, de 20-40 centímetros. Solicitar un análisis completo e interpretar el pH, la saturación por bases, el fósforo disponible según Mehlich-1, el potasio intercambiable, el calcio, el magnesio y los micronutrientes.

2. Antes de la floración: recolectar hojas recién maduras según el protocolo indicado e interpretar según los intervalos de suficiencia; cuando se desee una mayor sensibilidad a los desequilibrios, calcular los índices DRIS.

3. Integración suelo-hoja: cruzar los resultados para priorizar las correcciones y los abonos de mantenimiento, distinguiendo la falta de disponibilidad en el suelo de las limitaciones de absorción.

4. Aplicaciones: privilegiar la fertilización vía suelo para los macronutrientes y considerar suplementos foliares para micronutrientes críticos, como zinc o boro, cuando lo indique el diagnóstico.

5. Monitoreo: repetir el análisis del suelo y foliar en ventanas consistentes del ciclo, manteniendo un historial por parcela para detectar tendencias y ajustar el manejo en cada cosecha.

PRÁCTICAS DE ENCALADO Y YESADO EN EL CULTIVO DEL CAFÉ: EFECTOS Y RECOMENDACIONES

El manejo de la acidez del suelo es un factor crítico en el cultivo del café, especialmente en regiones tropicales con suelos naturalmente ácidos, como los latosoles ampliamente presentes en Brasil. El encalado y el yesado son prácticas esenciales para mantener altos rendimientos, restaurar el equilibrio químico y ampliar la exploración radicular.

El encalado, realizado con caliza calcítica (carbonato de calcio) o dolomítica (carbonatos de calcio y magnesio), tiene como funciones principales la corrección del pH del suelo y la neutralización del aluminio tóxico (Al^{3+}), además de proporcionar calcio (Ca) y magnesio (Mg) como nutrientes esenciales.

El yeso agrícola ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), por su parte, no altera significativamente el pH del suelo, pero actúa mejorando el ambiente radicular en las capas subsuperficiales. Su efecto principal se produce por la reducción de la toxicidad del aluminio en profundidad, el aumento de la disponibilidad de calcio y el aporte de azufre (S) al sistema radicular.

Estas prácticas influyen no solo en la nutrición mineral de las plantas (especialmente Ca, Mg, S y P), sino que también aportan beneficios físicos, como la mejora de la estructura y la porosidad del suelo, y biológicos, como el estímulo de la actividad microbiana y la agregación de partículas.

Este capítulo profundizará en los mecanismos de acción, los efectos en el cultivo del café, las recomendaciones de aplicación y las normas para un manejo seguro y eficaz de estas prácticas.

CÁLCULO DE LA NECESIDAD DE ENCALADO Y RECOMENDACIÓN DE APLICACIÓN EN EL CULTIVO DEL CAFÉ

La determinación de la necesidad de encalado (NC) constituye una etapa esencial en el manejo químico del suelo para el cultivo del café, ya que la aplicación correcta del correctivo es determinante para neutralizar la acidez, reducir la toxicidad por aluminio y garantizar la disponibilidad de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) en niveles adecuados. En suelos tropicales fuertemente intemperizados, como los Latosolos y Argissoles, la acidez se asocia frecuentemente a altos contenidos de Al^{3+} intercambiable y baja saturación por bases, lo que limita el crecimiento radicular, restringe la absorción de agua y nutrientes y compromete el potencial productivo del cafeto.

La función principal del encalado es neutralizar los iones H^+ y Al^{3+} de la solución y del complejo sorbente del suelo, elevando el pH a valores que minimizan la solubilidad tóxica del aluminio y promueven una mayor disponibilidad de nutrientes, especialmente fósforo (P) y molibdeno (Mo). Simultáneamente, la caliza proporciona Ca^{2+} y Mg^{2+} , elementos indispensables para la estabilidad de la pared celular, el funcionamiento enzimático y el equilibrio catiónico en la rizosfera. Estos efectos químicos también se reflejan en mejoras físicas, como el aumento de la agregación y la porosidad del suelo, y biológicas, con el incremento de la actividad microbiana responsable de procesos clave en el ciclo de los nutrientes.

La estimación de la NC debe basarse en métodos reconocidos que permitan no solo elevar el pH y la saturación por bases, sino también suplir cuantitativamente las necesidades de Ca^{2+} y Mg^{2+} para el desarrollo del cafeto. Se emplean ampliamente dos métodos:

1. Método de neutralización del aluminio intercambiable y suministro de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$

Este método es especialmente indicado para suelos con baja capacidad de intercambio catiónico (CTC), en los que la fijación de cationes básicos puede comprometer la nutrición mineral. La fórmula es:

$$\text{NC (t/ha)} = Y \times \text{Al}^{3+} + [X - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})]$$

donde Al^{3+} , Ca^{2+} y Mg^{2+} corresponden a los contenidos intercambiables (cmolc/dm^3); X es el requisito de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ para el

cultivo ($3,5 \text{ cmolc/dm}^3$ para el café); y Y es un coeficiente que expresa la capacidad tampón del suelo, estimada en función de la textura o del fósforo remanente (P-rem), indicador sensible de la reactividad de los coloides y de la capacidad de adsorción de aniones.

2. Método de saturación por bases (V%)

Más difundido en sistemas agrícolas tropicales, se basa en el aumento de la V% del suelo hasta un valor preestablecido para el cultivo, generalmente del 60% para el cafeto, aunque se pueden adoptar valores entre el 60% y el 70% en función de la CTC y la textura del suelo. La fórmula es:

$$\text{NC (t/ha)} = \frac{T \times (V_e - V_a)}{100}$$

donde T es la CTC a pH 7 (cmolc/dm^3), V_e es la saturación por bases esperada y V_a es la saturación por bases actual.

Una vez obtenida la NC, se considera que el cálculo se ha realizado para un correctivo con PRNT = 100 %, incorporado en la capa de 0-20 cm. Para ajustarse a la realidad del campo, es necesario calcular la cantidad práctica de cal (QC), de acuerdo con las condiciones de aplicación y la calidad del producto:

$$\text{QC (t/ha)} = \text{NC} \times \frac{\text{SC}}{100} \times \frac{\text{PF}}{20} \times \frac{100}{\text{PRNT}}$$

donde SC representa el porcentaje de superficie efectivamente corregida (100 % para el área total, <100 % para la aplicación en franjas), PF es la profundidad de incorporación (cm) y PRNT es el poder relativo de neutralización total del correctivo. En casos de aplicación en hoyos ($40 \times 40 \times 40 \text{ cm}$), se utiliza:

$$\text{QC (g/cova)} = \text{NC (t/ha)} \times 32 \times \frac{100}{\text{PRNT}}$$

La recomendación técnica aconseja calcular la NC mediante los dos métodos, adoptar el valor más bajo y verificar si cumple con el requisito mínimo de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$. Si no lo cumple, se utiliza el valor obtenido mediante el método de neutralización del aluminio. Si el valor final supera la CTC a pH

7, este debe utilizarse como límite máximo, evitando la sobrecalcificación y los riesgos asociados, como la deficiencia inducida de micronutrientes (Zn, Mn, Fe y B) y la reducción de la disponibilidad de potasio (K^+).

EJEMPLO NUMÉRICO APLICADO AL CULTIVO DEL CAFÉ

Parámetros obtenidos por análisis del suelo:

- $Al^{3+} = 1,5 \text{ cmolc/dm}^3$
- $Ca^{2+} = 1,0 \text{ cmolc/dm}^3$
- $Mg^{2+} = 0,5 \text{ cmolc/dm}^3$
- $T = 6,0 \text{ cmolc/dm}^3$
- $V_a = 30 \%$
- $X = 3,5 \text{ cmolc/dm}^3$
- $Y = 2$ (suelo de textura media)
- $SC = 100 \%$ (área total)
- $PF = 20 \text{ cm}$ (incorporación estándar)
- $PRNT = 80 \%$

Método de saturación por bases:

$$NC_1 = \frac{6,0 \times (60 - 30)}{100} = 1,8 \text{ t/ha}$$

Método de neutralización del aluminio:

$$NC_2 = 2 \times 1,5 + (3,5 - (1,0 + 0,5)) = 3,0 + 2,0 = 5,0 \text{ t/ha}$$

La dosis más baja (1,8 t/ha) no cubre la necesidad mínima de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$, por lo que se adopta la dosis de 5,0 t/ha del método de neutralización del aluminio. Como este valor es inferior al CTC ($6,0 \text{ cmolc/dm}^3$), es seguro para su aplicación.

Cantidad práctica de cal (QC):

$$QC = 5,0 \times \frac{100}{100} \times \frac{20}{20} \times \frac{100}{80} = 6,25 \text{ t/ha}$$

Conclusión: aplicar 6,25 t/ha de cal con PRNT del 80 %, incorporada uniformemente en la capa de 0-20 cm.

ENCALADO EN EL CULTIVO DEL CAFÉ: FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y CÁLCULO APLICADO

El enyesado consiste en la aplicación de yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en la capa subsuperficial del suelo (generalmente 20-40 cm) con el objetivo de proporcionar calcio (Ca^{2+}) y azufre (S), además de mejorar el ambiente químico y físico de la rizosfera en profundidad. A diferencia del encalado, el yeso no corrige el pH, pero promueve la movilización de Ca^{2+} por el perfil y reduce la toxicidad del aluminio, factores críticos para el desarrollo radicular y la eficiencia en el uso del agua y los nutrientes. Debido a su alta solubilidad, el yeso actúa rápidamente, especialmente en suelos tropicales muy meteorizados, como los latosoles de Brasil.

Criterios para la indicación del enyesado

Se recomienda la aplicación de yeso cuando, en la capa de 20-40 cm, se da una o más de las siguientes condiciones:

- Saturación por bases (V%) inferior al 35 %;
- Contenido de calcio (Ca^{2+}) inferior a $0,5 \text{ cmolc/dm}^3$;
- Contenido de aluminio (Al^{3+}) superior a $0,5 \text{ cmolc/dm}^3$;
- Saturación por aluminio (m%) elevada, con referencias que mencionan valores $\geq 20 \%$ o $\geq 30 \%$ como límites críticos.

Métodos de cálculo de la aplicación de yeso

1. A partir de la saturación por bases (V%) y CTC

$$\text{NG (kg/ha)} = \frac{(V_e - V_a) \times \text{CTC}}{500}$$

Donde:

- V_e : saturación por bases esperada (%);
- V_a : saturación por bases actual en la capa subsuperficial (%);
- CTC: capacidad de intercambio catiónico de la misma capa (cmolc/dm^3).

2. A partir de la necesidad de encalado (NC)

En este método, primero se estima la NC para la capa de interés (por ejemplo, 20-40 cm) y, a continuación:

$$NG \text{ (t/ha)} = 0,30 \times NC$$

A continuación, se convierte en la cantidad práctica para la aplicación (QG):

$$QG \text{ (t/ha)} = NG \times \frac{SC}{100} \times \frac{PF}{20}$$

Donde:

- SC: porcentaje del área a cubrir (100 % para el área total; 75 % en franjas);
- PF: espesor de la capa corregida (en cm, normalmente 20 cm para una capa de 20-40 cm).

3. Basado en el contenido de arcilla

Para cultivos perennes (como el café):

$$NG = 75 \times \text{arcilla}(\%)$$

Este método, aunque simplista, se utiliza cuando no se dispone de datos químicos detallados.

NUEVA METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA CALCIFICACIÓN — BASADA EN LA SATURACIÓN POR CALCIO (CAIRES & GUIMARÃES, 2018)

Recientemente, se ha propuesto un enfoque innovador basado en el análisis empírico de experimentos de campo con cultivos como el maíz, la soja, el trigo y la cebada, realizados en latosoles bajo siembra directa en la región sur de Brasil. Los autores Caires y Guimarães utilizaron técnicas de minería de datos de experimentos de campo con la aplicación de diferentes dosis de yeso para proponer una nueva metodología de cálculo de la yesación. Los estudios identificaron que las mejores productividades

se obtuvieron cuando la saturación de calcio en el CTC efectivo de la capa de 20-40 cm alcanzaba aproximadamente el 60%.

Basándose en esta constatación, los autores desarrollaron una fórmula que calcula la necesidad de enyesado en función de la diferencia entre la saturación de calcio deseada (60 %) y la existente.

$$NG=(0,6 \times CTC_{ef}-Ca^{2+}) \times 6,4$$

Donde:

- **CTC_{ef}** es la capacidad de intercambio catiónico efectiva;
- **Ca²⁺** es el contenido de calcio intercambiable en la capa de 20-40 cm en cmolc dm⁻³;

Consideraciones técnicas adicionales

La elección del método de enyesado debe basarse en la disponibilidad de indicadores químicos, la profundidad de influencia de la práctica y las condiciones operativas.

La combinación de los enfoques (V%, NC o textura) puede proporcionar referencias convergentes, lo que contribuye a una recomendación más sólida.

El uso excesivo de yeso puede provocar la lixiviación de magnesio (Mg²⁺) y potasio (K⁺), generando desequilibrios nutricionales. Por lo tanto, la condicionalidad de la aplicación es crucial.



MANEJO DE LA MATERIA ORGÁNICA Y EL CARBONO EN EL SUELO DE LA CAFEICULTURA

La materia orgánica del suelo (MOS) es el eje de la fertilidad y la resiliencia física y biológica de los cafetales de Brasil. En los latosoles y argisoles típicos de las regiones cafeteras, la MOS mejora la agregación, aumenta la capacidad de retención de agua, estabiliza la temperatura y amplía la capacidad de intercambio catiónico, efectos que se traducen en una mayor eficiencia en el uso de nutrientes y una menor vulnerabilidad a los veranillos. En términos prácticos, dos vías estratégicas aumentan las reservas y la funcionalidad de la MOS en el cultivo del café: i) insumos orgánicos aplicados en toda la superficie (sobre todo compuestos de origen agrícola) y ii) manejo de plantas de cobertura en la línea y entre líneas; se complementa con iii) el uso criterioso de fertilizantes organominerales, que integran fuentes orgánicas y minerales para modular la disponibilidad y la pérdida de nutrientes, principalmente P y N. Estas prácticas deben decidirse en función del análisis del suelo y de las hojas, del objetivo de productividad y del historial de manejo, siempre ajustadas a la variabilidad del terreno.

En el manejo con compuestos orgánicos de aplicación en toda la superficie, se prioriza el material estable (compuesto maduro) con una relación C:N intermedia, bajo contenido de impurezas y buena higienización. En cafetales adultos, la distribución superficial después de la cosecha aprovecha el período de lluvias posterior para la incorporación gradual, alimentando la biomasa microbiana y reduciendo los picos de mineralización fuera de fase. En áreas susceptibles a la erosión, la aplicación debe seguir la curva de nivel, y la tasa se ajusta al objetivo de aporte de carbono ($\text{kg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y a la necesidad de corrección de

bases, evitando superposiciones con encalado y yesado. Cuando estén disponibles, los compuestos derivados de residuos del propio sistema (paja de café, restos de poda, cáscara/despulpa compostada) cierran ciclos, elevan el MOS lábil y alimentan fracciones más estables a medio plazo. En términos operativos, el mantenimiento de una cobertura superficial continua sobre la franja de proyección de la copa («debajo de la falda») mejora la distribución de las raíces finas activas y reduce las salpicaduras de tierra en los frutos.

Las plantas de cobertura en la línea y entre líneas, especialmente la brachiaria, desempeñan un papel fundamental en la construcción de la MOS y en la estructura física. Los cortes periódicos con orientación de la biomasa hacia la línea del cafeto funcionan como una «alfombra» de carbono y nutrientes, lo que favorece la formación de bioporos, agregados más estables y la infiltración de agua. Ensayos realizados en Minas Gerais muestran que el consorcio de brachiaria entre hileras, manejado mediante corte y con el material lanzado hacia la hilera, disminuye la susceptibilidad a la desagregación y mejora la distribución de los poros; cuando esta cobertura se combina con un enyesado superficial, se produce una mayor exploración radicular en profundidad y un mejor acceso al agua en el perfil, lo que tiene un efecto crítico en años secos. El ajuste fino consiste en elegir especies y densidades que no compitan excesivamente por el agua en invierno y sincronizar los cortes con la fenología del cafeto para maximizar la coincidencia entre la liberación de N y las fases de demanda.

La sincronización del nitrógeno (N) con la fenología del cafeto es decisiva para transformar el MOS y la fertilización en productividad. En secano, un esquema práctico y robusto para cultivos adultos, calibrado mediante análisis de suelo y hoja y por el objetivo de producción, es fraccionar el N en 3 a 5 aplicaciones alineadas con las fases fisiológicas: (1) postcosecha/inicio de las lluvias, priorizando la recomposición de reservas y la brotación; (2) postfloración, para soportar el cuajado; (3) expansión de los frutos (primavera-verano), fase de mayor drenaje; y, cuando sea necesario, (4) complemento en el llenado, observando el riesgo de «lavado» bajo lluvias intensas. En áreas de regadío, la parcelación puede ser aún más fina mediante fertirrigación. En todos los casos, la cobertura viva y la manta orgánica reducen la volatilización y la lixiviación, mejoran

la sincronía suelo-planta y, a menudo, permiten reducir la dosis total sin pérdida de rendimiento. El equilibrio N:K en la cobertura, ajustado a la expectativa de cosecha, es particularmente importante para evitar trastornos fisiológicos y la caída de las hojas.

El fósforo (P) merece una atención especial en los suelos altamente intemperizados de la cafeicultura brasileña. La fuerte interacción P-óxidos de Fe/Al y la estratificación superficial bajo manejo conservacionista exigen una estrategia combinada: corrección de P con fuentes solubles localizadas en la franja de raíces activas; mantenimiento de MOS y cobertura para aumentar la complejación orgánica y reducir la fijación; y uso de organominerales cuando estén disponibles, ya que la matriz orgánica actúa como un «tapón» que libera P gradualmente, crea microzonas de mayor actividad microbiana y puede estabilizar la disponibilidad en 0-10 cm.

En sistemas de siembra directa o con movilización mínima, es común observar un gradiente superficial de P; por lo tanto, el muestreo debe estratificar capas (0-5; 5-10; 10-20 cm) en la línea y entre líneas para no sobreestimar o subestimar el nutriente. En la práctica, al implantar nuevas áreas, la combinación «fósforo en el surco/franja + materia orgánica + protección superficial» tiende a ser más eficiente que las aplicaciones exclusivamente a voleo.

La sinergia entre el yeso agrícola y la cobertura viva merece un lugar en la planificación a medio plazo. El yeso, al proporcionar Ca y S y favorecer el movimiento de Ca^{2+} en profundidad, mejora el ambiente químico del subsuelo y, asociado al aporte constante de raíces y residuos de las cubiertas, promueve una agregación estable, más macroporos en capas por debajo de 20-40 cm y un sistema radicular más profundo y distribuido. Los ensayos de campo en Latosolos mostraron precisamente este efecto: dosis elevadas de yeso aplicadas en superficie, combinadas con el manejo de brachiaria entre líneas, aumentaron la estabilidad de los agregados y la exploración radicular, conectando el beneficio químico (Ca/S en profundidad, menor actividad de Al^{3+}) con el beneficio físico (bioporos y porosidad funcional). En términos prácticos, el enyesado debe seguir las recomendaciones técnicas (perfil, contenido de arcilla, V% y necesidad de Ca/S) y estar acompañado de una cobertura activa; sin biomasa y raíces, parte de la ganancia estructural se pierde.

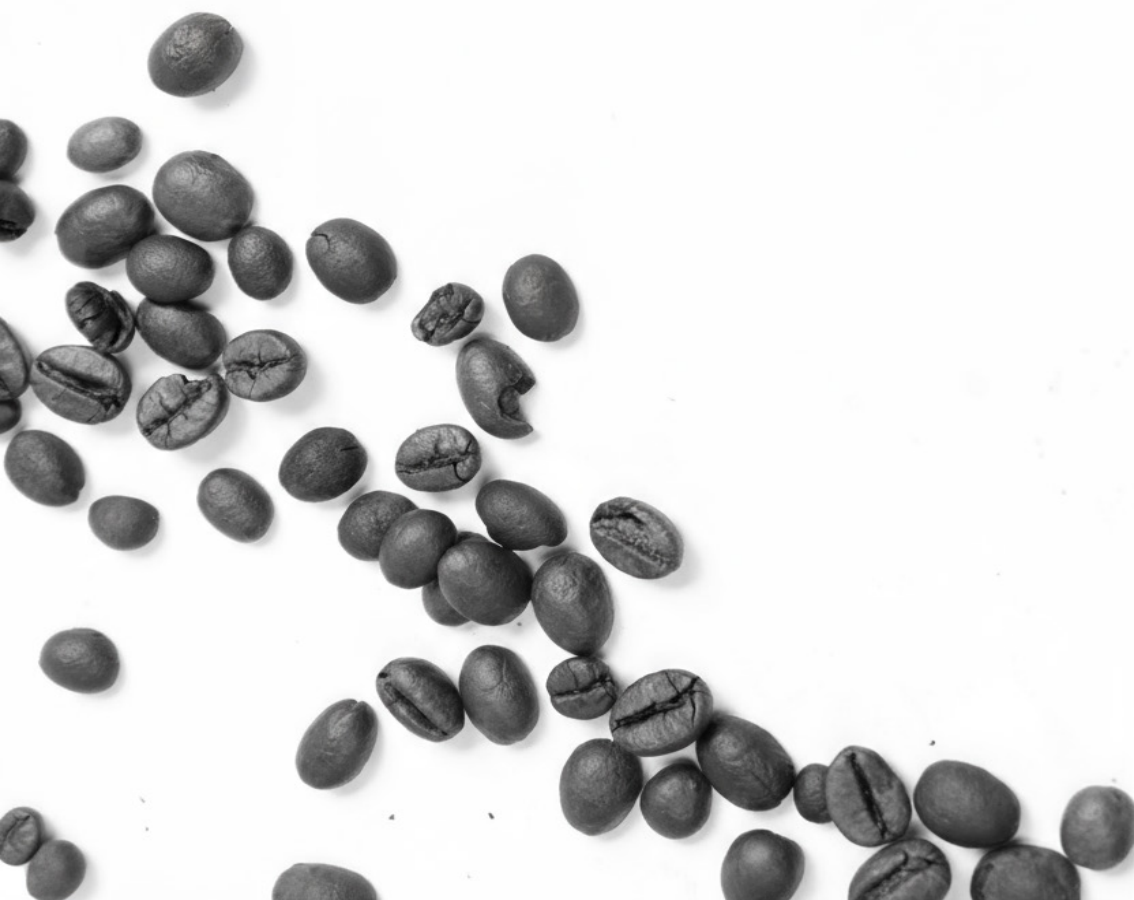
La variabilidad espacial dentro de la parcela es la norma, no la excepción, en cafetales de relieve ondulado y suelos con variación de arcilla y posición en la ladera. La incorporación de principios de agricultura de precisión mejora el rendimiento de las prácticas de MOS y fertilización. Un protocolo eficaz es: (i) utilizar el relieve/conductividad aparente y los mapas de producción o vigor para definir 2-4 zonas de manejo; (ii) muestrear el suelo por zona y por posición (línea vs. entre líneas) en capas superficiales y subsuperficiales; (iii) ajustar las dosis y las formas, por ejemplo, más compost orgánico y K en las copas y los hombros poco profundos, centrarse en el P localizado en las franjas con mayor arcilla y mayor fijación, y escalonar el yeso donde el subsuelo es más limitante; (iv) cuando sea posible, utilizar equipos con tasa variable para NPK y correctivos. En cultivos con control de distribución en la franja de copas, la ubicación del fertilizante «debajo de la falda» mejora la eficiencia al coincidir con la mayor densidad de raíces finas activas, reduciendo las pérdidas.

Los fertilizantes organominerales están ganando terreno como herramienta para alinear el aporte de C, la liberación gradual de nutrientes y la eficiencia operativa. En el café arábica, los resultados de campo indican que los organominerales formulados para cumplir con la misma dosis de P_2O_5 de la recomendación mineral pueden mantener o superar la productividad, con beneficios adicionales en la disponibilidad de P y K en el suelo cuando las aplicaciones se fraccionan. En términos de manejo, los organominerales funcionan particularmente bien cuando se combinan con cobertura viva y mantillo orgánico en la línea, ya que la matriz orgánica del producto, sumada al aporte de residuos, reduce los picos de salinidad y mejora la sincronía entre la oferta y la demanda. La recomendación práctica es: utilizar organominerales como parte (o la totalidad) de la fertilización de mantenimiento, mantener el fraccionamiento alineado con la fenología y verificar el costo por unidad de nutriente entregada, además de la logística de aplicación en franjas.

Cuantificar y hacer un seguimiento de las ganancias es parte del éxito. Para la MOS y el carbono orgánico del suelo (COS), se recomienda un muestreo periódico en capas de 0-10, 10-20 y 20-40 cm en la línea y entre líneas; siempre que sea posible, incluir carbono particulado e indicadores biológicos (biomasa microbiana, actividad enzimática). Para

el P, estratificar las capas superficiales (0-5 y 5-10 cm) ayuda a interpretar el efecto del manejo conservacionista. Los indicadores físicos (estabilidad de los agregados, densidad del suelo e infiltración) revelan las respuestas estructurales a las prácticas de cobertura y yeso. A nivel operativo, registre los cortes de las cubiertas, las fechas y las dosis de compost/organomineral/yeso y vincúlelos a los mapas de producción: esto permite ajustar rápidamente las zonas de manejo y verificar los resultados.

Desde la perspectiva de la cafeicultura regenerativa, el manejo de la MOS y las prácticas mencionadas anteriormente son el corazón del sistema. La lógica es clara: las cubiertas vivas permanentes y la diversidad botánica mantienen el flujo de carbono hacia el suelo; los compuestos orgánicos cierran los ciclos y elevan las reservas estables; los organominerales modulan la disponibilidad de nutrientes, sobre todo N y K, sin picos de pérdida; y el enyesado, cuando está indicado, «abre» el subsuelo a las raíces y al agua, reduciendo la dependencia de insumos y el riesgo climático. En las propiedades brasileñas que alinean estos frentes, con una cobertura vigorosa entre líneas, cortes dirigidos, compost de la propia finca, fertilización (incluida la organomineral) fraccionada y localizada «debajo de la falda», yeso según el diagnóstico del perfil y decisiones por zona, se observan cultivos más estables en cosechas difíciles, una mayor eficiencia en el uso de fertilizantes y avances tangibles en los indicadores de salud del suelo. En resumen: regenerar, en el café, es gestionar el ciclo del carbono en el suelo del cultivo, con ciencia, constancia y buena agronomía.



NUTRICIÓN MINERAL Y SUS EFECTOS EN LA CALIDAD DEL CAFÉ

La nutrición mineral del cafeto influye de manera decisiva en la calidad física, química y sensorial de los granos, ya que gobierna la formación, la acumulación y la preservación de los precursores del aroma, la acidez y el dulzor (azúcares, ácidos clorogénicos, compuestos volátiles y fenoles), además de afectar a la integridad de las membranas durante el beneficio y el tueste. La evidencia acumulada indica que la calidad rara vez se explica por un nutriente aislado: surge del equilibrio entre los elementos, del estado químico del suelo (acidez, cargas, saturación por bases) y del ajuste fino de las fuentes y fraccionamientos a lo largo del ciclo. En términos prácticos, los cultivos que concilian un suministro adecuado con proporciones equilibradas entre macronutrientes y una buena construcción de materia orgánica tienden a producir granos más uniformes y tazas más limpias, dulces y consistentes.

El nitrógeno sigue siendo fundamental por su función en la fotosíntesis, la síntesis proteica y el crecimiento vegetativo, pero su manejo debe evitar tanto la deficiencia como el exceso. Las dosis elevadas y mal sincronizadas empujan a la planta hacia el gasto vegetativo, diluyen los azúcares y pueden penalizar el cuerpo y la dulzura del café; por otro lado, los niveles adecuados y bien fraccionados (especialmente bajo fertirrigación) favorecen la tasa fotosintética, la formación de precursores aromáticos y una maduración más uniforme. En la interfaz N-K, los estudios de fertilización en café muestran que las proporciones equilibradas entre estos dos nutrientes están asociadas a mejores notas sensoriales y a una composición química del grano más favorable; tanto el desequilibrio por N como por K puede aumentar la conductividad eléctrica y la lixiviación de potasio de los granos, signos de fragilidad de la membrana que suelen correlacionarse con la pérdida de calidad.

El potasio, por su parte, es determinante para la translocación de azúcares, la turgencia y el llenado de los frutos. Su deficiencia reduce el porcentaje de granos finos y aumenta los defectos físicos. Sin embargo, el exceso de K provoca antagonismo con el magnesio y el calcio, lo que repercute en la calidad. Equilibrar K:Mg es especialmente relevante en suelos tropicales en los que el manejo privilegia el aumento del K intercambiable. Además de la dosis, la fuente de K puede introducir matices sensoriales: ensayos con KCl, K_2SO_4 y KNO_3 muestran que todas las fuentes pueden sostener la productividad y, en muchos escenarios, cafés de alta puntuación; en algunas condiciones, sin embargo, el sulfato de potasio se asocia con mayor dulzor y menor amargor, mientras que el cloruro de potasio, cuando es dominante y se maneja mal, puede favorecer atributos menos deseables. No existe una «fuente ganadora» universal, el KCl suele ofrecer una mejor relación coste-beneficio, pero cuando el objetivo es maximizar los atributos sensoriales finos, reducir el aporte de cloruro, combinar fuentes y emplear fraccionamientos tiende a ser una opción prudente. La propia presencia de Cl^- en el sistema requiere atención: las acumulaciones pueden interferir en las enzimas relacionadas con el oscurecimiento y la estabilidad de las membranas; el ajuste del azufre y el uso de K_2SO_4 en parte del programa suelen mitigar estos efectos.

El calcio y el magnesio sostienen las paredes y membranas celulares, la señalización y, en el caso del Mg, la propia clorofila. Una buena saturación de Ca y Mg inhibe la toxicidad por Al^{3+} , mejora la estructura del suelo y favorece la retención/suministro de agua, creando un ambiente físico-químico que preserva el desarrollo del grano y la integridad del tejido durante el secado. En muchas regiones cafeteras brasileñas, el encalado correcto (guiado por análisis de suelo y objetivos realistas de saturación por bases) es un paso esencial para la calidad en su conjunto, ya que eleva el Ca y el Mg, modera la acidez y reduce la fijación de P.

Es precisamente en el fósforo donde el carbono orgánico total (COT) desempeña un papel estratégico. En latosoles y argilosos altamente intemperizados, ricos en óxidos de Fe y Al, el P aplicado tiende a ser rápidamente adsorbido, volviéndose menos disponible para las raíces. El aumento del COT actúa en tres frentes: (i) las sustancias húmicas y los ácidos orgánicos compiten con el fosfato por los sitios de adsorción y

complexan el Al y el Fe, bloqueando los puntos activos de fijación; (ii) los entornos con mayor COT suelen presentar un mayor fósforo remanente (P-rem), indicador reconocido de menor propensión del suelo a retener P; y (iii) una mayor actividad microbiana aumenta la acción de las fosfatasa y la mineralización del P orgánico. En la práctica, esto se traduce en una mayor eficiencia en el uso del P aplicado y, por lo tanto, en una mayor probabilidad de que el cafeto mantenga reservas de precursores de aroma y una acidez equilibrada. Estrategias como la adición de residuos (incluida la cáscara de café y los compuestos), el uso de fertilizantes organominerales, las plantas de cobertura y el manejo conservacionista aumentan el COT al tiempo que construyen estabilidad física, lo que contribuye a una maduración más uniforme y a la consistencia de la cosecha.

Por lo tanto, el manejo de la fertilización fosfatada en suelos tropicales debe integrar tres pilares: corrección de la acidez (encalado), construcción de materia orgánica (COT) y posicionamiento/parcelamiento de la fuente. La aplicación localizada en franjas, el uso de fuentes con solubilidad compatible con la reactividad del suelo y el fraccionamiento en sistemas de riego o de mayor crecimiento vegetativo reducen las pérdidas y mejoran la sincronía suelo-planta. La evaluación del P-rem en el monitoreo de parcelas es una herramienta práctica para ajustar tanto la dosis como la estrategia de la fuente, ya que informa sobre la tendencia de ese suelo a retener el P.

Entre los micronutrientes destacan el boro, el zinc, el manganeso, el hierro y el cobre. El boro, que suele faltar en suelos tropicales arenosos o con bajo contenido en materia orgánica, está relacionado con la floración, el cuajado y la uniformidad de la fructificación; su deficiencia provoca malformaciones y encogimiento, con repercusiones directas en el tamiz y, de forma indirecta, en la calidad. El zinc y el manganeso participan en rutas enzimáticas clave y en el sistema antioxidante; el zinc, por ejemplo, está relacionado con la síntesis de auxinas que modulan el crecimiento y el llenado de los frutos, mientras que el cobre tiene un papel estructural en las enzimas oxidasas y en la salud, con impactos indirectos en la preservación de los precursores aromáticos. El punto crítico es mantener rangos adecuados con el mínimo de antagonismos y sin exceder los niveles de toxicidad, lo que refuerza la necesidad de un diagnóstico foliar periódico para ajustar los micronutrientes con precisión.

El fondo edáfico y el manejo de la cobertura también modulan la expresión sensorial. Los suelos con mejor estructura, mayor porosidad y mayor aporte de residuos estabilizan la humedad y la temperatura, amortiguan el estrés y suelen mantener perfiles sensoriales más predecibles. Los sistemas con sombreado bien diseñado, especies adecuadas, densidad y arquitectura compatibles pueden aumentar la entrada de residuos, incrementar el COT y moderar los extremos térmicos, sin reducir necesariamente la calidad; sin embargo, la respuesta depende del entorno y del material genético, y el objetivo final (calidad, productividad, cosecha mecanizable) debe guiar la decisión. En cultivos con alta insolación y bajo aporte de residuos, es particularmente importante cuidar el pH, la materia orgánica y el equilibrio K-Mg-Ca para no penalizar los atributos de la taza.

Como directriz práctica integradora, los programas nutricionales orientados a cafés finos deben: (1) comenzar con un diagnóstico por parcela, combinando suelo (con P-rem cuando sea apropiado) y hoja; (2) buscar el equilibrio entre N y K, evitando extremos que aumenten la lixiviación de K de los granos y la conductividad eléctrica; (3) manejar el K prestando atención al antagonismo con el Mg y a la presencia de Cl^- , eligiendo fuentes y combinaciones coherentes con el objetivo sensorial y el costo; (4) construir COT de forma continua (residuos, cobertura, organominerales, manejo conservacionista), ya que esta es una de las palancas más consistentes para aumentar la disponibilidad de P en suelos tropicales; y (5) mantener la acidez en un rango moderado con un encalado criterioso para elevar el Ca y el Mg y reducir la fijación de fosfato y la toxicidad por Al^{3+} . El resultado, cuando todas estas piezas encajan, es un sistema más eficiente en el uso de nutrientes, con granos físicamente superiores y un perfil sensorial más dulce, limpio y estable a lo largo de los años, exactamente lo que el mercado de cafés especiales tiende a premiar.

RECOMENDACIÓN TÉCNICA Y PRÁCTICA DE FERTILIZACIÓN PARA CAFETOS

1) Principios generales que estructuran la recomendación

Fertilizar el café de manera consistente a lo largo de los años requiere alinear tres pilares: diagnóstico (suelo y hoja), expectativa de producción y eficiencia de la aplicación y de la fuente del nutriente. En el diagnóstico, el análisis del suelo orienta lo que hay que corregir y reponer; el análisis foliar indica cómo ha respondido la planta al manejo y dónde hay que ajustar los micronutrientes (especialmente nitrógeno, potasio y micronutrientes de baja movilidad, como el boro y el zinc). Dado que el cafeto alterna años de mayor y menor carga, se recomienda estimar la productividad con criterio; cuando la cosecha esperada es muy inferior a la anterior «alta», se trabaja con la media entre ambas para no reforzar la bienalidad. Este cuidado, combinado con una fertilización equilibrada y fraccionada, es parte fundamental del manejo que amortigua las oscilaciones de la cosecha.

En el campo, la eficiencia proviene de las 4 C: fertilizante correcto, dosis correcta, lugar correcto y momento correcto. En el café de secano, fraccionar el N y el K en 3-4 aplicaciones a lo largo del período lluvioso reduce las pérdidas por volatilización y lixiviación. La localización bajo la falda (a ambos lados de la planta, preferiblemente) coloca el nutriente en la zona de mayor densidad de raíces activas, elevando la respuesta por unidad aplicada. En sistemas de riego, la fertirrigación diluye las dosis en aplicaciones más frecuentes, con efectos prácticos similares: mayor aprovechamiento, menor pérdida.

2) Encalado y enyesado

El encalado es la base química del ambiente radicular del cafeto. Aumenta la saturación por bases, neutraliza el Al^{3+} tóxico, aporta Ca y

Mg y aumenta la CTC efectiva; en consecuencia, mejora la disponibilidad de P y la eficiencia de N y K. En los sistemas de café, el encalado en profundidad (incorporado en la preparación antes de la siembra) favorece la exploración radicular en la subsuperficie, reduciendo la dependencia de la capa superficial húmeda solo en las primeras lluvias. En cultivos ya establecidos, dosis anuales más pequeñas y recurrentes, concentradas en el dominio radicular, mantienen el pH en un rango favorable y reponen el Ca/Mg eliminado por la cosecha y la lixiviación.

El yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) no corrige el pH, pero proporciona Ca y S y transporta Ca^{2+} a capas más profundas, mejorando la estructura y la química de la subsuperficie (saturación de bases y relación Ca:Al) y creando un «corredor» radicular para el agua y los nutrientes. En suelos con acidez subsuperficial y bajos contenidos de Ca en profundidad, el yeso es valioso como complemento del encalado. En la implantación, el aporte de S también puede provenir del superfosfato simple y, posteriormente, del sulfato de amonio cuando parte del N se suministra en esta forma.

Directriz práctica: encalado dimensionado por el análisis del suelo y aplicado antes de la fertilización fosfatada; yeso utilizado como herramienta de perfil, cuando lo indique la química subsuperficial. El capítulo específico sobre encalado/yesado del libro cubre los cálculos; aquí lo reforzamos porque estas correcciones hacen que la fertilización sea más eficiente a lo largo del ciclo.

3) Fertilización de plantación

Objetivo agronómico: establecer un entorno químicamente favorable y profundo para las raíces nuevas, proporcionando fósforo localizado (difusión corta), suministrando potasio en suelos pobres, añadiendo S e iniciando la dinámica biológica con materia orgánica.

Cómo componer la fertilización del hoyo/surco

Materia orgánica bien curtida/compuesta: mezclada con el suelo del hoyo mejora la estructura, aumenta el CTC, compleja el Al y aporta micronutrientes. Como referencia para la preparación del hoyo: un hoyo típico de $0,25 \times 0,20 \times 0,30$ m contiene $\sim 15 \text{ dm}^3$ de suelo; en una relación suelo:OM 4:1, caben unos 3 L de OM mezclados con 12 L de tierra. Esto

no sustituye a la fertilización mineral, sino que la complementa y la hace más eficiente.

Fósforo (P_2O_5): debido a su baja movilidad, debe aplicarse en la plantación y en profundidad, incorporado y homogeneizado al suelo del hoyo/surco. La dosis depende del contenido de P en el suelo (método de su laboratorio) y de la textura: los suelos arcillosos requieren más P para superar la fijación, los arenosos requieren menos. Fuentes habituales: superfosfato simple (aporta Ca y S), MAP o mezclas formuladas; elegir según la disponibilidad y el equilibrio con S/Ca en el sistema.

Potasio (K_2O): la aplicación en el hoyo/surco es obligatoria cuando el análisis indica una baja disponibilidad. Aunque las plántulas requieren poco K, anticipar parte del aporte en profundidad favorece la reserva inicial y el crecimiento vegetativo. En suelos arcillosos se utiliza la dosis calculada para alcanzar el contenido objetivo en el hoyo; en suelos arenosos, se reduce la dosis proporcionalmente para evitar la salinización. Fuentes: KCl, K_2SO_4 (este último añade S y es útil cuando hay restricción de cloruro).

Azufre (S): entra por el SSP en el hoyo/surco y sigue llegando con sulfato de amonio en las cubiertas de los dos primeros años. Alternativamente, el yeso agrícola en la plantación suministra S y Ca de forma gradual.

Micronutrientes: la MO suele cubrir las necesidades iniciales; si el historial/suelo es pobre, considerar B y Zn ya en la fase inicial, con precaución para evitar el exceso (las ventanas entre la suficiencia y la toxicidad son estrechas). Cuando sea necesario, corregir el B en el suelo y el Zn vía foliar más adelante.

Operativo: mezclar completamente el fertilizante con el suelo, evitando la formación de bolsas concentradas y el contacto directo entre los gránulos y las raíces. En siembra en surco, calcular las dosis por dm^3 de suelo efectivamente incorporado (la mitad inferior del surco, donde realmente se mezclan la tierra y los fertilizantes) y distribuir a lo largo de la línea antes del cierre.

4) Fertilización de formación

Objetivo agronómico: construir una copa y una raíz con crecimiento continuo, sin estimular desequilibrios vegetativos, y preparar la planta para entrar en producción con una arquitectura y unas reservas adecuadas.

Cómo dimensionar las dosis

N (arranque y vigor): en el primer y segundo año, la dosis parte de una tabla que tiene en cuenta el sistema de plantación (convencional × densificado) y, en el segundo año, se añade la demanda eventual de los frutos si hay producción precoz. En términos generales, a medida que el espaciamiento se densifica, la dosis por planta disminuye y la dosis por área aumenta (más plantas por hectárea aprovechando mejor el fertilizante). Una fracción del N puede venir en forma de sulfato de amonio para garantizar el S en el sistema.

P y K (arquitectura radicular y equilibrio osmótico): calculados según el contenido del nutriente en el suelo y la edad/sistema. El P sigue siendo crítico en la formación de raíces y debe seguir localizado; el K avanza a medida que la copa se expande y se acercan las primeras fructificaciones.

Cuándo y dónde aplicar

En seco, dividir en parcelas en la estación lluviosa: por ejemplo, 3 aplicaciones (principio, mitad y final de la estación). Colocar el fertilizante bajo la falda del cafeto, a ambos lados de la planta, ampliando el contacto con las raíces absorbentes.

En terrenos irrigados, fertirrigaciones más frecuentes con N y K, manteniendo el P sobre todo en aplicación al suelo (o fertirrigado con fuentes compatibles), evitando siempre concentraciones elevadas en el bulbo para no salinizar.

¿Cómo expresar por planta y por hectárea?

En la formación, muchas recomendaciones vienen por planta (g/planta) y varían con la densificación. Para planificar la logística, convierta a kg/ha multiplicando por la población efectiva. Ejemplo de conversión (meramente ilustrativo del cálculo): si una orientación técnica para su espaciamiento indica 120 g de N por planta y usted tiene 5000 plantas/ha, esto corresponde a 600 kg de N/ha al año; dividiendo en 3 parcelas, cada pasada lleva 200 kg de N/ha (ajuste finamente según el análisis foliar y la respuesta del campo).

5) Fertilización de producción

Objetivo agronómico: sostener la exportación anual por los frutos y el mantenimiento de la estructura (ramas y hojas), modulando las dosis para no amplificar la bienalidad.

Cómo dimensionar las dosis

Se trabaja con la productividad esperada de la cosecha, la situación del suelo (P y K) y, cuando se dispone de ella.

Un ejemplo real de combinación de estas variables, para un escenario de suelo con P y K bajos y una cosecha esperada relevante, conduce a un nivel del orden de N 450 kg/ha/año, P_2O_5 80 kg/ha/año y K_2O 450 kg/ha/año. Esta relación $N:P_2O_5:K_2O \approx 5,6:1:5,6$ es útil para orientar la elección de fórmulas comerciales o mezclas simples que alcancen el objetivo con el mínimo de pasadas.

Por planta x por hectárea (ejemplo de campo). Las tablas utilizadas en el café también permiten leer la necesidad por planta en g/planta cuando se trabaja con «litros de cereza por planta» y el rango de plantas/ha. Para ilustrar el razonamiento: una combinación común en un cafetal de menor población puede determinar algo así como ~150 g de N, ~28 g de P_2O_5 y ~150 g de K_2O por planta en un año de mayor demanda. En 4000 plantas/ha, esto significaría, por hectárea, alrededor de 600 kg de N, 112 kg de P_2O_5 y 600 kg de K_2O . Tenga en cuenta que la lectura «por planta» cambia con la densidad y la productividad pendiente; por lo tanto, al planificar las compras, siempre convierta a kg/ha de su parcela, validando con suelo/hoja.

Fraccionamiento y época

En secano, 3 a 4 aplicaciones: una después de la floración (para reponer reservas), una en la fase de expansión (fijación), una en la granación y, cuando sea apropiado, una después de la cosecha para el rebrote y la recuperación.

En cultivos de regadío, dividir el N y el K en pasadas semanales o quincenales en el agua de riego durante el período activo. El P puede introducirse como ácido fosfórico/fosfato compatible o en aplicaciones sólidas estratégicamente posicionadas.

Ubicación y pérdidas

Depositar el fertilizante bajo la falda, alcanzando ambos lados de la planta, es operativamente sencillo y aumenta la eficiencia del N y el K.

En el caso del N, las pérdidas por volatilización (urea) y lixiviación (principalmente en suelos arenosos) requieren parcelas más pequeñas y una aplicación en suelo húmedo o con previsión de lluvia. Alternar las fuentes (urea, sulfato/nitrato de amonio) ayuda a controlar las pérdidas y, en el caso del sulfato, añade S.

En cuanto al S, cuando no se analiza el S en el suelo, las prácticas regionales funcionan como regla general entre $\sim 1/8$ de la dosis de N como S en escenarios con bajo contenido de S, reduciéndose a $\sim 1/16$ cuando el S del suelo se encuentra en un rango medio; muchas fórmulas comerciales ya aportan parte de este S.

Micronutrientes estratégicos en la producción

Boro (B): esencial para la fijación floral, tiene baja movilidad en la planta, por lo que la atención se centra en el suelo. En suelos/carreteras pobres en B, la estrategia consiste en fraccionar la aplicación al suelo en 2-3 pasadas a lo largo de las aguas (dosis anual típica del orden de 2-3 kg de B/ha, ajustada por análisis). En situaciones de deficiencia aguda, se utiliza un tratamiento foliar de emergencia con ácido bórico al $\sim 0,5$ % (5 g/L), sin renunciar al aporte al suelo para sostener el ciclo siguiente.

Zinc (Zn): responde bien a las pulverizaciones foliares durante el pico de crecimiento vegetativo (primavera-verano), con sulfato de zinc heptahidratado al $\sim 0,5$ % (5 g/L) o quelatos equivalentes; 2 aplicaciones en el periodo suelen corregir el cuadro.

El manganeso y el cobre se añaden según el análisis y el historial fitosanitario; a menudo, el cobre proviene de los fungicidas y ya forma parte del balance.

Cantidades relacionadas con la exportación de nutrientes

Cada saco de 60 kg de café procesado retira del sistema principalmente N y K; los valores medios de la literatura emplean, por saco, aproximadamente $\sim 6,2$ kg de N, $\sim 0,6$ kg de P_2O_5 y $\sim 5,9$ kg de K_2O . Esta perspectiva de «reposición por saco» es complementaria al método de

análisis de suelo/hoja y ayuda a verificar si el plan no está subalimentando los cultivos de alta carga.

6) Manejo para reducir la bienalidad (vinculando teoría y práctica)

La bienalidad aumenta cuando el cultivo se vacía en un año alto y no repone las reservas para el año siguiente. Tres decisiones reducen este efecto:

- Estimar la dosis utilizando la media entre la cosecha alta (anterior) y la esperada cuando la próxima está muy por debajo, lo que amortigua la caída.
- Dividir el N y el K para combinar la oferta y la demanda y reducir las pérdidas;
- No descuidar el poscosecha (aporte para recomponer las hojas y las ramas que sostendrán la cosecha siguiente). A esto se suma el mantenimiento del Ca y el Mg mediante el encalado, el S en el sistema y la corrección oportuna del B y el Zn para favorecer la floración y la fijación.

7) Buenas prácticas operativas (indispensables)

Muestreo: suelo por parcela homogénea, profundidades habituales (superficie y subsuperficie de interés para el sistema radicular) e historial de la zona; recolección foliar en prefloración, siguiendo el protocolo de su laboratorio (par de hojas, parte de la rama y número de plantas muestreadas).

Compatibilidad de fuentes: no mezclar «caseramente» sin comprobar la compatibilidad (por ejemplo, la urea con ácido fosfórico requiere un manejo cuidadoso; las mezclas con boro/zinc en tanque requieren una prueba previa).

Clima y humedad: en cobertura sólida, evitar aplicar antes de días secos y calurosos; preferir suelo húmedo y previsión de lluvia moderada.

Distribución: bandas bajo la falda, a ambos lados. En gránulos, aplicar por encima de la falda para que el producto «baje» entre las hojas hasta el suelo sin quemar el follaje.

Documentación: registrar la fecha, el producto, la dosis (por planta y por hectárea), la humedad del suelo y las observaciones; cotejar con los análisis para mejorar la decisión en el ciclo siguiente.

8) Resumen aplicado por fase de vida de la planta.

Siembra: mezclar con el suelo del hoyo P en profundidad (fuente según estrategia: SSP, MAP, etc.) de acuerdo con el contenido de P del suelo y la textura; aportar K en el hoyo cuando el suelo indique carencia, respetando el tipo de suelo (menos en arenosos para evitar la salinización); garantizar el S mediante SSP/yeso y completar el Ca/Mg mediante encalado previo. Añada MO bien curado (referencia: unos 3 L en un hoyo estándar de 15 dm³) para mejorar la física y la química del lecho. En zonas con antecedentes de bajos niveles de B y Zn, considere un inicio cauteloso de estos micronutrientes, dando prioridad al B en el suelo y al Zn más adelante a través de las hojas.

Formación (1.º-2.º año): estructure el N en función del sistema de plantación (menos g/planta en densificaciones, pero más kg/ha), utilizando parte como sulfato de amonio para aportar S; ajuste el P y el K según los contenidos del suelo. En secano, divida en 3 pasadas a lo largo de las aguas; en regadío, realice fertirrigaciones frecuentes con N y K, manteniendo el P preferentemente en aplicación localizada en el suelo. Coloque siempre bajo la falda, a ambos lados. Si hay fructificación precoz en el 2º año, añada la demanda de los frutos al cálculo anual.

Producción: defina las cantidades combinando la productividad esperada, los niveles de P y K en el suelo y en la hoja para ajustar el N. Como referencia práctica para un escenario exigente, se trabaja con alrededor de N ~450 kg/ha/año, P₂O₅ ~80 kg/ha/año y K₂O ~450 kg/ha/año, modulando según la parcela y los objetivos. Una lectura «por planta» de ~150 g de N + ~28 g de P₂O₅ + ~150 g de K₂O puede darse en cultivos menos densos y de alto potencial; convierta siempre a kg/ha según su población. En secano, 3-4 parcelas (prefloración a granación, con refuerzo poscosecha cuando sea adecuado); en regadío, quincenal/semanal mediante fertirrigación. El B debe entrar en el suelo (complemento foliar solo si el déficit es agudo); el Zn responde bien a 0,5 % de sulfato de zinc en 2 pulverizaciones en la estación de mayor crecimiento. Para el S, asegure la fracción proporcional al N (regla práctica del sistema, cuando el suelo no informa el S), recordando que los formulados NPK y sulfato de amonio ya contribuyen. Y, siempre, ubique debajo de la falda de ambos lados para aprovechar las raíces activas y reducir las pérdidas.

DESAFÍOS FUTUROS E INNOVACIONES EN FERTILIDAD Y NUTRICIÓN EN LA CAFEICULTURA

La cafeicultura brasileña vive un momento en el que la resiliencia se ha convertido en sinónimo de competitividad. Un clima más extremo, suelos heterogéneos, precios y disponibilidad de fertilizantes sujetos al tipo de cambio: todo ello ejerce presión sobre el manejo y exige decisiones técnicas que preserven el margen sin renunciar a la sanidad, el vigor y la calidad. En este contexto, la fertilidad del suelo y la nutrición dejan de ser solo «qué y cuánto aplicar» y pasan a ser, sobre todo, cómo, cuándo y dónde aplicar, basándose en el diagnóstico, la ejecución sencilla y la verificación continua de los resultados.

El primer reto es lidiar con la variabilidad del suelo y del cultivo. En muchas regiones cafeteras, las diferencias de relieve, textura, historial de manejo y erosión hacen que las parcelas respondan de manera desigual a los insumos. La innovación aquí no tiene por qué ser complicada: el muestreo estratificado por zonas de manejo, mapas simples de pH, V%, P y K, y recomendaciones ajustadas a la realidad de cada zona ya transforman un programa nutricional. Es la agricultura de precisión en su versión más accesible. Cuando es posible, la aplicación a tasa variable de cal, yeso y P/K reduce el desperdicio y aumenta la uniformidad.

Los drones y las imágenes satelitales ayudan a identificar las irregularidades en la copa y a priorizar las áreas, pero el corazón del proceso sigue siendo la repetibilidad: muestrear las mismas zonas, en las mismas ventanas, comparando las tendencias a lo largo de las cosechas. Con esta disciplina, la finca aprende de sus propios datos y deja de «fertilizar por el promedio».

El segundo eje es la combinación perfecta entre nutrición y clima. Las ventanas de lluvia más cortas, los veranos en medio de la estación y

las olas de calor aumentan las pérdidas por volatilización y lixiviación y, en consecuencia, reducen la eficiencia del fertilizante. La respuesta comienza en la planificación: programar las fertilizaciones para que coincidan con la lluvia o el riego, evitar aplicaciones superficiales en días muy calurosos y secos y, cuando la incorporación no sea viable, dar prioridad a la urea con inhibidor de ureasa. El fósforo rinde más cuando se aplica de forma localizada, limitando el contacto con el suelo; el potasio, en ambientes arenosos o con riesgo de lluvias concentradas, responde bien a fraccionamientos más pequeños y frecuentes. En áreas irrigadas, la fertirrigación permite sincronizar con precisión la oferta y la demanda, siempre que se controle la salinidad, la uniformidad de la aplicación y el estado hídrico del suelo/planta. El mensaje práctico es sencillo: un mismo nutriente puede tener eficiencias muy diferentes dependiendo de la forma y el momento.

En la eficiencia del uso de nutrientes, las llamadas «tecnologías elevadoras de eficiencia» ofrecen ganancias reales cuando están bien posicionadas. La urea con inhibidor de ureasa reduce las pérdidas por volatilización cuando la aplicación superficial es inevitable; en escenarios específicos (logística ajustada, textura arenosa, riego regular), las fuentes de liberación controlada ayudan a simplificar los calendarios y a reducir los picos y valles de disponibilidad. Los inhibidores de la nitrificación pueden formar parte de la estrategia, respetando el suelo, el clima y el sistema de aplicación. Nada de esto sustituye lo básico: un buen encalado y, cuando sea necesario, un enyesado para mejorar el ambiente radicular en profundidad. Es habitual ver intentos de «sofisticación» de fuentes sin una corrección adecuada del pH; en este caso, se paga más por un beneficio que el suelo no puede aportar.

Tratar el suelo como capital biológico es la tercera pata de la resiliencia. La materia orgánica, la estabilidad de los agregados, la porosidad y la microbiota determinan en qué medida el cultivo aprovecha el fertilizante y soporta el estrés. Los organominerales de buena procedencia, los compuestos y los estiércols estabilizados, junto con el abono verde y el manejo del mantillo, crean un entorno que retiene el agua, recicla los nutrientes y protege contra los extremos. Los bioinsumos pueden ser una ventaja, siempre que se utilicen con un propósito claro: solubilizadores de

fósforo en suelos con alto poder de fijación, promotores del crecimiento para estimular las raíces en fases críticas, micorrizas en condiciones en las que la simbiosis sea técnicamente indicada. La clave es la trazabilidad y la evaluación: producto registrado, dosis y época definidas, parcela marcada y comparación con un área espejo. Sin este registro, no hay forma de separar la suerte del resultado.

También hay un componente de gestión del riesgo que no se resuelve solo con la agronomía. La dependencia brasileña de los fertilizantes importados mantiene la operación expuesta a la volatilidad de los precios y la disponibilidad. La estrategia prudente combina objetivos de productividad por parcela (y no objetivos genéricos para la finca), simulación de escenarios de fertilización (convencional frente a EEF y/u organominerales) y compras escalonadas. En lugar de «apostar la granja» a una sola tecnología, vale la pena diversificar parcialmente las fuentes y probar en áreas comparables, midiendo el costo por saco y la tendencia de los atributos del suelo. Esta lógica diluye los riesgos, protege el efectivo y mantiene la flexibilidad para realizar ajustes durante la cosecha.

Para que todo esto funcione, vale la pena adoptar un panel de seguimiento mínimo que quepa en una sola página. Por finca (o por unidad de manejo), monitoree la productividad por parcela y su coeficiente de variación, el pH y el V% en las zonas de manejo, los contenidos de P y K, una lectura anual de materia orgánica y, sobre todo, tres indicadores de eficiencia: NUE, PUE y KUE, mapeando cuántos kilos de café se producen por kilo de nutriente aplicado. A esto hay que añadir el coste nutricional por saco y la eficacia de la aplicación (planificada frente a aplicada). Son cifras sencillas, pero que cambian el discurso: permiten comparar estrategias, justificar tecnologías y, sobre todo, aprender de una cosecha a otra.

La ejecución a lo largo del ciclo fenológico puede ser ágil y eficaz. En la poscosecha, se centra en recuperar la planta, desarrollar las raíces y la copa para la próxima floración: corrección del suelo (encalado y yeso cuando sea necesario) y suministro de N y K con fuentes y formas de menor pérdida. En la prefloración, hay que garantizar el pH y el calcio en el perfil y mantener el fósforo disponible. Durante la granación y el llenado, el potasio sostiene el transporte y la calidad; el manejo del N evita

excesos tardíos que perturben la maduración. En la pre-cosecha, deben evitarse los abonos que aumenten el riesgo de pérdida de calidad, y el esfuerzo se centra en consolidar los registros y preparar el próximo ciclo. Notará que nada de esto requiere una tecnología sofisticada, sino orden, oportunidad y consistencia.

Por último, es importante adaptar el lenguaje al público que se enfrenta a esta tarea a diario. Para los estudiantes, el enfoque debe estar en los principios (por qué se produce la volatilización, cómo actúa la fijación del fósforo, qué cambia en el balance de cargas cuando se corrige el pH) y en los métodos de medición. Para los técnicos, los protocolos estandarizados de muestreo, interpretación y recomendación, además de auditorías simples de ejecución, marcan la diferencia entre un plan «sobre el papel» y un manejo que cambia los resultados. Para los productores, el secreto está en elegir dos o tres innovaciones que se adapten a la operación (por ejemplo, urea con inhibidor de ureasa, recomendación en zonas de manejo y un piloto con organomineral) y repetirlas bien hechas, año tras año, ajustando el rumbo en función de los indicadores.

La resiliencia, por lo tanto, no consiste en acumular tecnologías, sino en hacer lo esencial con precisión e incorporar innovaciones que aumenten la eficiencia del nutriente por saco producido, reduzcan las pérdidas en las ventanas críticas y construyan un suelo más vivo y estable. En un entorno de clima incierto e insumos volátiles, esta combinación (diagnóstico de calidad, fuentes y formas eficientes, y suelo tratado como patrimonio) es lo que permite atravesar las cosechas difíciles y aprovechar plenamente las buenas, con productividad, calidad y sostenibilidad avanzando juntas.

CONSIDERACIONES FINALES

La fertilidad del suelo y la nutrición mineral del cafeto representan, en conjunto, uno de los pilares más determinantes para la productividad, la calidad del grano y la sostenibilidad del sistema cafetero brasileño. A lo largo de este libro, se ha buscado ofrecer un contenido técnico, actualizado y aplicable, dirigido a diferentes perfiles de lectores, ya sean técnicos de campo, estudiantes en formación o caficultores en busca de una mayor autonomía y eficiencia productiva.

Ha quedado claro que la gestión nutricional del cultivo del café no puede tratarse de forma genérica o estandarizada. Cada entorno de producción tiene características edafoclimáticas, históricas y operativas distintas, lo que exige un enfoque integrado basado en diagnósticos fiables (análisis químicos, físicos y biológicos del suelo, además de análisis foliares), tecnología de aplicación, planificación agronómica e interpretación científica de los resultados.

El uso responsable de los insumos, junto con prácticas regenerativas, como el abono verde, el uso de bioinsumos, el rochado y la cobertura permanente del suelo, debe considerarse un avance no solo técnico, sino también ético y medioambiental. El café del futuro será, necesariamente, más eficiente en el uso de los nutrientes, más equilibrado en términos biológicos y más comprometido con la salud del suelo, el mayor patrimonio natural del productor.

Al dominar los fundamentos de la nutrición mineral y comprender la dinámica del suelo, el profesional del campo amplía su capacidad de toma de decisiones, reduce el desperdicio y maximiza el rendimiento económico. Más que aplicar fertilizantes, se trata de gestionar procesos.

Que este material sirva como base técnica, referencia de consulta y estímulo para la adopción de prácticas agronómicamente correctas, económicamente viables y ecológicamente sostenibles. El suelo es un organismo vivo, y el conocimiento sobre él es el primer paso para una cafeicultura más resiliente, rentable y duradera.



AGRADECIMIENTOS

La organización de este libro solo ha sido posible gracias a la contribución directa e indirecta de diversos profesionales, instituciones y experiencias acumuladas a lo largo de los años en el campo de la agronomía y el cultivo del café.

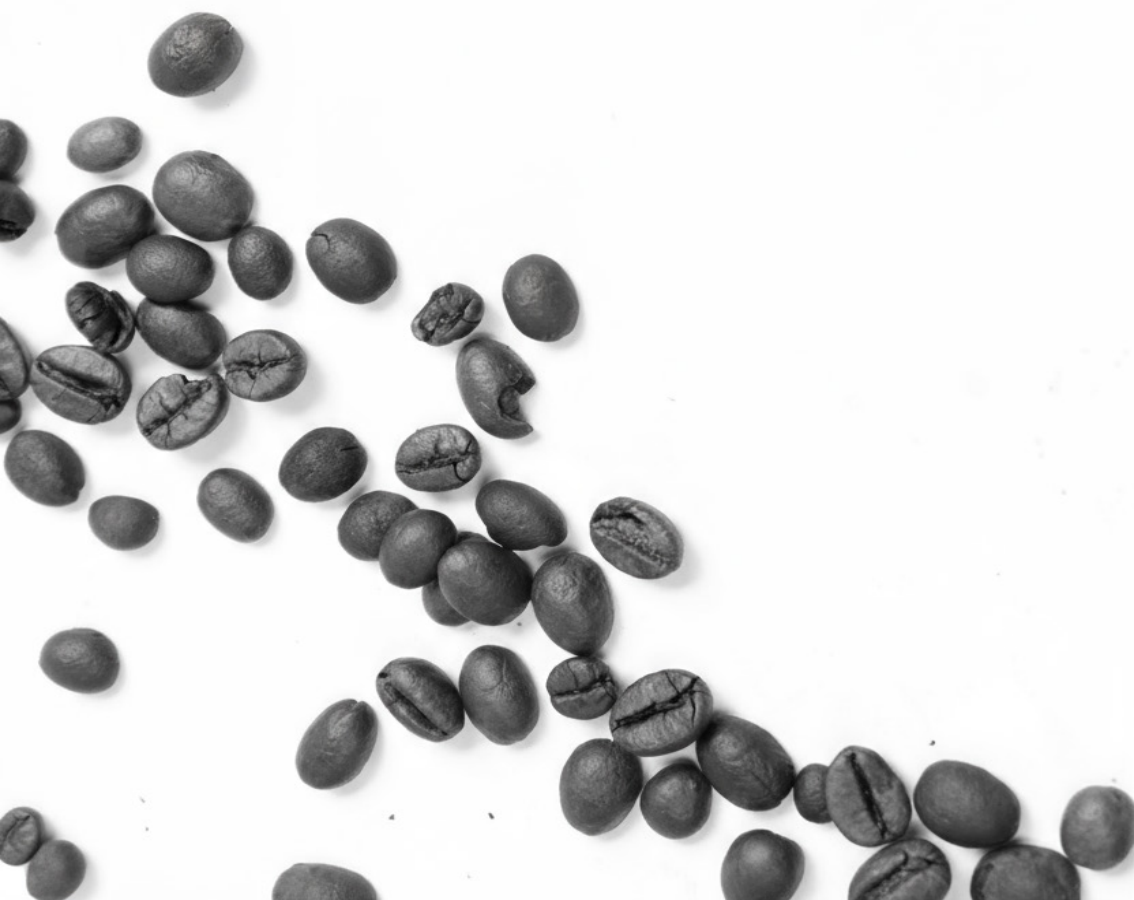
Agradezco a los investigadores y extensionistas que, con su incansable trabajo, han promovido avances en la comprensión de la fertilidad del suelo y la nutrición mineral en el café.

Los datos aquí presentados se basan en publicaciones científicas de referencia nacional e internacional, muchas de ellas procedentes de instituciones como EMBRAPA Café, el Instituto Agronómico de Campinas (IAC), la Universidad Federal de Lavras (UFLA), EPAMIG, la Fundación Procafé, entre otras que fortalecen la investigación agrícola en Brasil.

Extiendo mi gratitud a los caficultores que, en diversas regiones del país, son verdaderos laboratorios vivos de innovación y manejo sostenible, cuyas experiencias prácticas inspiraron el enfoque realista adoptado en este material.

También agradezco a los profesores, estudiantes y técnicos agrícolas (cada uno con su función) que, a través de la educación y la transferencia de tecnología, mantienen viva la vocación de la cafeicultura brasileña de producir con calidad, responsabilidad y excelencia agronómica.

Por último, dedico este trabajo a la nueva generación de profesionales del campo, que busca conciliar la ciencia y la práctica con la ética, la precisión y el respeto por el suelo y las plantas.



REFERÊNCIAS

ALCARDE, J.C. & RODELLA, A.A. *Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos*. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S. & ALVAREZ V., V.H. eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p.291-334.

ALLOWAY, B. J. *Zinc in soils and crop nutrition*. 2. ed. Brussels: International Zinc Association; Paris: International Fertilizer Industry Association, 2008.

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F. de; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. *Determinação e uso do fósforo remanescente*. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.25, p.27-32, 2000.

ARAÚJO, L. G. et al. (2014). Organic matter fractions in soil under coffee with split applications of phosphorus and water regimes. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental*, 18(10), 1017–1022. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n10p1017-1022>.

BARROS, M. M.; VOLPATO, C. E. S.; SILVA, F. C.; PALMA, M. A. Z.; SPAGNOLO, R. T. Avaliação de um sistema de aplicação de fertilizantes a taxa variável adaptado à cultura cafeeira. *Coffee Science*, Lavras, v. 10, n. 2, p. 223–232, 2015.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. *Métodos de análise química de plantas*. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 48 p. (Boletim Técnico, 78).

BERTON, R. S.; PRATT, P. F.; FRANKENBERGER JR., W. T. Disponibilidade de fósforo estimada por três métodos químicos e pela atividade de duas enzimas em solos que receberam incorporação de materiais orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 21, n. 4, p. 617–624, 1997.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, Amsterdam, v. 124, p. 3-22, 2005.

CAIRES, E. F., CHURKA, S., GARBUIO, F. J., FERRARI, R. A., & MORGANO, M. A.. (2006). *Soybean yield and quality a function of time and gypsum applications*. Scientia Agricola, 63(4), 370–379.

CAIRES, E. F.; GUIMARÃES, A. M. A Novel Phosphogypsum Application Recommendation Method under Continuous No-Till Management in Brazil. *Agronomy Journal* - Soil Fertility and Crop Nutrition, v. 110, n. 5, p. 1987-1995, 2018.

C.E. CARDUCCI, G.C. OLIVEIRA, N. CURTI, R.J. HECK, D.F. ROSSONI, T.S. DE CARVALHO, A.L. COSTA. *Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol*, Soil and Tillage Research, v. 145, p. 171-180, 2015.

CARDUCCI, C. E.; G. C. de OLIVEIRA (Org). *Manejo do solo na cafeicultura: produtividade e sustentabilidade*. Lavras: Editora UFLA, 2021, 135p.

CARELLI, M.L.C. et al. *Aspects of nitrogen metabolism in coffee plants*. Braz. J. Plant Physiol., 18(1):9-21, 2006.

CHAGAS, W.F.T. et al. NITROGEN FERTILIZERS TECHNOLOGIES FOR COFFEE PLANTS. *Coffee Science*, v. 14, n. 1, p. 55–66, 2019.

CHANDON, E., NUALKHAO, P., VIBULKEAW, M. et al. *Mitigating excessive heat in Arabica coffee using nanosilicon and seaweed extract to enhance element homeostasis and photosynthetic recovery*. BMC Plant Biol 24, 1064 (2024).

CHAVES, J.C.D. *Manejo do solo: adubação e calagem, antes e após a implantação da lavoura cafeeira*. Londrina: IAPAR, 2002. 36 p. (Circular 120).

CLEMENTE, J. M., MARTINEZ, H. E. P., ALVES, L. C., FINGER, F. L., & CECON, P. R. (2015). Effects of nitrogen and potassium on the chemical composition of coffee beans and on beverage quality. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 37(3), 297–305.

DE SOUSA, T. R., DE CARVALHO, A. M., RAMOS, M. L. G., DE OLIVEIRA, A. D., DE JESUS, D. R., DA FONSECA, A. C. P., DA COSTA SILVA, F. R., DELVICO, F. M. D. S., JUNIOR, F. B. D. R., & MARCHÃO, R. L. (2024). *Dynamics of Carbon and Soil Enzyme Activities under Arabica Coffee Intercropped with Brachiaria decumbens in the Brazilian Cerrado*. Plants, 13(6), 835.

DUTRA, M. P., SARKIS, L. F., OLIVEIRA, D. P., SANTIAGO, H. D. A., RESENDE, G. T. D. S., DE MELO, M. E. A., DA FONSECA, A. B., LÓPEZ, C. J. H., SILVA, E. D. S., ZAQUEU, A. D. S., DE LIMA, G. H. F., SILVA, J. M., POZZA, A. A. A., & GUELFI, D. (2025). Cutting-Edge Technology Using Blended Controlled-Release Fertilizers and Conventional

Monoammonium Phosphate as a Strategy to Improve Phosphorus Coffee Nutrition During the Coffee Development Phase. *Soil Systems*, 9(2), 47.

ECOFRIENDLY COFFEE. *Nitrogen economy inside coffee plantations*. 2023. Disponível em: <https://ecofriendlycoffee.org/nitrogen-economy-inside-coffee-plantations/>

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DE MINAS GERAIS – EMATER-MG. *Manual do Café: Manejo de Cafezais em Produção*. Belo Horizonte: EMATER-MG, 2016.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. *Mineral nutrition of plants: principles and perspectives*. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. 400 p.

FAGERIA, N.K., BALIGAR, V.C., & CLARK, R. (2006). *Physiology of Crop Production (1st ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482277807>.

FAGERIA, N.K., BALIGAR, V.C., & JONES, C.A. (2010). *Growth and Mineral Nutrition of Field Crops (3rd ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10160>.

FAQUIN, V. *Nutrição mineral de plantas*. Lavras: UFLA, 2005. 186 p.

FARNEZI, M. M. DE M., SILVA, E. DE B., & GUIMARÃES, P. T. G.. (2009). Diagnose nutricional de cafeeiros da região do Alto Jequitinhonha (MG): normas dris e faixas críticas de nutrientes. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 33(4), 969–978. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400021>.

FENILLI, T. A. B., REICHARDT, K., FAVARIN, J. L., BACCHI, O. O. S., SILVA, A. L., & TIMM, L. C.. (2008). Fertilizer 15N balance in a coffee cropping system: a case study in Brazil. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 32(4), 1459–1469. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000400010>

FERRAZ, G. A. E. S., SILVA, F. M. DA ., CARVALHO, F. DE M., COSTA, P. A. N. DA ., & CARVALHO, L. C. C.. (2011). Viabilidade econômica do sistema de adubação diferenciado comparado ao sistema de adubação convencional em lavoura cafeeira: um estudo de caso. *Engenharia Agrícola*, 31(5), 906–915. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000500008>.

GUARÇONI, A. *Saturação por bases para o cafeeiro baseada no ph do solo e no suprimento de Ca e Mg*. Coffee Science, Lavras, v. 12, n. 3, p. 327–336, jul./set. 2017.

- LIMA FILHO, O. F. DE ., & MALAVOLTA, E.. (2003). Studies on mineral nutrition of the coffee plant (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí Vermelho): LXIV. Remobilization and re-utilization of nitrogen and potassium by normal and deficient plants. *Brazilian Journal of Biology*, 63(3), 481–490.
- MALAVOLTA, E. *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Ceres, 2006. 631 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- MANCUSO, M. A. C., SORATTO, R. P., CRUSCIOL, C. A. C., & CASTRO, G. S. A.. (2014). Effect of potassium sources and rates on arabica coffee yield, nutrition, and macronutrient export. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 38(5), 1448–1456. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500010>.
- MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. 3. ed. London: Academic Press, 2012. 651 p.
- MARTINEZ, H. E. P., CLEMENTE, J. M., LACERDA, J. S. DE ., NEVES, Y. P., & PEDROSA, A. W.. (2014). Nutrição mineral do cafeeiro e qualidade da bebida. *Revista Ceres*, 61, 838–848. <https://doi.org/10.1590/0034-737x201461000009>
- MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A. W. R.; ALMEIDA, S. R.; FERNANDES, D. R. *Cultura do café no Brasil: manual de recomendações*. Varginha: Fundação Procafé, 2020. 716 p.
- MONICELLI, F., CUNHA, K. P. V. DA ., ARAÚJO, F., & BECKER, V.. (2021). Phosphorus sorption potential of natural adsorbent materials from a Brazil semiarid region to control eutrophication. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 33, e29.
- MOREIRA, D.T. et al. Determination of physical and chemical quality of coffee beans under improved potassium fertilization managements. *Coffee Science*, v. 16, p. 1–10, 2021.
- MOTA, R. P. et al. Organomineral fertilizer in coffee plant (*Coffea arabica* L.): Fertilizer levels and application times. *Coffee Science*, Lavras, v. 18, p. e182098, 2023.

- NASCIMENTO, M. O., COSTA CELESTINO, S. M., VEIGA, A. D., DE JESUS, B. D. A., & DE LACERDA DE OLIVEIRA, L. (2024). Quality of Arabica coffee grown in Brazilian Savannah and impact of potassium sources. *Food research international (Ottawa, Ont.)*, 188, 114500. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114500>
- NOVAIS, R. F. et al. *Fertilidade do solo*. Viçosa: SBCS, 2007.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.
- NUNES, R. DE S., SOUSA, D. M. G. DE ., GOEDERT, W. J., & VIVALDI, L. J.. (2011). Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 35(3), 877–888. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300022>.
- OLIVEIRA, L. L., NASCIMENTO, M. O., & CELESTINO, S. M. C. (2025). Integrating optimized descriptive profile, consumer acceptance, and textual analysis to assess coffee beverage quality: Exploring potassium fertilization in Brazil’s Central Plateau. *Food research international (Ottawa, Ont.)*, 212, 116525.
- PARECIDO, R. J., SORATTO, R. P., GUIDORIZZI, F. V. C., PERDONÁ, M. J., & GITARI, H. I. (2021). Soil application of silicon enhances initial growth and nitrogen use efficiency of Arabica coffee plants. *Journal of Plant Nutrition*, 45(7), 1061–1071.
- PAUL, E. A. et al. *Soil microbiology, ecology, and biochemistry*. 4. ed. Oxford: Academic Press, 2013, 603 p.
- PAVINATO, P. S., & ROSELEM, C. A.. (2008). Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 32(3), 911–920.
- PEREIRA, M. G., LOSS, A., BEUTLER, S. J., & TORRES, J. L. R.. (2010). Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45(5), 508–514.
- RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C., eds. *Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo*. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo/FUNDAG, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100)

- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Eds.). *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação*. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359 p.
- RODRIGUES, M. J. L., DA SILVA, C. A., BRAUN, H., & PARTELLI, F. L. (2023). Nutritional Balance and Genetic Diversity of *Coffea canephora* Genotypes. *Plants*, 12(7), 1451.
- RODRIGUES, F. A., CARRÉ-MISSIO, V., JHAM, G. N., BERHOW, M., & SCHURT, D. A.. (2011). Chlorogenic acid levels in leaves of coffee plants supplied with silicon and infected by *Hemileia vastatrix*. *Tropical Plant Pathology*, 36(6), 404–408.
- SANTOS, C., MALTA, M. R., GONÇALVES, M. G. M., BORÉM, F. M., POZZA, A. A. A., MARTINEZ, H. E. P., DE SOUZA, T. L., CHAGAS, W. F. T., DE MELO, M. E. A., OLIVEIRA, D. P., LIMA, A. D. C., DE ABREU, L. B., REIS, T. H. P., DE SOUZA, T. R., BUILES, V. R., & GUELFI, D. (2023). Chloride Applied via Fertilizer Affects Plant Nutrition and Coffee Quality. *Plants*, 12(4), 885.
- SANTOS, D. R. DOS ., GATIBONI, L. C., & KAMINSKI, J.. (2008). Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, 38(2), 576–586. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049>.
- SILVA, É. A. DA ., OLIVEIRA, G. C. DE ., SILVA, B. M., CARDUCCI, C. E., AVANZI, J. C., & SERAFIM, M. E.. (2014). Aggregate stability by the “high energy moisture characteristic” method in an oxisol under differentiated management. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 38(5), 1633–1642.
- SILVA, E. DE B., NOGUEIRA, F. D., GUIMARÃES, P. T. G., CHAGAS, S. J. DE R., & COSTA, L.. (1999). Fontes e doses de potássio na produção e qualidade do grão de café beneficiado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34(3), 335–345. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000300003>.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Eds.). *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. Cap. “Correção da acidez do solo”, p. 81–96.
- SOUZA, R. F. DE ., FAQUIN, V., TORRES, P. R. F., & BALIZA, D. P.. (2006). Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 30(6), 975–983.

TAIZ, L. et al. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2021. 888 p.

TISDALL, J.M. and OADES, J.M. (1982), *Organic matter and water-stable aggregates in soils*. Journal of Soil Science, 33: 141-163.

VALADARES, S. V., NEVES, J. C. L., ROSA, G. N. G. P., MARTINEZ, H. E. P., VENEGAS, V. H. A., & LIMA, P. C. DE .. (2013). Produtividade e bienalidade da produção de cafezais adensados, sob diferentes doses de N e K. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48(3), 296–303.

