



#### **PRESENTACIÓN**

Saludamos a nuestros lectores con mucho gusto y agradecemos la atención que brindan a este medio de comunicación. En el Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar de LAICA seguimos ofreciendo este medio de comunicación a través del cual les compartimos material editorial de interés para el sector azucarero costarricense y público en general.

Ponemos a su disposición el trabajo de dos destacados juristas vinculados al sector azucarero que resume el fundamento de la última reforma a la Ley de LAICA con el objeto de fortalecer el modelo solidario con el que esta organización ha operado desde su creación en 1965. Este es un evento que no debe pasar desapercibido y que merece un espacio para su socialización.

En nuestra sección técnica incorporamos una nota técnica sobre la nutrición de la caña de azúcar la cual podrá ser de mucha utilidad, tanto a profesionales consolidados para el refrescamiento de sus conocimientos como a estudiantes y académicos.

Esperamos que nuestro material les sea de utilidad y no dejen de hacernos llegar sus comentarios.

Ing. Erick Chavarría Soto Editor Revista Entre Cañeros Correo-e: echavarria@laica.co.cr

# **LONTENIDO**

02

Presentación

05

Reforma a la Ley N°7818: vivo ejemplo de un modelo democrático y solidario que se robustece con el pasar del tiempo.

13

Función y funcionalidad nutricional: orientado a la caña de azúcar

#### Revista Entre Cañeros

Número 25, Diciembre 2022. ISSN 2215-597X

Publicación técnica gratuita del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar Producida por la Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar.

Avenida 15 y calle 3, Barrio Tournón. San Francisco, Goicoechea. 10802 San José, Costa Rica. www.laica.co.cr





Campaña de Prevención del Trabajo Infantil en el Sector Azucarero Centroamericano.



Implementada por la Asociación de Azucareros del Istmo Centroamericano – AICA

Con la colaboración o







y el apoyo técnico de



"Esta es una sección para opinión y discusión sobre temáticas de índole exclusivamente técnicas en lo referente al entorno de la producción de caña de azúcar a nivel nacional e internacional, los temas publicados en esta sección no representan ni reflejan las políticas internas o externas de LAICA; ni personifican tampoco la manera de pensar o de opinar del Comité Editorial. Los autores deberán de asumir la responsabilidad en lo personal y de manera independiente por lo que publiquen en esta sección."



# REFORMAALALEYN°7818:VIVOEJEMPLODE UN MODELO DEMOCRÁTICO Y SOLIDARIO QUE SE ROBUSTECE CON EL PASAR DEL TIEMPO.

Lic. Christian Ocampo Vargas<sup>1</sup> Lic. Rigoberto Vega Arias<sup>2</sup>

### Introducción

El pasado 10 de agosto del 2022 se publicó en el Diario Oficial La Gaceta N°151, la Ley N°10294, intitulada: "REFORMA DE LOS ARTÍCULOS 17 BIS y 128 DE LA LEY 7818, LEY ORGÁNICA DE LA AGRICULTURA E INDUSTRIA DE LA CAÑA DE AZÚCAR, DE 2 DE SETIEMBRE DE 1998". Dicha reforma fue aprobada de forma unánime, en primer debate con 48 diputados presentes y en segundo debate con 51 legisladores, marcando todo un hito en su apoyo y tramitación, ya que fue presentado el 27 de enero de 2022 a la corriente legislativa y en tan solo cinco meses exactos (tempo récord), estaba recibiendo el segundo debate en el Plenario.

Si bien su nombre no pareciera evocar nada especialmente significativo, su contenido sí marca un derrotero en la incansable faena de consagrar uno de los pilares fundamentales en que se inspira la Ley N°7818 (en adelante "la Ley"), a saber: la subsistencia y mantenimiento del pequeño y mediano productores de caña, mediante una distribución cada vez más equitativa de la riqueza.

Así lo ordenan los artículos 1°, 2 y 57 de la Ley, al precisar que:

#### Artículo 1.-

La presente ley tiene por objetivos

mantener un régimen equitativo de relaciones entre los productores de caña y los ingenios de azúcar, que garantice a cada sector una participación racional y justa; asimismo, ordenar, para el desarrollo óptimo y la estabilidad de la agroindustria, los factores que intervienen tanto en la producción de la caña como en la elaboración y comercialización de sus productos.



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Director Ejecutivo de la Federación de Cámaras de Productores de Caña (FEDECAÑA). Correo – e: cocampo@fedecana.org <sup>2</sup> Director Jurídico de la Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA). Correo – e: rvega@laica.co.cr



El régimen jurídico aplicable a las relaciones entre los industriales y los productores agrícolas establecidos en esta ley, no se aplicará a la producción y comercialización de la panela o tapa de dulce." Lo destacado no es del original.

#### Artículo 2.

Decláranse de interés público y consonantes con los principios de justicia social y reparto equitativo de la riqueza, reconocidos en los artículos 50 y 74 de la Constitución Política, la distribución de la Cuota Nacional de Producción de Azúcar entre los ingenios y distribución del porcentaje que corresponda de la cuota de producción de cada ingenio, entre los productores independientes, en la forma establecida en la presente ley.

Para interpretar e integrar las normas contenidas en este ordenamiento, deberán tomarse en consideración los principios referidos." Lo destacado no es del original.

#### Artículo 57.

Considéranse de interés público la existencia y el mantenimiento de los pequeños y medianos productores independientes de caña y de sus organizaciones para la protección de sus derechos, establecidas conforme a la Ley de Asociaciones." Lo destacado no es del original.

Refiriéndose precisamente a la protección particular con que gozan los productores independientes de caña, en especial los pequeños y medianos, la Sala Constitucional ha indicado:

"En este caso, dicha protección especial está fundamentada en razones de interés público, pues uno de los objetivos de la ley, es la existencia y el mantenimiento de los pequeños y medianos productores independientes. Con ello el legislador pretende un adecuado reparto de la riqueza, a través de una distribución más justa que la que venía presentándose en el mercado, de conformidad con el artículo 50 de la Constitución Política y además, una producción atendiendo a principios de solidaridad nacional, según el artículo 74 de la Carta Magna." 3

Como veremos, esta reforma brinda una garantía para el 97,7% del total de productores independientes, que encajan, precisamente, en la categoría de pequeños y medianos productores, del total de productores en nómina de asignación (6.364 agricultores).

Se trata de una reforma que consolida un

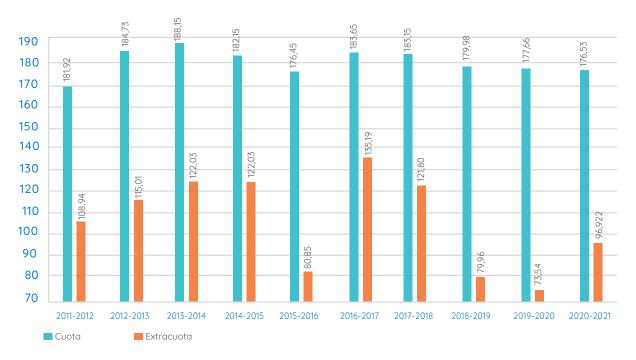
modelo maduro, sólido y ejemplar de integración

# ¿Por qué era necesaria una reforma?

En las últimas zafras se ha dado una marcada

salida de productores independientes de la actividad (más de 3.000 productores en las últimas seis zafras), socavando las bases en que se sustenta todo el modelo cañero – azucarero nacional. Muchos de estos productores eran entregadores en régimen de extracuota, siendo que, en las últimas zafras, los productores con entregas en extracuota de los ingenios: El General, Victoria y Cutris, representan cerca del 70% del total de productores inscritos.

El diferencial entre el precio de cuota y extracuota hace ruinosa la participación del productor en la actividad, condenándolo a abandonar el cultivo, tal y como se aprecia en el gráfico N°1, para el caso del Ingenio El General.



Fuente: elaboración propia. Publicaciones de LAICA con precios de liquidación final.

# Figura 1.

Precio de cuota y extracuota Ej. Coopeagri

agroindustrial piramidal (productores, ingenios y LAICA), propio del Estado Social de Derecho en el que vivimos, que propicia una repartición de las ganancias del negocio más solidaria, al permitir que los productores más pequeños y necesitados, siempre reciban el pago por sus entregas de caña a precio de cuota.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Sala Constitucional de la Corte Suprema de Justicia. Sentencia N°2004-8017 de las dieciséis horas con veintisiete minutos del veintiuno de julio de dos mil cuatro

# SECCIÓN EDITORIAL

En el año 2017 se creó el Fondo de Compensación de Productores en Régimen de Excedentes, para cubrir el diferencial entre el precio de cuota y extracuota de los pequeños y medianos productores, sin embargo, desde su creación, el Fondo ha sido insuficiente para cubrir el 100% del referido diferencial, por lo que, para garantizar la subsistencia y mantenimiento

del pequeño y mediano productor, se hacía imperioso aumentarlo.

Tal y como se muestra en el Cuadro N°1, únicamente para la zafra 2016-2017 el Fondo alcanzó para cubrir la totalidad del diferencial de precios referido. Para las zafras subsiguientes el Fondo fue insuficiente.

#### Cuadro 1.

Zafra	0,3% - Art. 17 bis ¢	Déficit para cubrir los kilogramos de extracuota de productores beneficiarios (¢)
2016-2017	330.041.043,33	-
2017-2018	302.884.285,33	249.004.202,11
2018-2019	294.486.159,00	459.904.811,73
2019-2020	289.227.474,01	448.478.310,00
2020-2021	279.265.560,00	199.819.247,87

Por su parte, la regulación actual en materia de cierre de ingenios, provoca que las cuotas de los ingenios beneficiarios de la cuota de referencia mínima (también llamados ingenios de piso) y la de sus productores independientes, se extingan en un periodo de cinco zafras, sin que la generación de una nueva cuota en el ingenio receptor de la caña, compense esa pérdida, causando un perjuicio para ellos y para los mismos productores inscritos en la nómina del ingenio al que se traslada la caña.

# ¿En qué consiste la reforma?

Podemos resumir la reforma al artículo 17 bis de la Ley como sigue:

- a) Una ampliación del Fondo de Compensación de Productores en Régimen de Excedentes destinado a los pequeños y medianos productores de caña, pasando de un 0,3% del precio de liquidación dentro de la cuota de la zafra que corresponda, valor crudo, a un 0,7%.
- b) La creación de un Fondo Adicional, con los superávits del Fondo de Compensación en las zafras que se haya cubierto el 100% del diferencial, más los réditos que genere, hasta del 0.5% del referido precio de liquidación.
- c) La autorización para que la Junta Directiva de LAICA pueda disponer que se tomen recursos de nuevos negocios, en caso de que el Fondo de Compensación y el Fondo de Adicional, sean insuficientes para cubrir dicho diferencial.

Por su parte, la regulación actual en materia de cierre de ingenios, provoca que las cuotas de los ingenios beneficiarios de



### SECCIÓN EDITORIAL

la cuota de referencia mínima (también llamados ingenios de piso) y la de sus productores independientes, se extingan en un periodo de cinco zafras, sin que la generación de una nueva cuota en el ingenio receptor de la caña, compense esa pérdida, causando un perjuicio para ellos y para los mismos productores inscritos en la nómina del ingenio al que se traslada la caña.

# ¿En qué consiste la reforma?

Podemos resumir la reforma al artículo 17 bis de la Ley como sigue:

- a) Una ampliación del Fondo de Compensación de Productores en Régimen de Excedentes destinado a los pequeños y medianos productores de caña, pasando de un 0,3% del precio de liquidación dentro de la cuota de la zafra que corresponda, valor crudo, a un 0,7%.
- b) La creación de un Fondo Adicional, con los superávits del Fondo de Compensación en las zafras que se haya cubierto el 100% del diferencial, más los réditos que genere, hasta del 0.5% del referido precio de liquidación.
- c) La autorización para que la Junta Directiva de LAICA pueda disponer que se tomen recursos de nuevos negocios, en caso de que el Fondo de Compensación y el Fondo de Adicional, sean insuficientes para cubrir dicho diferencial.

Por su parte, la reforma al artículo 128 de la Ley se hace para ordenar las transferencias de cuota cuando un ingenio cierra operaciones de forma definitiva, permitiendo que los ingenios más pequeños, beneficiarios de la cuota de referencia ajustada, junto con sus productores independientes, puedan trasladar de forma íntegra sus cuotas de referencia a los ingenios por ellos escogidos, evitando que dichas cuotas se extingan.

# ¿A quiénes beneficia el Fondo de Compensación?

Como se indicó, el Fondo de Compensación de Productores en Régimen de Excedentes es una garantía para todo pequeño y mediano productor tradicional real, que entregue en cualquier ingenio del país y que pueda llegar a tener entregas en régimen de extracuota.

Importante destacar el hecho de que, los productores nuevos no participan del Fondo, así como tampoco aquellos productores que, sumando sus entregas de caña en varios ingenios, superen las 1500 toneladas métricas.

# ¿De dónde provienen los recursos del Fondo de Compensación?

Los recursos económicos del Fondo los genera el mismo sector. Se obtienen de la liquidación de azúcar, valor crudo.

Como es lógico pensar, quienes más participación tienen en la Cuota Nacional de Producción de Azúcar, son quienes más aportan al Fondo. Es decir, los ingenios y productores más grandes, de forma solidaria, aportan más dinero para que los pequeños y medianos productores puedan tener garantizadas sus entregas a precio de cuota. No representa ningún cargo o erogación para el Estado costarricense.

Confiamos que esta reforma histórica evite el abandono de la actividad de más productores, propicie su mantenimiento en el cultivo y promocione la suma de más actores cañeros, llevando más bienestar, desarrollo y sustento a miles de familias rurales del territorio costarricense.





# FUNCIÓN Y FUNCIONALIDAD NUTRICIONAL: ORIENTADO A LA CAÑA DE AZÚCAR

Marco A. Chaves Solera<sup>1</sup>,

# Introducción

El tema de la fertilización de los cultivos es la mayoría de las veces visto de manera simplista y hasta despectivo como práctica de campo de gran relevancia y arraigo tradicional, de la que todos manifiestan en principio y por experiencia conocer a profundidad, interpretando y concibiendo a su vez la labor en apenas "regar producto fertilizante para que las plantaciones crezcan y produzcan"; para lo cual se deben buscar además como parte del éxito empresarial, fórmulas de bajo costo.

Lo tradicional y familiar de la práctica la convierte en algo habitual a lo que se le presta lamentablemente una atención más comercial que tecnológica, pues la preocupación trasciende y se concentra mayoritariamente en el costo involucrado y menos en la calidad del producto seleccionado y eficiencia de la labor ejecutada integralmente en el campo. Esta concepción y percepción resulta inconveniente y poco consecuente con la realidad técnica y fundamento profundo propio de la complejidad intrínseca que tiene el tema implicado e involucrado con la práctica, cuyas consecuencias positivas y negativas corren y expresan en varias direcciones: productiva, nutricional, ambiental, financiera y la asociada con la calidad del producto final.

La razón y motivo de incorporar un producto comercial al suelo más que la simpleza del acto

de "fertilizar" es aportar de manera oportuna y efectiva los elementos minerales esenciales que la planta en este caso de caña de azúcar requiere, para satisfacer a cabalidad sus necesidades fundamentales y alcanzar un estado de nutrición general favorable y equilibrado, que le permita materializar en producto vegetal su potencial genético expresado en una mayor producción de biomasa y concentración de sacarosa en los tallos industrializados en la fábrica de azúcar.



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Ingeniero agrónomo, M. Sc. Especialista en el cultivo de la caña de azúcar. Correo - e: chavessolera@gmail.com

Es necesario e imperativo conocer con algún grado de detalle que ocurre en el suelo cuando se aplica un fertilizante químico u orgánico, para poder dimensionar y juzgar con buen criterio el efecto provocado y planificar con los elementos necesarios y la previsión debida, lo que resulta más satisfactorio incorporar para potenciar y optimizar los múltiples y complejos procesos fisicoquímicos y microbiológicos involucrados.

Este conocimiento opera por la concurrencia de numerosos factores bióticos y abióticos de carácter atmosférico, edáfico, hídrico, fisiológico, metabólico, fitosanitario y ambiental actuando a través de mecanismos de reacción, interacción, sinergismo, antagonismo y balance de diversa naturaleza, como lo ha señalado Chaves (1999, 2017, 2021acj).

Fertilizar bien una plantación es mucho más complejo de lo que se piensa, como será demostrado más adelante, pues como se indicó, es una práctica multivariada y multifactorial que debe ser concebida, visualizada y contextualizada en la misma dimensión si se desea optimizar la misma superando la concepción simplista que lo habitual y tradicional han instaurado.

Es imperativo diferenciar e interpretar correcta y discrecionalmente los conceptos de **fertilizar y nutrir**; como también entender lo que significa **función y funcionalidad** de los elementos en materia nutricional. Sin el entendimiento profundo y correcto de la práctica, la labor del agricultor seguirásiendo la de simplemente "regar fertilizante en el campo" con las consecuentes ineficiencias y pérdidas derivadas.

La caña de azúcar como es bien conocido y está suficientemente demostrado, es un cultivo semiperenne de características muy especiales que posee una alta capacidad y potencial extractor de nutrimentos del suelo, requiriendo además considerables cantidades de fertilizantes a base de macro y

micronutrientes para suplir y complementar sus necesidades vitales, debido a su elevada capacidad de producción de biomasa traducida en tallos industrializables, que en peso fresco alcanza un valor cercano o superior en el caso nacional a 75 toneladas de caña por hectárea (Chaves 2022a); lo cual, asociado a la prolongada duración de su ciclo vegetativo, implica una elevada extracción de nutrimentos del suelo, que caso de no ser restituída se traduce en un grave y sistemático estado de infertilidad.

Con el objeto de conocer con alguna profundidad aceptable varios de los factores, elementos y circunstancias que operan luego que un producto fertilizante es aplicado e incorporado al suelo, se exponen seguidamente algunos de los mecanismos involucrados considerados como relevantes para comprender y dimensionar la complejidad de los mismos y la importancia de prestar toda la atención debida a la selección del mejor producto comercial, optimizar la práctica de dosificación, adición y acondicionamiento del medio en lo necesario para que la eficiencia sea la mejor.

# El suelo y su importancia

Elsuelo es el medio natural que proporciona a las plantas el sostén físico, agua y nutrientes para su desarrollo. Es definitivo que el suelo es un ente vivo muy activo y dinámico que presenta por lo general una alta variación y heterogeneidad que lo tipifica y que establece su diferenciación. El suelo está compuesto por ingredientes sólidos, líquidos y gaseosos, cuyas propiedades y características que los tipifican son muy variadas de acuerdo con el tipo y la condición particular de la región donde se ubica.

Se denomina suelo y conoce popularmente como tierra a la sección más superficial de la corteza terrestre, biológicamente muy activa, que proviene de la desintegración o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos orgánicos producto de la



actividad biológica que se desarrolla a nivel superficial.

La SBCS (1993) define formalmente al suelo como, la "Materia mineral no consolidada, en la superficie de la tierra, que fue sujeta e influenciada por factores genéticos y ambientales del material de origen, clima (incluyendo efectos de humedad y temperatura), macro y microorganismos y topografía, todos actuando durante un periodo y produciendo un producto- suelo, el cual difiere del material del cual es derivado en muchas propiedades y características físicas, químicas, mineralógicas, biológicas y morfológicas."

La misma fuente también lo precisa de manera más simple como, el "Material mineral y/o orgánico no consolidado en la superficie de la tierra que sirve como un medio natural para el crecimiento y desarrollo de las plantas terrestres."

A criterio de Chaves (2022c), "El suelo es por naturaleza un factor muy complejo de conocer y aún más de manejar virtud de la cantidad y diversidad de factores y elementos que lo estructuran, definen, interactúan y condicionan. Componentes pedogenéticos, morfológicos y taxonómicos; físicos manifestados en su composición textural; mineralógicos en la disposición mineral estructural; microbiológicos por la biota presente; hídricos y gaseosos, entre

otros asociados con la fertilidad potencial, con todas sus relaciones de interacción, reacción, sinergismos y antagonismos, conforma el entorno que en estrecha relación con los demás factores (clima, planta, manejo, etc.) bióticos, abióticos y antropogénicos caracterizan y tipifican una determinada condición para desarrollar agricultura.

Realmente el suelo es una estructura heterogénea, disímil y muy desigual sobre la cual no se pueden establecer generalizaciones en ningún ámbito territorial, sea macro o micro, pues el grado de error e incertidumbre puede llegar a ser muy alto. Esta realidad



suficientemente comprobada y demostrada obliga necesaria e imperativamente acudir al muestreo del suelo para ahondar en su conocimiento."

Otros autores de manera más elocuente y expresiva lo definen como la sección más visible "...en donde sembramos las cosechas, edificamos nuestras casas y enterramos a nuestros muertos".

Por estructura y conformación los hay de muy diversos tipos como acontece con los suelos arenosos, limosos, arcillosos, francos, calcáreos, humíferos, orgánicos inundados, pedregosos, mixtos, urbanos y hasta congelados.

Para conocer y poder caracterizar un suelo se emplea el denominado "perfil del suelo" representado por la sección vertical compuesta por "horizontes" que se extienden hacia el interior del material de origen. El perfil es apenas un tajo que equivale a un corte histológico o a una sección petrográfica. Dicha sección permite apenas realizar una caracterización limitada para fines de interpretación, considerando que el suelo es un cuerpo tridimensional muy variable y complejo.

La sección o corte vertical del suelo llamada perfil está compuesto, como se indicó, por horizontes situados en el mismo plano. De acuerdo con Chaves (2022c) "En un perfil de suelo todos sus horizontes se ordenan en perspectiva vertical, formándose a partir de la sucesión de los horizontes que pueden apreciarse y diferenciarse al realizar un corte transversal en el substrato.

Unhorizonte se refiere entoncesa un conjunto de estratos ubicados en formación horizontal que se originan en el interior del suelo y que poseen diversas propiedades y cualidades de composición, textura, adherencia y otros que pueden diferenciarse. Esas capas horizontales vistas y proyectadas en perspectiva vertical y



denominadas horizontes, conforman el perfil del suelo. Los horizontes se distinguen entre sí por el tamaño de las partículas minerales (textura) que contienen, la presencia o ausencia de materia orgánica, presencia de piedras, el color distintivo, el contenido de humedad y el grado de adhesividad, entre otras cualidades."

Como se indicó, el perfil se compone de horizontes definidos por la SBCS (1993), como "Secciones de constitución mineral u orgánica, aproximadamente paralelas a la superficie del terreno, parcialmente expuestas en el perfil del suelo y dotadas de propiedades generadas por procesos formadores de suelo que le confieren características de inter-relacionamiento con otros horizontes componentes del perfil, los cuales se diferencian en virtud de la diversidad de propiedades resultantes de la acción de la pedogénesis."

¿Qué relevancia, trascendencia y relación tiene lo anotado y señalado anteriormente con el tema de la nutrición mineral y fertilización de las plantas? La respuesta es muy simple y contundente: muchísima.

Esto por cuanto el suelo es irrefutablemente y como está comprobado y demostrado, el principal y mayor factor proveedor de nutrimentos para los vegetales; razón por la cual su condición y características incide de manera directa y determina significativamente la capacidad de uso de un suelo y el potencial productivo de un cultivo.

El perfil y sus horizontes son el medio correcto para poder interpretar con buena aproximación las características, propiedades, atributos, potenciales y limitantes de este.

Conocer el suelo con suficiente detalle es tener la capacidad de proyectar a futuro sobre base firme respecto a las posibilidades de adaptar y desarrollar cultivos con posibilidades reales de lograr alcanzar grados de productividad, rentabilidad y competitividad importantes y sostenibles en el tiempo. En contrario, no hacerlo, significa operar en un contexto penumbroso de improvisación, sesgo y probabilidades elevadas de incurrir en errores onerosos, por más planificación y recursos que se tenga.

Una valoración genérica y ligera revela que en el suelo se fundamenta en alto grado el éxito que se pueda tener en materias diversas pero determinantes como son la capacidad de adaptación vegetal, las labores de mecanización, preparación y manejo del terreno, la fertilización y nutrición satisfactoria del cultivo, el riego y drenaje de las plantaciones, la afectación por malezas, la ocurrencia de eventos de erosión y necesidades de conservación de recursos (edáfico, hídrico, biodiversidad), previsión de impactos ambientales potenciales por manejo del campo y los cultivos (contaminación, quemas, agroquímicos, etc.), efectos fitosanitarios causados por plagas y patógenos, entre

# Nutrimentos minerales esenciales

El tema aludido reviste especial y particular relevancia virtud de la implicación directa que tienen los elementos químicos existentes y disponibles en el suelo sobre la materia nutricional abordada, relacionados en este caso con los nutrientes requeridos y absorbidos por las plantas.

Desde aquí empieza a vislumbrarse la importancia y necesidad de conocer y desarrollar la temática contenida en el presente artículo, pues todo pasa por una relación sistémica y sucesiva de eventos

concatenados como se expresa en la Figura 1, donde la presencia y disponibilidad del elemento mineral en el suelo, favorecido por su estado de solubilidad y especie química existente, es absorbida por las raíces y transportada vía xilema y distribuída por el floema en el interior de la planta (protoplasto). Si el nutrimento es de naturaleza esencial pasa a ser asimilado,

procesado (anabolismo) e incorporado en el lugar y forma apropiada para ser utilizado por la planta en sus procesos fisiológicos y metabólicos vitales, activando y acompañando procesos o en su caso generando los productos finales. Se parte de elementos simples y llega por procesos de síntesis sucesiva a formar tejidos y órganos que se traducen en biomasa.



Figura 1. Sistemática de acción de los nutrimentos en la relación Suelo-Planta.

El término elemento mineral esencial denominado también nutrimento mineral, en sentido estricto, corresponde a la forma química del elemento mineral esencial que está disponible para que la planta u organismo vegetal lo adquiera.

El tema de la esencialidad nutricional en la agricultura fue abordado y ampliamente desarrollado por Chaves (2022b), exponiendo tanto el criterio funcional basado en los preceptos establecidos por Arnon y Stout en 1939 que sirvieron de base por muchos años para desplegar y explicar con criterio científico la esencia vital de un elemento químico para las plantas vasculares, los cuales "...establecen requisitos que deben ser cumplidos y satisfechos a cabalidad para que un elemento pueda ingresar y calificar en este selecto grupo de nutrimentos bajo la categoría de "esenciales", como son:

- a) La ausencia del elemento le impide al vegetal alcanzar un crecimiento y desarrollo satisfactorio, impidiéndole completar su ciclo vegetativo natural, pudiendo inclusive morir.
- b) Los síntomas de deficiencia pueden ser corregidos solo incorporando y abasteciendo el elemento causante, no pudiendo ser reemplazado o sustituido por otro elemento.
- c) La función e influencia del elemento debe ser conocida.
- d) La acción del elemento debe ser directa sobre la nutrición de la planta y no sobre otros factores, reacciones del entorno o el substrato."

Por muchos años la esencialidad nutricional en el área vegetal quedó establecida en 16 elementos químicos; sin embargo, los avances, las mejores técnicas analíticas y las nuevas evidencias alcanzadas por la tecnología con los años adecuaron, recalificaron y modificaron el concepto de "esencialidad de un elemento" favoreciendo una definición más moderna como la sustentada por Epstein y Bloom (2006), la cual expresa, que:

"Un elemento es esencial si satisface uno o ambos de dos criterios:

- el elemento es parte de una molécula que es un componente intrínseco de la estructura o del metabolismo de la planta;
- 2) la planta puede ser tan severamente privada del elemento que exhibe anormalidades en su crecimiento, desarrollo o reproducción -esto es, en su actividad -en comparación con plantas menos privadas."

Esta nueva revisión conceptual llevó a contabilizar y sumar un nuevo elemento (níquel= Ni) al histórico de los 16 tradicionales conocidos, elevando el número de esenciales a 17, y también, a ubicar elementos particulares que no

cumplían a cabalidad con los criterios establecidos y aplicables para todas las plantas vasculares, sino apenas para algunas, como aconteció con el silicio (Si), sodio (Na), cobalto (Co) y selenio (Se), lo que generaba alguna selectividad y especificidad vegetal. El caso del Si es el más reconocido en caña de azúcar pues su empleo ha tenido alguna relevancia comercial, secundado por el Co del cual la investigación ha venido generando resultados interesantes.

Antes del 2003 el níquel no era aún considerado un micronutriente esencial, lo que con la investigación se recalificó. En dicho caso, Epstein y Bloom (2006) consideraron no conveniente ni apropiado nombrar a los que no satisfacían a plenitud los fundamentos vigentes como "no esenciales", sugiriendo más bien aplicar términos más oportunos y conformes con esa particularidad, como son: nutrimentos aparentemente no esenciales o no conocidos como esenciales

En torno a este tema Malavolta (1980) categoriza e incorpora adicionalmente el concepto de *elementos útiles y tóxicos* en referencia a los que no califican estrictamente como esenciales; para lo cual Alcántar y Trejo (2013) emplean más



# Cuadro 1.

Clasificación de los elementos minerales de acuerdo al nivel de requerimiento por las plantas.

Clasificación	Requerimieto por las plantas
Elementos indispensables	Aquellos de importancia vital para la nutrición de la planta y que reunen los requisitos establecidos por los criterios de esencialidad. Son 17 los ubicados en esta categoría: C, H, O, N, P, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Ni y Cl.
Elementos Útiles	Los elementos que en una forma directa o indirecta benefician la nutrición de las plantas superiores o de algunas específicas, sin ser indispensables en la nutrición vegetal, como: Si, Co, Na y Se.
Elementos Prescindibles	Elementos que no son absorbidos por la planta, pero que no realizan funciones fisiológicas específicas, ni benefician directamente o indirectamente el crecimiento de las plantas.

Fuente: Alcántar y Trejo (2013) y Chaves (2022b).

recientemente en su ordenamiento otros términos considerados como adecuados para su nombramiento, como son *elementos útiles y prescindibles*, como se anota y describe en el Cuadro 1.

Debe quedar claro para fines y efectos nutricionales que en la actualidad se consideran 17 elementos químicos (14,4%) de los 118 reconocidos e integrados en la tabla periódica, que cumplen y satisfacen los preceptos establecidos para calificarlos como esenciales para las plantas vasculares; existiendo otros que no son esenciales, pudiendo las plantas vivir y desarrollarse sin su presencia, pero que pueden sin embargo contribuir en algunos vegetales con la fisiología del crecimiento y la producción o la tolerancia y adaptación a condiciones desfavorables del medio (clima plagas, patógenos, toxicidades). Esos se elementos se reconocen entonces

como: útiles, aparentemente no esenciales o no conocidos como esenciales; también están los prescindibles y los tóxicos para el tejido vegetal.

Los elementos minerales que posean la capacidad de compensar los efectos tóxicos generados por otros elementos o los que simplemente reemplacen (Rb+ por K+) a los nutrientes minerales en algunas de sus funciones específicas menores, tales como el mantenimiento de la presión osmótica, no son conceptualmente estrictamente esenciales, aunque pueden ser considerados por la función que ejercen como elementos beneficiosos. Aún con todo el desarrollo tecnológico alcanzado resulta difícil establecer y discernir qué elementos son esenciales para el crecimiento normal de las plantas; lo cual puede y de seguro va a cambiar a futuro.

Sobre este hecho tan significativo anota Chaves (2022b) que, "... a la fecha se tienen identificados un total de 118 elementos químicos diferentes que se encuentran contenidos y ordenados en la tabla periódica de uso mundial, de los cuales 26 (22%) han sido obtenidos en laboratorio por lo que son sintéticos, es decir, artificiales, lo que significa que no existen en la naturaleza sino, únicamente, creados en los laboratorios.

Quedan por tanto 92 (78%) elementos que, si pueden ser ubicados y encontrados en el entorno natural..."

En esta materia es importante tener presente y considerar siempre que las plantas poseen una capacidad muy limitada para desarrollar una absorción selectiva de minerales del suelo, por lo cual muchos de los cuales no llegan a ser estrictamente necesarios para su crecimiento y pueden, inclusive, llegar a ser tóxicos, como acontece por ejemplo con el aluminio (Al), como lo expusiera con gran detalle Chaves (2021h).

En consecuencia, la composición mineral de los diferentes suelos en que crecen las plantas no permite establecer si un elemento mineral es esencial o no. La planta absorbe lo que esta soluble y disponible.

Procurando conocer con mayor profundidad la relación de cantidades y proporcionalidades que existe entre elementos químicos, se presenta en el Cuadro 2 un detalle de los 17 nutrimentos calificados y aceptados actualmente como esenciales, indicando la forma química preferencial en que las raíces los toman y absorben a partir del suelo, medio nutritivo o solución hidropónica en que pudieran encontrarse.

Se infiere que a pesar de encontrarse en concentraciones que van del 2 al 10% del peso de las plantas, los mismos ejercen una influencia importante y determinante sobre las fases de crecimiento y desarrollo general de las mismas.

Es definitivo que "ni la presencia ni la concentración de un elemento mineral son criterios suficientes y válidos para establecer su grado de esencialidad nutricional".



# Cuadro 2.

Formas químicas de absorción de los elementos esenciales (17) en las plantas superiores y sus concentraciones promedio.

Elemento Símbo	Símbolo	Forma absorbida	Expresión en	Mecanismo de	Movolidad en la	Concentración en tejido seco		N° relativo de átomos
		por plantas Fertilizantes movilización		planta	mg kg <sup>-1</sup>	(%)	comparado con el Mo	
Molibdeno	Мо	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , HMoO <sub>4</sub> -	MoO <sub>4</sub>	Flujo masas	?	0,1	0,00001	1
Níquel	Ni	Ni <sup>2+</sup>	Ni	Difusión		6	0,00060	100
Cobre	Cu	Cu <sup>3+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , CuCl <sup>2+</sup> , CuOH <sup>+</sup> , quelatos	Cu	Flujo masas	-	6	0,00060	100
Zinc	Zn	Zn²-, quelatos	Zn	Flujo masas Intercepción	±	20	0,00200	300
Manganeso	Mn	Mn²+, quelatos	Mn	Flujo masas Intercepción	±	50	0,00500	1.000
Boro	В	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , HBO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , BO <sub>3</sub> <sup>-3</sup> , B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> <sup>-2</sup>	$B_2O_3$	Flujo masas	-	20	0,00200	2.000
Hierro	Fe	Fe³+, Fe²+, quelatos	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Flujo masas	-	100	0,01000	2.000
Cloro	Cl	Cl <sup>-</sup>	Cl		?	100	0,01000	3.000
Azufre	S	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	S	Flujo masas	±	1.000	0,10000	30.000
Fósforo	Р	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$P_2O_5$	Difusión	?	2.000	0,20000	60.000
Magnesio	Mg	Mg <sup>2+</sup>	MgO	Intersección Flujo masas	?	2.000	0,20000	80.000
Calcio	Ca	Ca <sup>2+</sup>	CaO	Intersección Flujo masas	-	5.000	0,50000	125.000
Potasio	K	K <sup>+</sup>	K <sub>2</sub> O	Difusión	?	10.000	1,00000	250.000
Nitrógeno	N	NO3 <sup>-</sup> , NH4 <sup>+</sup> , urea, amidas, aminoácidos	N	Flujo masas	?	15.000	1,50000	1.000.000
Oxígeno	0	O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O				450.000	45,00000	30.000.000
Carbono	С	CO <sub>2</sub>				450.000	45,00000	35.000.000
Hidrógeno	Н	H <sub>2</sub> O				60.000	6,00000	60.000.000

Fuente: Chaves (2022b); Epstein y Bloom (2006); Alcántar y Trejo (2013); Salisbury y Ross (1994); Bertsch (1998). Nota: Las formas más comunes de absorción son Cu²+, Fe²+ y H, PO₄⁻. La información contenida en dicho cuadro evidencia, ubica y da sustento al criterio y razón de clasificarlos en las categorías de macro y micronutrimentos, con base en la cantidad presente y no necesariamente por su importancia nutricional, fisiológica, metabólica y/o productiva.

Por consenso mundial los elementos esenciales virtud de las cantidades presentes e involucradas tanto en suelo como en la planta, lo que nada tiene que ver con su importancia fisiológica y efecto productivo, se ordenan en dos grandes grupos como sigue:

# A. Macronutrimentos: N, P, K, Ca, Mg y SB. Micronutrimentos: Fe, B, Cu, Zn, Mn, Cl, Mo y Ni

Por comodidad para fines comerciales y pragmáticos aplicables a la nutrición de cultivos y la fertilidad del suelo, también se ha establecido un suborden siguiendo el mismo principio (cantidades), desagregando los primeros al calificarlos como:

# C. Macronutrimentos primarios: N, P y KD. Macronutrimentos secundarios: Ca, Mg y S

La mayor parte de los **micronutrimentos** contenidos en las plantas son constituyentes enzimáticos y, en consecuencia, son requeridos en cantidades muy pequeñas por lo cual se agrupan bajo la denominación de microelementos, elementos traza, menores u oligoelementos. Su nombre hace referencia a la baja concentración en la que se encuentran contenidos en los tejidos, la cual es inferior al 0,1% (menos de 3 µmol g-1 de peso seco o 0,1-100 ppm); sin embargo, cuando se acumulan en exceso (lo que puede suceder con alguna facilidad), resultan tóxicos para la planta.

En cambio, los denominados **macronutrimentos** son parte constituyente de las biomoléculas estructurales, tales como proteínas, lípidos o carbohidratos, o actúan

como osmolitos o compuestos que afectan la ósmosis al encontrarse solubles en solución dentro de la célula, o en el fluído circundante. Estas diferencias en su función quedan reflejadas en las distintas concentraciones promedio que estos nutrimentos presentan en los análisis de contenido mineral de un determinado vegetal. Los micronutrimentos sonendefinitivatanesenciales como cualquier macronutrimento y, en consecuencia, deben cumplir los mismos requisitos que éstos en un programa de fertilización.

En lo que compete propiamente a la expresión de los fertilizantes disponibles en el comercio para uso en el campo, la notación tiene un orden estricto y fijo de alcance mundial en lo concerniente a la ubicación de los nutrimentos en el recipiente contenedor (saco, bolsa, etc.), que permite conocer con absoluta certeza el contenido del producto que se adquiere, cuyo enunciado es el siguiente:

Esta notación como se indicó es la que aplica y reconoce internacionalmente y sobre la cual se fundamenta por comodidad el giro comercial de las formulaciones fertilizantes y las técnicas de la fertilización de los cultivos en el mundo.

# Movilización y absorción nutricional

Es un hecho conocido que las plantas toman del suelo por medio de su sistema radical los componentes solubles esenciales (y también los no esenciales) para la formación de biomasa, a excepción del carbono. Tanto los macronutrientes disponibles en solución como los micronutrientes son incorporados desde la solución salina del suelo, absorbidos y conducidos hasta el interior de las células donde son asimilados, almacenados, metabolizados o transportados a otras células, tejidos u órganos.



Manifiestan Villalobos y Killorn (2001) que los conceptos de **adquisición y absorción** de iones son por su fondo diferentes, siendo el primero más amplio por involucrar procesos que afectan la dinámica de los nutrimentos previo a su absorción y que ocurren en la rizosfera. La absorción de acuerdo con esa concepción implica apenas la transferencia de los elementos minerales contenidos en la solución del suelo al interior de la raíz.

En una planta que se encuentre en estado activo de crecimiento existe una fase de agua líquida continua que se extiende desde la epidermis de la raíz hasta las paredes celulares del parénquima foliar.

Generalmente se acepta que el movimiento del agua desde el suelo al aire, a través de toda la planta, se puede explicar por la existencia de gradientes de potencial hídrico que se forman a lo largo de toda la vía.

En este caso el agua entra en las raíces como respuesta al surgimiento de un gradiente de potencial hídrico en los conductos del xilema, generado por efecto de la transpiración de la planta.

Como es lógico pensar, el agua ingresará con mayor rapidez a través de aquellas secciones de la raíz que ofrezcan menor resistencia, lo cual depende de diversos factores y también de la especie vegetal de que se trate.

Es bien conocido que la productividad de los cultivos está determinada por la presencia de condiciones ambientales y de entorno favorables, entre las cuales la disponibilidad de nutrimentos en el suelo es fundamental. No siempre es viable disponer de esas ventajas virtud de que los suelos varían significativamente en propiedades fisicoquímicas y biológicas que de una u otra forma, afectan o potencian el desarrollo y rendimiento del cultivo.

Propiedades y características tales como la textura y el tipo de arcilla presente, la capacidad de intercambio iónico (catiónico, aniónico), el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas prevalecientes, afectan la solubilidad, disponibilidad y acceso de los elementos esenciales; en tanto que el genoma de la planta, los microorganismos, la temperatura, el grado de humedad y el pH del suelo afectan directamente el mecanismo de absorción de nutrimentos por la planta.

De manera simple y genérica se considera que en la nutrición vegetal intervienen dos importantes y trascendentes actividades que operan y regulan: a) el movimiento de los nutrientes en el suelo hasta llegar a las raíces y b) su absorción y asimilación por la planta, como se muestra en la Figura 2. La raíz viene a ser funcional e inequívocamente "la boca de la planta".



# Figura 2

La raíz es la boca de la planta.

Desde la perspectiva fisiológica, la regulación de la homeóstasis concebida como un estado de equilibrio existente en la célula mantenido por procesos internos de auto regulación, requiere necesariamente de la vinculación, articulación y acoplamiento de al menos cuatro procesos considerados fundamentales, como son:

- a) la movilización de los nutrimentos en la rizosfera y su adquisición por la raíz
- b) su translocación y transporte en el xilema
- c) su adquisición, utilización y almacenaje en la sección foliar
- d) su translocación y redistribución interna vía floema

El estudio de la homeóstasis de nutrientes en plantas procura entender los complejos procesos que operan en las fases de adquisición, transporte, asimilación, distribución y redistribución de los nutrimentos esenciales, y los mecanismos que

se utilizan para mantener la concentración necesaria de los mismos en el organismo para un correcto funcionamiento del sistema, evitando acontezca una inconveniente y poco deseada acumulación excesiva que lo dañe y perjudique.

Como se ha comentado con suficiencia y amplitud, el crecimiento y desarrollo general de las plantas depende y está directamente asociado con varios factores que lo influyen y determinan, los cuales van desde la regulación génica hasta los factores climáticos y edáficos, sin obviar el manejo a que sea sometido el cultivo. Para una especie vegetal como la caña de azúcar situada en un ambiente particular. los factores de crecimiento considerados primarios y más importantes son la luz, el agua, el CO<sub>2</sub> y los nutrimentos minerales disponibles y accesibles en el medio. Como se ha reiteradamente señalado "la caña de azúcar es una planta de luz y agua" (Chaves 2020a).

El flujo de nutrimentos que asiste y regula el sistema suelo-planta mantiene un vínculo y relación estrecha y directa con factores como el ambiente, el sistema radical de la planta, el manejo agronómico que se le proporcione a ésta, los factores socioeconómicos asociados; todos gobernados por complejas interacciones (sinergismos, antagonismos, balances) que se dan entre las raíces de la planta, los microorganismos del suelo, las reacciones químicas y los diferentes mecanismos que operan la disponibilidad y el movimiento en el medio (Chaves 2020e).

Entre dichos procesos se tienen los asociados con la mineralización de la materia orgánica que involucra la aminación, nitrificación, desnitrificación, volatilización, inmovilización, fijación, precipitación, lixiviación e hidrólisis, entre otros (Chaves 2021bcfgi).

En general se acepta que el contenido de nutrientes esenciales presente en los tejidos de la planta está influenciado y determinado

por varios factores, entre los que destacan: a) la dotación génica natural de la planta; b) la disponibilidad de nutrimentos en el suelo o el medio de cultivo donde se encuentre situada, y c) el momento fenológico o edad de la planta y el órgano o tejido vegetal que se considere.

El contenido y el movimiento que siguen los nutrimentos en el interior de la planta depende mucho de la capacidad de absorción y de la demanda que tenga el vegetal por el elemento, lo cual involucra diversas actividades metabólicas vinculadas entre sí, como son: a) liberación del elemento a la solución del suelo, b) movilización hacia la raíz, c) absorción por las raíces y d) translocación y movilización del nutriente dentro de la planta.

Estas fases operan de manera simultánea y continua como sistema integrado, de tal forma que, si alguna fuera intervenida, todo el proceso se vería afectado.

El suministro de nutrimentos esta por esta circunstancia supeditado y gobernado por la concentración y la forma o especie química del elemento presente en la solución de suelo, la capacidad de retención (adsorción) del elemento que posea el suelo, el grado de humedad y la demanda y capacidad de absorción que posean las raíces de la planta para estos elementos. Los factores asociados con la interacción suelo-planta-atmósfera son los que definen la cantidad del nutrimento que puede ser finalmente absorbida por el vegetal.

# Mecanismos de movilización y transporte

En lo particular y específico vinculado con la nutrición de las plantas, existen tres mecanismos conocidos por medio de los cuales un nutrimento puede acceder desde el suelo a la planta, como son: a) Intercepción: las raíces al crecer y movilizarse en el espacio poroso del suelo ocupan áreas contiguas al de los nutrimentos, pudiendo por ello entrar en contacto directo y ser absorbidos sin ejercer ningún tipo de movimiento. En este mecanismo es necesario para poder absorberse, que el ión adsorbido electrostáticamente en el coloide del suelo o la raíz no este retenido con mucha fuerza.

La excreción metabólica de ácido carbónico por las raíces se disocia en la solución del suelo como H+ y HCO3-, favoreciendo con ello que los protones difundan hasta el coloide, pudiendo entonces intercambiarse con otros cationes adsorbidos en éste, lo que ocurre a una distancia no superior a 5 mm entre raíz y coloide.

La cantidad de nutrimentos accesada por esta vía es por lo general proporcionalmente pequeña. La acción del mecanismo depende del volumen de suelo ocupado por el sistema y la morfología de las raíces, el tipo de cultivo y raíces presente y la concentración de nutrimentos contenida en el área de acción. La relación área/volumen de raíces es considerada determinante.

en el suelo en continuo movimiento conteniendo nutrimentos disueltos. Cuando la planta absorbe agua para reemplazar la que se ha perdido por causa de la transpiración, se generará consecuentemente un flujo continuo de nutrimentos hacia su interior. En dicho mecanismo los iones son transportados disueltos en el agua que se mueve desde la solución del suelo hacia la raíz y es absorbida por efecto de la transpiración de la planta; circunstancia por la cual la proporción de agua que circule por la raíz es influyente.

La concentración del nutrimento presente en la solución del sue lo y próxima a la raíz, puede reducirse, mantenerse o incrementarse dependiendo del balance que prevalezca entre la cantidad suplida a la raíz por flujo de masas y la cantidad que el vegetal absorba. La contribución del acceso de iones por flujo de masas se calcula a partir de la concentración del ión en la solución del suelo, el grado de solubilidad del nutrimento y el volumen de agua que es transpirado por la planta. En suelos salinos el Ca y el CI pueden ser suplidos por esta vía. El mecanismo corresponde a un tipo de transporte pasivo por no incurrir en aasto de energía metabólica.

c) Difusión: este mecanismo se refiere al movimiento que se da de nutrimentos disueltos en una solución de mayor a otra de menor concentración, a lo largo de un gradiente de concentración creado por las raíces. Este mecanismo aparece cuando los otros dos son insuficientes para satisfacer las demandas de la planta, generando una fuerza de difusión; el mismo cobra importancia cuando la demanda por nutrimentos

excede la tasa de suministro mediante el flujo de masa, en cuyo caso las raíces crean un "efecto sumidero" que logra reducir y agotar la concentración existente en la rizosfera, generando el gradiente de concentración. Cuanto mayor sea el gradiente de un ión mayor será su tasa de difusión.

La velocidad de difusión de los nutrimentos depende del contenido de agua existente en el medio; como también de la temperatura del suelo. La difusión se da cuando las raíces absorben iones de la solución del suelo disminuyendo su concentración en esa área, movilizando iones similares de puntos próximos de mayor concentración.

El ritmo de difusión es más intenso y dinámico en suelos con bajo contenido de arcillas, humedad óptima y mayor concentración iónica presente en la solución del suelo. Según Barber (1974) la distancia del movimiento nutricional empleando este mecanismo se ubica en el ámbito de 0,1 a 15 mm; lo que habilita poder suplir solo elementos que se localicen a esa distancia.

27



La Figura 3 presenta un esquema donde se evidencian los factores, procesos y mecanismos que participan y contribuyen con el transporte y movilización de los nutrimentos de la solución del suelo a la planta, lo que involucra la raíz, la concentración del elemento en la rizósfera, la condición del medio y la actividad biológica del suelo, entre otros. Es de esperar que las raíces crezcan, se desarrollen y lleguen a distancias donde puedan acceder a los nutrimentos disponibles. Por lo general y basado en criterios probabilísticos, es factible que las raíces más nuevas estén ubicadas en áreas de mayor concentración respecto a las más maduras, lo que favorece la absorción nutricional.

Proceso	Función y requerimiento
Desarrollo de la raíz	Longitud y distribución, morfología
Absorción de nutrimentos	Concentración en la rizósfera Cinética de concentración
Flujo de masas, Difusión	Transpiración Gradiente de concentración
Movilización por raíces (desorción, disolución, hidrólisis de compuestos orgánicos)	Exudados radicales pH en solución del suelo Enzimas
Movilización por organismos simbióticos	Micorrizas, Bacterias

Fuente: Rodríguez et al (2013); Jungk (1991).

# Figura 2.

Procesos y factores involucrados en el movimiento de los nutrimentos del suelo a la planta.



En los Cuadros 3, 4 y 5 se presentan algunos datos y resultados interesantes de investigación científica relativos a los mecanismos de movilización y absorción predominantes según nutrimento esencial, aplicados a una gramínea (maíz) también de ciclo metabólico vía C4 similar al de la caña de azúcar. Es muy importante tener presente la compleja y dinámica relación de transporte, movilización y absorción mineral que ocurre en el suelo, al momento de planificar y conducir el tema de la fertilización y la nutrición del cultivo, pues es claro que algunas prácticas de campo van en asocio directo con buscar el máximo aprovechamiento y optimización del oneroso producto mineral u orgánico que se aplique con ese objetivo.

Factores como la humedad, la textura y la condición de fertilidad actual y potencial del suelo, el lugar donde se aplique el fertilizante, el tipo, la dosis de nutrimento y la forma en que será incorporado. las características del desarrollo radicular de la planta, el ciclo vegetativo y momento fenológico del cultivo, las condiciones de clima prevalecientes y hasta la variedad (genómica) involucrada, entre otros, son elementos determinantes para el éxito que pueda tener un proyecto agroempresarial en su desarrollo. Todos esos factores técnico-ambientales y edáficos, sumados al económico y la expectativa productiva esperada alcanzar, deben ser considerados al momento de diseñar un programa de fertilización del cultivo.

### Cuadro 3.

Mecanismos de movilización de algunos nutrimentos esenciales en plantas de maíz desarrolladas en un suelo fértil.

Nutrimento	Porcen	Mecanismo		
Notimento	Intercepción	Flujo de masas	Difusión	dominante
N	1	79	20	Flujo de Masas
Р	2	5	93	Difusión
K	2	18	80	Difusión
Ca	150	375	0	Flujo de Masas Intercepción
Mg	33	222	0	Flujo de Masas Intercepción
S	5	295	0	Flujo de Masas
Fe	13	66	21	Flujo de Masas
Zn	43	230	0	Flujo de Masas Intercepción
Mn	43	22	35	Flujo de Masas Difusión
Cu	6	219	0	Flujo de Masas
В	29	1000	29	Flujo de Masas

Cuadro 4.

Importancia relativa de los mecanismos de movilización y transporte de nutrientes en el suelo.

Elemento	% aproxim	Mecanismo		
Liemento	Flujo de masas			dominante
N	98,8	1,2	0	Flujo de Masas
Р	6,3	2,8	90,9	Difusión
K	20	2,3	77,7	Difusión
Ca	71,4	28,6	0	Flujo de Masas
				Intercepción
S	95	5	0	Flujo de Masas
Мо	95,2	4,8	0	Flujo de Masas

Fuente: Adaptado de Barber y Olson (1968); Bertsch (1998).
Flujo de masas = agua transpirada por concentración en solución
Intercepción radical = 1% del intercambiable
Difusión = Total absorbido - (Flujo + Intercepción)

# Cuadro 5.

Contribución de los mecanismos de movilización y transportede elementos en la producción de maíz.

	Cantidad necesaria	kg/ha	Mecanismo		
Elemento	para cosechar 9 t/ha de maíz	Intercepción	Flujo de masa	Difusión	dominante
N	170	2	168	0	Flujo de masa
Р	35	1	2	33	Difusión
K	175	4	35	136	Difusión
Ca	35	60	150	0	Flujo de masa
					Intercepción
Mg	40	15	100	0	Flujo de masa
					Intercepción
S	20	1	19	0	Flujo de masa
В	0,2	0,02	0,7	0	Flujo de masa
Cu	0,1	0,01	0,4	0	Flujo de masa
Fe	1,9	0,2	1	0,7	Flujo de masa
Mn	0,3	0,1	0,4	0	Flujo de masa
					Intercepción
Мо	0,01	0,001	0,02	0	Flujo de masa
Zn	0,3	0,1	0,1	0,1	Flujo de masa
					Intercepción
					Difusión

31

Fuente: Adaptado de Malavolta (1980).



Como se indicó y es entendible reconocer, la dinámica fisiológica vinculada con la transpiración de las plantas no es un proceso que opere necesariamente de manera estable y constante, pues varía significativamente dependiendo de la especie vegetal y la edad de la planta, las características y condiciones fisicoquímicas y biológicas del suelo y el estado en que se encuentren la temperatura ambiente y del suelo; inclusive la hora del día lo modifican de forma importante, como acontece con los ritmos de apertura estomática, respiración y fotosíntesis.

Por la noche cuando la transpiración es baja, mecanismos de transporte como el flujo de masas se torna lento, lo cual en momentos de alta luminosidad y calor ambiente por el contrario se acelera; la localidad de cultivo y sus condiciones ambientales respecto a luz, nubosidad, humedad y temperatura resultan por ello determinantes para dinamizar o retardar el proceso.

En el Cuadro 6 se exponen los resultados comparativos de absorción nutricional de dos especies vegetales muy diferentes, trigo (Triticum spp) y remolacha azucarera (Beta vulgaris subsp. vulgaris Altissima Group), demostrando que para los elementos K, Ca y Mg el mecanismo opera en grado variable pero consistente para el Ca, el cual llega a la raíz procedente de la solución del suelo por flujo de masas sin importar la especie. Interesante comprobar que en el trigo llegan a la raíz 272 kg/ha equivalentes al 777%, requiriendo sin embargo la planta apenas 35 kg; sucede algo similar con la remolacha.

Con el Mg es diferente pues el trigo llegó a satisfacer sus necesidades nutricionales al absorber 17 kg de los 13 kg/ha requeridos para una absorción del 131%; no así la remolacha, pues solo llegaron a la raíz 10 kg de los 44 kg/ha necesarios equivalente a un deficitario 23% (Strebel y Duynisveld 1989).

Cuadro 6.

Comparación del acceso de iones en cultivos de trigo y remolacha azucarera.

	Acumulación (kg ha <sup>-1</sup> )						
Variable	Trigo			Remolacha azucarera			
	K	Mg	Ca	K	Mg	Ca	
Total absorbido por planta	215	13	35	326	44	104	
Flujo de masas	5	17	272	3	10	236	
% absorbido	2	131	777	1	23	227	

Fuente: Strebel y Duynisveld (1989); Rodríguez et al (20213).

Como se infiere de los resultados de movilización y absorción nutricional expuestos anteriormente y anotados también en el Cuadro 2, los mecanismos preferenciales identificados por elemento pueden resumirse de la forma indicada en el Cuadro 7:

# Cuadro 7.

Mecanismo de transporte de nutrimentos en el suelo.

Mecanismo	Nutrimento
Intersección	Ca - Mg - Zn - Mn
Flujo de Masas	N - Ca - Mg - S - Fe - Zn - Mn - Cu - B - Mo
Difusión	P - K - Mn - Ni

Nota: algunos nutrimentos (Ca, Mg, Zn, Mn) reportan varios mecanismos.



De lo anterior podemos deducir que en condiciones atípicas de campo donde la transpiración se ve limitada o es de escasa actividad por causas como altas o bajas temperaturas y humedad ambiente, daño radicular, nubosidad, cierre estomático, daño foliar, baja o alta humedad en el suelo, es de esperar que los nutrimentos que son movilizados por flujo de masas tengan afectación en su absorción constituyéndose en deficientes para la planta.

Para que la difusión se vea favorecida es fundamental contar con humedad en el suelo; lo cual en el caso de la intersección depende mucho de masa y capacidad de exploración del sistema radical. Los factores generadores de estrés mineral, como apuntara Chaves (2021b), son causantes de que la llegada de nutrimentos a las raíces y luego absorbidos se vea reducida e impedida.

Una vez que los nutrimentos son absorbidos por las raíces son translocados a través del xilema hacia la sección superior de la planta, donde son procesados, metabolizados (anabolismo) y asimilados formando productos y/o redireccionados y redistribuídos a otras partes de la planta donde son requeridos (hojas maduras a jóvenes con aparición de síntomas de deficiencia), depositados y acumulados en la raíz o en células especializadas (vacuolas, etc.). La movilización de nutrimentos por el xilema es muy amplia y libre como reporta la literatura, no así en el floema donde es más limitada y restringida.

El ingreso de los nutrimentos esenciales en la planta se produce a través del estrecho contacto que se establece entre el sistema radical con la solución del suelo o con su fase coloidal (Chaves 1999, 2021k). En este proceso se distinguen dos tipos muy diferentes de absorción, las denominadas: Activa que emplea y consume energía metabólica y la Pasiva que no requiere energía.

- A. Absorción Pasiva: Opera en condiciones de alta intensidad transpiratoria que produce disminuciones del potencial hídrico a nivel foliar (tensión causada en la superficie evaporante), ocasionando el gradiente necesario desencadenante de la absorción de agua. En este caso los nutrimentos ingresan libremente desde la solución del suelo o los coloides en el denominado espacio externo o aparentemente libre, hasta llegar a la endodermis sin que se incurra en gasto de energía. Varios mecanismos específicos explican este tipo de absorción, como son:
  - i. Ósmosis, Flujo de Masa: ambos procesos son influídos por el nivel de transpiración del vegetal, pero a favor del gradiente de concentración.
  - ii. Intercambio lónico, Equilibrio de Donnan: opera mediante el intercambio de iones que se da entre la raíz y los coloides o la solución del suelo; se produce en contra del gradiente de concentración, pero sin gasto de energía metabólica.
- B. Absorción Activa: Este tipo de absorción promueve el incremento de la concentración de iones en el citoplasma celular hasta alcanzar niveles superiores que los del exterior, lo cual se debe al gasto energético que realiza la planta, pues los iones se absorben en contra del gradiente de concentración. En este mecanismo los nutrimentos pasan del espacio externo através de la endodermis hasta llegar al interior de los tubos del xilema, acumulándose allí en contra del gradiente de concentración, empleando para ello energía metabólica.

En este caso la clásica y conocida teoría del transportador explica el transporte activo, como sigue: la superficie existente entre el espacio externo y el interno es impermeable a la penetración de iones libres, por lo que se necesita la formación de un complejo ión-transportador intermedio, con capacidad de circular a través de la membrana celular impermeable. La dirección del movimiento ocurre sólo del espacio externo al interno, lugar en que el transportador libera el ión, quedando libre para proceder con el transporte de otro ión. Los iones vertidos en el espacio interno no pueden salir por lo que se acumulan.

# Función y funcionalidad ¿Es lo mismo? ¿De qué hablamos?

Discernir, resolver y responder satisfactoriamente esta inquietante pregunta forma parte y objetivo central del presente artículo, lo cual por su fondo y significado es de enorme trascendencia para la comprensión y entendimiento de los múltiples y complejos procesos involucrados en esta importante fase de la nutrición vegetal.

Lo señalado por Chaves (2022b) en torno al tema, permite dilucidar con mejor criterio las diferencias conceptuales de fondo que ambos términos de alcance técnico tienen, al manifestar, que "Las relaciones entre elementos nutricionales pueden ser de índole sinérgica y promotora o en su caso antagónica e incompatible, directa o asociada a otros efectos; es así como el K es sinérgico para el N, pero el Al es negativo para la planta. La función de un elemento se refiere por tanto al lugar donde actúa; la funcionalidad puede concebirse como la forma en que actúa y ejerce sus funciones en la fisiología y metabolismo de la planta.

Ambos términos es prudente y conveniente diferenciarlos y contextualizarlos en su verdadera dimensión para comprender mejor el papel que desempeñan los elementos en la nutrición de las plantas. Por

su función, el N y el P son determinantes en la producción de biomasa y el desarrollo radical, respectivamente, por lo que su adición es fácil valorarla, medirla y cuantificarla.

El K por su parte tiene funcionalidad sobre diversos procesos (por ej. enzimáticos y osmóticos) que no necesariamente son perceptibles y cuantificables, aunque su ausencia o deficiencia genera un grave estado de afectación general a la planta que puede ser asociado a otras causas (Chaves 1999, 2017; Kingston 2014)."

Para fines comprensivos y sobre todo de planificación y aplicación pragmática en la fertilización en el campo, es muy importante conocer y saber diferenciar ambos conceptos, pues muchas veces se pierde eficiencia o en su caso, la oportunidad de maximizar y optimizar beneficios por no tener claro el significado e implicación técnica de los mismos. Debe entenderse entonces que:





- A. La función de un nutrimento se refiere y responde básicamente a las preguntas ¿Dónde actúa e interviene? ¿Qué estimula, produce o afecta? ¿De cuáles estructuras o componentes forma parte? ¿Cuál es su función o funciones dentro de la planta?
- B. La funcionalidad nutricional puede concebirse como la forma en que un determinado nutrimento actúa y ejerce sus funciones en la fisiología y metabolismo general de la planta; por lo que responde a la pregunta ¿Cómo actúa y cómo opera?

Muchos ejemplos pueden mencionarse para explicar mejor el alcance y la aplicación de ambos conceptos, los cuales pueden ser por su función y funcionalidad de carácter estructural, como constituyente enzimático o participando en el transporte, movilización y regulación osmótica, como lo señalaran Alcántar y Trejo (2013) citados por Chaves (2022b) al ordenarlos y ubicarlos en tres grupos como sigue:

• "Estructural: El elemento forma parte de la molécula de uno o más compuestos orgánicos, por ejemplo: N en aminoácidos y proteínas; Ca: pectato (sal de ácido poligalacturónico) de la lámina media de la pared celular; Mg: ocupa el centro del núcleo

- tetrapirrólico de la clorofila; P: opera como parte integral de los nucleótidos y ácidos nucleícos.
- Constituyente de enzima: Esta función se trata de un caso particular del primer grupo, ya que se refiere a elementos, generalmente metales o elementos de transición (Mo), que forman parte del grupo prostético de enzimas y que son esenciales en su actividad. Este es el caso del Cu, Fe, Mn, Mo, Zn y Ni, quienes participan como cofactores (activadores) de numerosas reacciones enzimáticas.
- Transporte y regulación osmótica: El nutrimento forma enlaces de baja energía (generalmente iónicos) con moléculas orgánicas de bajo peso molecular, para favorecer su movilidad de un órgano a otro. Se almacena en las vacuolas para procesos de osmorregulación; tal es el caso del K que cumple ambas funciones como catión acompañante de los carboxilatos."

La trascendencia técnica de conocer estos conceptos es acompañar y complementar las acciones de campo con los elementos que adecuen, estimulen y potencien efectos positivos en la planta y/o el medio; y en contrario, eliminen, mitiguen o reduzcan los negativos, lo cual implica y obliga conocer tanto la función como la funcionalidad de cada elemento químico en la fisiología y el metabolismo de la planta.

En este caso, la **Fisiología Vegetal** puede concebirse como la disciplina dedicada al conocimiento de los procesos metabólicos de las plantas, para lo cual estudia cómo funcionan y explica los fundamentos físicos de dicho funcionamiento sobre bases estructurales a diferente nivel: molecular, celular, de tejidos, de órganos y de planta entera.

El **Metabolismo Vegetal** corresponde al conjunto de actividades de carácter fisicoquímico que se desarrollan en la planta, por medio de los cuales se llegan a sintetizar, en una serie de procesos anabólicos, los diversos elementos que forman el organismo, a la vez que, por otra parte, y de manera catabólica la materia es degradada o simplificada. La relación entre el anabolismo y el catabolismo mantiene el equilibrio vital.

El estado fenológico de la planta de acuerdo con su ciclo vegetativo, la necesidad nutricional concordante con la fase de desarrollo activa (germinación, retoñamiento, ahijamiento, desarrollo de cepa, crecimiento, maduración, floración), la disponibilidad de humedad en el suelo, las condiciones ambientales presentes (Iluvia, temperatura, luz, viento, nubosidad, evapotranspiración), las características fisicoquímicas y microbiológicas del suelo, el grado de vigor, sanidad y desarrollo del sistema radical en profundidad y extensión (vertical, horizontal), la dosis (kg/ha) incorporada y la composición de la fórmula fertilizante empleada, la forma de aplicación del abono (superficial, incorporado, fraccionado, mecánico), son variables que pueden ser en alguna medida intervenidas y manejadas por el agricultor para potenciar eficiencia en la función y funcionalidad de cada uno de los nutrimentos aplicados.

Como corolario es imperativo entender que cuando fertilizamos una plantación es exigido e inexcusable por razones de eficiencia, conocer la función y la funcionalidad con que opera cada uno de los nutrimentos esenciales incorporados en lo individual, como también en sus efectos interactivos, complementarios y suplementarios.

# Función nutricional de los elementos esenciales

Referirse en tan corto espacio al tema de la función que cumplen los elementos químicos disponibles y absorbidos del suelo sobre la nutrición de las plantas, particularmente en lo concerniente a los procesos que tienen vínculos de relación y acción sobre la fisiología y el metabolismo prouectados a la producción de los cultivos: es temerario y no resulta la verdad fácil de desarrollar virtud de la cantidad y complejidad de eventos involucrados. al operar mediante mecanismos de estimulación, reacción, equilibrios, sinergismos y antagonismos, entre otros, como lo apuntaran Chaves (1999, 2012).

Considerando y siendo consecuentes con esa complejidad y dificultad, se recaban y exponen de manera sucinta y ordenada en los Cuadros & y 9, las que se consideran las funciones más relevantes de los macro (6) y micronutrimentos (8) esenciales, respectivamente, aplicados hasta donde es posible de manera particular al cultivo de la caña de azúcar.

Como se infiere de dicha información, la participación de los 14 nutrimentos enunciados (quedan por fuera C, O e H) es amplia y opera en materia estructural, enzimática, hormonal y funcional, tanto en forma directa como indirecta, lo que permite concluir que las funciones de un elemento son muy múltiples y diversas, no pudiendo por ello ubicarlos apenas a una acción particular.

# Cuadro 8.

Función y requerimiento de los macronutrimentos esenciales en la caña de azúcar.

Nutrimento	Función y requerimiento
Nitrógeno (N)	Mayor constituyente de ácidos nucleícos, proteínas y enzimas; hay 4 átomos de N en cada molécula de clorofila. Importante en la actividad meristemática; adquirido como NO₃⁻ y NH₄+ es reducido a NH₄+ por la enzima reductasa del nitrato antes de que el N se incorpore a las estructuras de la planta. Favorece la absorción de Ca. Se almacena en las vacuolas de la célula. Promotor del macollamiento y la brotación de la planta de caña.
Nitrógeno (N)	Principal responsable del rendimiento agrícola al intervenir sobre el crecimiento de la planta, la población y elongación de tallos en el campo. Puede mal empleado (aplicación tardía o en exceso) reducir el % de fibra caña, la pol % caña y con ello afectar la concentración de sacarosa, la calidad de los jugos, el proceso fabril y favorecer el volcamiento de las plantas; además de prolongar el ciclo vegetativo del cultivo. Aporta exhuberancia en biomasa y suculencia a los tejidos lo que puede elevar la susceptibilidad al ataque de plagas y enfermedades. La pérdida de coloración verde (clorosis) se relaciona directamente con su deficiencia. Es el elemento fertilizante más usado en el mundo.
Fósforo (P)	Constituyente de ácidos nucleícos, fosfolípidos, coenzimas respiratorias y esencial en la división celular y la transferencia hereditaria. Importante en el crecimiento del sistema radical, el macollamiento, el ahijamiento, la brotación, también en la población y elongación de los tallos molibles. Requerido para enlaces ricos en energía (ATP y ADP). La asimilación de CO <sub>2</sub> depende de la asimilación de P. Captado como iones HPO <sub>2</sub> <sup>2-</sup> o H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , pero no se reduce en la planta. El P puede unirse con iones OH <sup>-</sup> para crear fostatos de azúcar. Constituyente de compuestos esenciales y participa de procesos vitales como fotosíntesis, respiración, intercambio de energía, división celular y fijación biológica de N.
	Ayuda en la maduración de las plantaciones. Necesario en la fotosíntesis para mantener el gradiente de pH necesario para la síntesis de ATP. Influye directamente en la velocidad de cierre de la plantación en el campo. Su disponibilidad evita el acame o volcamiento de las plantas en el campo. Contribuye con la tolerancia a plagas y patógenos y al soporte de bajas temperaturas y falta de humedad. Su presencia en el jugo de la caña tiene efecto positivo en el proceso de clarificación en el ingenio, facilitando la decantación de impurezas, favoreciendo la calidad del azúcar fabricado.
Potasio (K)	Es el macronutrimento más absorbido por la caña de azúcar. Presente en los tres grupos enzimáticos más importantes: sintetasas, oxireductasas y transferasas. Activador de 50 enzimas envueltas en la síntesis del almidón; necesario en la síntesis de proteínas en la unión del ARN de Transferencia a los ribosomas. Papel decisivo en la formación, transporte y acumulación de carbohidratos, activando las enzimas que catalizan el metabolismo de los carbohidratos y las que inhiben la respiración. Requerido en la fotosíntesis para mantener el gradiente de pH necesario para la síntesis de ATP.

Nutrimento	Función y requerimiento
Potasio (K)	Participa en la osmoregulación, especialmente en el movimiento estomático y desempeña un rol clave en la absorción y uso eficiente del agua en la planta, manteniendo su turgencia. Necesario para mantener el balance electrónico en las células. contribuye con la fijación simbiótica de N. Participa en la formación de auxinas de crecimiento y de la pared celular. Estimula el transporte de azúcares por el floema. Facilita el movimiento y desplazamiento de los azucares de las hojas hacia el tallo e interviene en el movimiento de otros compuestos orgánicos como aminoácidos. La maduración se retarda cuando el K es insuficiente. Incrementa la resistencia al ataque de plagas y patógenos, reduce el volcamiento de plantas en el campo y evita los daños y efectos severos provocados por la sequía y las heladas.
Cálcio (Ca)	Requerido en la división celular y en la actividad de algunas pocas enzimas. Contrarresta la acidez del suelo y los efectos tóxicos provocados por el Al y el Mn; como también la neutralización de ácidos orgánicos. Se encuentra principalmente en las paredes celulares como Pectatos de Ca en la lámina media y también se une a la membrana plasmática como Ca intercambiable. Interviene en la división celular. Necesario en pequeñas concentraciones para mitósis en zonas meristemáticas. Participa en la formación de la membrana celular y estructuras lipídicas. Indispensable para las bacterias simbióticas fijadoras de N. Esencial para el crecimiento y desarrollo de hojas y raíces. Incrementa la resistencia de la planta a la penetración de plagas y patógenos.
Magnesio (Mg)	Átomo central de la molécula de clorofila; requerido como enzima promotora (Mg-ATPasa), así como en la activación de numerosas enzimas como amilasa, nucleasa y otras vinculadas con los fosfolípidos y de fosforilación del ATP. Envuelto en la síntesis de proteínas mediante el puente de subunidades de ribosomas. Usado en plantas para el balance electrolítico de cargas, para lograr la electroneutralidad en el citoplasma. Algo de Mg también se une a las pectinas de la pared celular. Activador de enzimas implicadas en la respiración, la fotosíntesis, el metabolismo de los carbohidratos y los azucares, la síntess de ácidos nucleícos y de las proteínas. Participa en el proceso de respiración y el metabolismo y transporte del P en la planta. Absorbido como iones Mg² tiene una movilidad mucho mayor dentro de las plantas que el Ca. Aproximadamente 70% del Mg en plantas puede ser removido in extractos acuosos. Responsable del color verde de la planta.
Azufre (S)	Requerido como constituyente de aminoácidos formando parte de ellos, por lo tanto de proteínas, y para la producción de coenzimas. La producción de cistina, cisteína y metionina constituye una de las funciones más importantes del S. Constituyente de enzimas que participan en el metabolismo de azucares, grasas y proteínas, las vitaminas biotina, tiamina y la coenzima A. Es crítico para la función y actividad de la enzima nitrato reductasa en la conversión de nitrato en amonio, antes de la incorporación a aminoácidos. Necesario para la formación de clorofila. Interviene en la fijación no fotosíntetica de CO <sub>2</sub> . Estimula crecimiento de la raíz e incrementa crecimiento vegetativo de la planta.

Fuente: Kingston (2014); Pennatti (2013); Calcino et al (2000); Bertsch (1998); Chaves (1999).

# Cuadro 9.

Función y requerimiento de los macronutrimentos esenciales en la caña de azúcar.

Nutrimento	Función y requerimiento
Hierro (Fe)	Esencial para la síntesis de la clorofila; constituyente de las metaloproteínas. Forma parte de enzimas como la citocromo oxidasa requerida en la oxidación terminal en el Ciclo de Kreb's y , por lo tanto, el elemento es activo en las reacciones de oxidación/reducción en las plantas, por ejemplo, ferredoxina y transferencia electrones en cloroplastos, nitrogenasa en la fijación de N y reductasa del nitrato en la reducción del nitrato a amonio.
	Activador enzimático en la síntesis de proteínas, componente de algunas metaloflavoproteínas que operan en oxidaciones y reducciones biológicas y de algunas proteínas ferroporfirínicas importantes como los citocromos y la leghemoglobina. Componente de citocromos y de algunas flavoproteínas que intervienen en los procesos de oxidación y reducción biológica. Participa en la fijación de N y asimilación del S.
Boro (B)	Su rol no esta totalmente identificado pero participa indirectamente en muchos procesos. Relacionado con el crecimiento de nuevas células y, por lo tanto, es fundamental para el crecimiento de raíces, brotes y hojas. La asociación aparente entre el B y la tasa de translocación de carbohidratos es indirecta, ya que las nuevas células también son sumideros de carbohidratos. Vínculado con el mantenimiento de cloroplastos, los cuales degeneran cuando el B es deficiente. Interviene en el metabolismo del N, del P, los lípidos, las ligninas y en el control hormonal de la planta. Participa en la translocación de azucares al formar complejos con los atómos de oxígeno libres o con los grupos OH reduciendo su polaridad y facilitando el transporte a través de la membrana; también en la síntesis de proteínas y el crecimiento de células jóvenes. Participa en la absorción activa de N, K y Ca.
Cobre (Cu)	Requerido para la actividad de varios sistemas enzimáticos vinculados con la respiración y la fotosíntesis, por ejemplo, fenolasas, lactasas y enzimas involucradas en reacciones redox como ácido ascórbico oxidasa y citocromo oxidasa. Forma parte de proteínas presentes en el cloroplasto y participa en la formación de clorofila. Involucrado en la lignificación de la pared celular de las células. Promueve la formación de Vitamina A. Actua como conductor electrónico en la actividad respiratoria. Implicado en la biosíntesis de la lignina.
1anganeso (Mn)	Participa en la síntesis proteíca, la formación de ácido ascorbico, absorción iónica y la fijación de $CO_2$ . Necesario para la activación de enzimas vinculadas con la respiración y el metabolismo del N, como es el caso de la evolución del oxígeno a partir de la fotosíntesis en el Ciclo de Kreb's. El Mn es requerido junto con el Mo en la activación de la enzima nitrato reductasa, pudiendo ser sustituido por Mg, Zn, Co y Fe. Es un elemento estructural de las metaloenzimas. Tiene participación importante en la fase oscura de la fotosíntesis y en la formación de clorofila. Participa en la formación del ácido ascórbico (vitamina C). Puede oxidar y destruir el AIA.

Nutrimento	Función y requerimiento		
	Componente esencial de las metaloenzimas, por ejemplo, alcohol deshidrogenasa, Cu Zn dismutasa, carbono anidrasa (convierte ácido carbónico en CO <sub>2</sub> y agua) y ARN polimerasa. Activa enzimas transportadoras de fosfatos. La deficiencia de Zn por lo tanto, altera el metabolismo de los carbohidratos y la síntesis de proteínas.		
Zinc (Zn)	Relacionado con la producción de auxinas, por ejemplo, ácido indol-3-acético (AIA) a nivel de su precursos, el triftófano y por lo tanto es importante para la regulación del crecimiento en las plantas. Participa en la formación de clorofila, uso eficiente del agua, síntesis proteíca y equilibrio ácido-base.		
Cloro (Cl)	Actua como cofactor enzimático en la Reacción de Hill en la fase lumínica de la fotosíntesis. El Cl es un un compensador de carga y un osmorregulador junto con el K en el citoplasma vegetal. Junto al K mantiene la turgencia de las células lo que contribuye con la economía del agua. Posee una alta movilidad dentro de la planta.		
Molibdeno (Mo)	Opera como cofactor esencial en el sistema enzimático. Su principal función en plantas superiores es participar en el metabolismo del N por activación de la nitrato reductasa y enzima nitrogenasa que cataliza las reacciones de reducción de los nitratos en la formación de las proteínas. Interviene en la fijación de N atmosferico y en el metabolismo del P.		
Níquel (Ni)	Necesario en el metabolismo del N y la germinación de la planta. Su deficiencia inhibe la acción de la ureasa lo que conlleva a la acumulación de urea que provoca la presencia de manchas necróticas en las hojas; también afecta el metabolismo de los ureidos, aminoácidos, ácidos orgánicos y estimula la acumulación del ácido oxálico y láctico en las hojas		

Fuente: Kingston (2014); Pennatti (2013); Calcino et al (2000); Bertsch (1998); Chaves (1999).



 $\circ$ 

# ¿Qué requiere la caña de azúcar?

Como ha sido ya reiteradamente abordado, comentado y expuesto por Malavolta (1980), Malavolta et al (1974, 1989), Alfaro y Chaves (1999), Chaves (1986, 1999, 2017, 2020a, 2022bc), Bertsch (2003) y Calcino et al (2000), entre otros; la planta de caña de azúcar posee una reconocida y extraordinaria capacidad de extracción de nutrimentos del suelo, que va en relación directa con su elevada y significativa capacidad de producción de biomasa (raíces, tallos, hojas).

Un suelo con demostrada condición de fertilidad natural es capaz de proveer los elementos necesarios requeridos para generar y sostener por algún tiempo (ciclo comercial) un nivel productivo elevado; otro de condición infértil, obliga proveer los nutrientes vía fertilización con un costo posiblemente elevado. La diferencia que ejerce la condición de fertilidad del suelo como proveedor de nutrimentos esenciales y otros considerados útiles, es determinante en términos de rendimientos, producción y rentabilidad final.

Debe sin embargo tenerse presente que ante una planta de las características, atributos y rusticidad demostrada que posee la caña, aún un suelo de alta fertilidad no tiene asegurada la capacidad de poder asistir y mantener sostenibles niveles elevados y competitivos de productividad por mucho tiempo; lo que obliga diseñar e incorporar programas restitutivos y complementarios de fertilización integral que aseguren aportar y satisfacer las necesidades nutricionales básicas del cultivo.

Como se ha señalado cultivos como la caña de azúcar que no cuenten con un programa de manejo agronómico adecuado conducen en poco tiempo a crear condiciones degradantes que atentan contra la estabilidad

y el éxito productivo y empresarial (Chaves 2020bcd, 2021d).

Señala Chaves (1986) sobre este tema, que "La caña al igual que todos los organismos, elabora sus tejidos a partir de varios constituyentes: Carbohidratos, Grasas, Proteínas y Nucleoproteínas. De aqui que la planta requiere cantidades elevadas de nutrimentos, especialmente Carbonoso (C). Oxígeno (O), Hidrógeno (H), Fósforo (P), Potasio (K) y Azufre (S) para construir sus tejidos; además de pequeñas cantidades de hierro (Fe), Magnesio (Mg), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Boro (B), y frecuentemente Molibdeno (Mo), para la elaboración de sus enzimas; algunas veces Sodio (Na), Calcio (Ca) y a menudo otros nutrimentos para estos y otros fines; otros elementos, tales como el Sílice (Si), Aluminio (Al) y Cloro (Cl), pueden ser necesarios y están presentes en los tejidos de la planta, no obstante sus efectos específicos son aún poco claros.

La planta de caña de azúcar mantiene una elevada demanda de elementos nutritivos para satisfacer sus requerimientos de producción; esta demanda es mayor en aquellos casos donde el ciclo vegetativo es largo, debido a que los niveles de producción se incrementan significativamente. Esto deber ser satisfecho con una mayor extracción y asimilación."

Seguidamente se presenta un detalle con información relativa a la extracción de 15 nutrimentos esenciales y otros calificados como útiles y benéficos para la caña de azúcar, los cuales están expresados en el rango reportado por diversas fuentes mundiales de información, la amplitud de este y su valor promedio aritmético, los cuales proceden de una cantidad variable de reportes de muy diversa procedencia según nutrimento. En el caso de los macronutrientes, Cuadro 10 y Figura 3, el reporte de cada elemento se anota en su forma molecular y también absorbible por la planta.

# Cuadro 10.

Extracción y requerimientos de la caña por macronutrimentos.

N° Reportes	Rango	Amplitud	Promedio
54	0,44 - 2,24	1,8	0,93 -
53	0,06 - 0,70	0,64	0,27 (0,62)
54	0,27 - 4,10	3,83	1,65 (1,98)
26	0,12 - 1,10	0,98	0,34 (0,48)
28	0,10 - 0,50	0,4	0,25 (0,41)
19	0,12 - 0,58	0,46	0,29 (0,87)
	54 53 54 26 28	54 0,44 - 2,24 53 0,06 - 0,70 54 0,27 - 4,10 26 0,12 - 1,10 28 0,10 - 0,50	54     0,44 - 2,24     1,8       53     0,06 - 0,70     0,64       54     0,27 - 4,10     3,83       26     0,12 - 1,10     0,98       28     0,10 - 0,50     0,4

Fuente: Chaves (1986, 1999, 2017).

Dado en kg/tonelada de caña; sólo incluye tallos, no sección foliar ni raíces.

El valor entre parentesís se refiere a la forma química absorbible.

Nótese que en todos los casos el número de reportes citado es muy diferente para cada elemento químico, como también la amplitud encontrada entre los valores mínimo y máximo muy desigual, lo que introduce un margen o ámbito de variación potencial muy

elevado en algunos casos, como acontece particularmente con el K y el P. De acuerdo con el rango indicado el grado de variación individual de concentraciones promedio se ubica para los macronutrimentos como sigue: K > P > Ca > N > Mg > S.



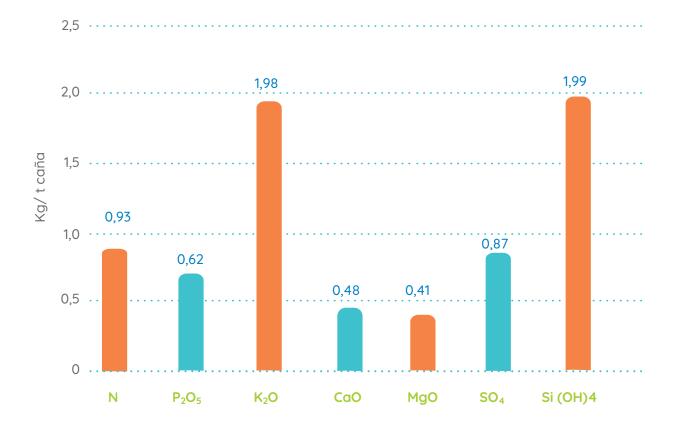


Figura 3.

Extracción promedio de macronutrimentos por la caña.

Las diferencias de extracción son por concentración y contenido en los tejidos de la planta aún más variables en el caso de los micronutrimentos, como se indica en el Cuadro 11 y la Figura 4; en cuyo caso el grado de variación individual se ubica y ordena de

la siguiente manera: Cu > Fe > B > Mn > Zn, respectivamente.

Esta información es importante para considerar y tener previsto cuales son las necesidades básicas del cultivo.



Extracción y requerimientos de la caña por macronutrimentos.

Nutrimento	N° Reportes	Rango	Amplitud	Promedio
Fe	13	2 - 155	153	42
Mn	19	1 - 37	36	11,6
Zn	19	2,3 - 9	6,7	4,4
Cu	22	0,05 - 27,1	27,1	6,5
В	19	0,04 - 2,5	2,5	1,7
Мо	2			0,02
Si	1	-	-	0,93 (1,99)
Al	1			0,3
Na	1			6

Fuente: Chaves (1986, 1999, 2017).

Dado en kg/tonelada de caña; sólo incluye tallos, no sección foliar ni raíces.

El valor entre parentesís se refiere a la forma química absorbible.



Figura 4.

Extracción promedio de micronutrimentos por la caña.



En su estudio Chaves (2017) externa en torno a este tema y basado en los resultados obtenidos de una amplia revisión literaria, que "Como se concluye de la información anterior generada a partir de una gran cantidad de información de origen mundial referida exclusivamente a los tallos y no a valores foliares ni de raíz, los modelos dominantes de respuesta a la extracción nutricional por parte de la caña de azúcar son los siguientes para el caso de los Macro y Micro nutrimentos:

Lo anterior demuestra la importancia inobjetable e intransferible que tienen los elementos químicos esenciales en la nutrición del cultivo de la caña de azúcar, los cuales ejercen influencia directa e indirecta sobre la manifestación y expresión de la capacidad productiva potencial en el ámbito agroindustrial que pueda intrínsecamente tener un determinado material genético.

#### Modelo de extracción nutricional de la caña de azúcar

Macronutrientes K > N = Si > Ca > S > P > Mg

Micronutrientes Fe > Mn > Cu > Na > Zn > B > Al > Mo



# Funcionalidad nutricional

El abordaje correcto de este tema resulta amplio, complejo y muy específico por su fondo de tratar con la calidad comprensiva necesaria pues involucra reacciones, mecanismos, anatomía, genética y procesos de carácter fisiológico, metabólico, hormonal y funcional en los cuales están vinculados elementos nutritivos esenciales y también los calificados como útiles y benéficos.

Una valoración profunda y detallada del tema nutricional deja ver, como muestra el Cuadro 12, que existe una buena cantidad (26) de tópicos, factores y elementos asociados y estrechamente vinculados de muy diversa naturaleza, que es necesario conocer para interpretar con el fundamento y la solidez necesarias la participación, función y funcionalidad de los elementos químicos en la fisiología y el metabolismo del desarrollo general e integral de la planta de caña de azúcar.

Portalrazón, el tema de la funcionalidad está contenido en otros documentos, como las publicaciones de Alexander (1973), Anderson y Bowen (1994), Castro (2016), Chaves (1986, 1988, 1999, 2012, 2017, 2019b, 2020aef, 2021abefghik, 2022b), Epstein y Bloom (2006), Ferreira et al (1991), Haag et al (1987), Kingston (2014), Malavolta et al (1974, 1989), Malavolta (1981, 1997), Marschner (1986), Mengel y Kirkby (2000), Mortvedt et al (1972), Penatti (2013), Salisbury y Ross (1994), entre otras.

A futuro se espera desarrollar con especificidad el tema de la funcionalidad.



# Cuadro 12.

Asuntos vinculados con la nutrición de la caña de azúcar.

#### Tópicos

La nutrición y la fertilización como factor fundamental de la producción y la competitividad

Suelos, minerales y nutrición

Elementos esenciales, útiles y benéficos

Implicaciones y efecto de los factores bióticos y abióticos

Solubilidad y disponibilidad en el suelo

Necesidades, requerimientos y exigencias nutricionales de la planta

Anatomía, morfología, estructuras vegetales y componentes celulares implicados

Genética, genómica y nutrición vegetal

Remoción y pérdida de nutrimentos en el suelo

Mecanismos de absorción, movilización y transporte (activo-pasivo)

Relaciones hídricas (transpiración, agua en suelo, planta, hojas, sistema vascular, raíces)

Movimiento del agua y nutrimentos (ascendente-descendente)

Transporte de proteínas

Nutrición y fenología de la planta

Fotosíntesis (fase fotoquímica, fijación de CO<sub>2</sub>, Ciclo de Calvin)

Respiración vegetal

Regulación del desarrollo (crecimiento-hormonas vegetales)

Floración

Síntesis, movilización y acúmulo de sacarosa en la planta

Estrés biótico y abiótico (mineral)

Diagnóstico nutricional

Deficiencias nutricionales, causas y corrección

Fertilización foliar, hidroponía y fertirriego

Fijación biológica

Factores de la fertilización (fórmulas, dosis, forma y momento, aplicación, interacciones,

sinergismos, antagonismos)

Asimilación, aprovechamiento y productividad agroindustrial

Fuente: elaborado por el autor.

# Deficiencias y síntomas

Como ha quedado suficientemente explicado y demostrado, todos los seres vivos, entre ellos las plantas, necesitan contar en el momento fenológico oportuno con los nutrimentos requeridos en cantidad y calidad para completar satisfactoriamente su ciclo vegetativo natural, y poder alcanzar un estado de salud vegetal óptimo que le permita al cultivo lograr niveles de productividad altos, competitivos y sostenibles.

Las fuentes proveedoras principales de nutrientes la constituyen el suelo y los fertilizantes minerales adicionados complementariamente, está directamente asociado con la composición natural del tipo de terreno en que se encuentra establecida la plantación y la calidad de los programas nutricionales implementados. Se obvia en este caso el empleo de aplicaciones las foliares como opción por la inconsistencia que han observado los resultados a su aplicación, como lo demuestra Chaves (2021k), lo que justifica más investigación y validación de campo.

Acontece sin embargo, que la disponibilidad conforme de nutrimentos para los cultivos, particularmente para los de alta exigencia comercial u empresarial, traducido en expectativas de alta productividad agroindustrial mantenidas en el tiempo en niveles competitivos y rentables, no resultan siempre fáciles de satisfacer en consideración de la presencia de limitantes, como son entre otras las siguientes: a) el suelo es naturalmente deficitario (infértil) para todos o algunos elementos químicos esenciales, b) la relación entre disponibilidad y extracción de nutrimentos es desequilibrada, c) el nivel de pérdidas existente en el

suelo es elevado, d) existen factores y elementos del entorno (edafoclimáticos, fitosanitarios) que dificultan la absorción pese a estar los nutrimentos disponibles en el medio, e) la planta (variedad) posee baja adaptación al medio lo que limita la expresión de su potencial genético intrínseco, aunque puede también no poseerlo, f) la expansión y el desarrollo radical (horizontal, vertical) es limitado, g) el factor hídrico es limitante, sea por déficit o exceso y h) el manejo agronómico en lo que compete a nutrición es deficiente, insuficiente, desequilibrado y deficitario.

Esas situaciones generan carestía nutricional variable para la planta, que puede ir de leve a severa con las consecuencias del caso en igual magnitud; las cuales, si no son tratadas como corresponde en tiempo, forma y calidad, pueden afectar la capacidad de la planta para completar su ciclo de vida natural.

La experiencia de campo ha confirmado que la mayoría de las deficiencias de nutrimentos mostradas por las plantas es debida por lo general a la carencia e insuficiencia de contenidos minerales en el suelo. En general los desórdenes nutricionales en el caso de la caña reducen de manera muy significativa el rendimiento del cultivo expresado en menos tonelaje de tallos industrializables (t/ha) y con ello en una menor cantidad (t/ha) de azúcar fabricada en el ingenio.

Las plantas evidencian y manifiestan el problema de la carestía o insuficiencia mineral por medio de "signos y síntomas visuales" muy notorios y evidentes en su fase aguda, aunque también tenue y perceptible en la fase inicial, los cuales son conocidos y nombrados como "deficiencias nutricionales". Algunos

 $^{18}$ 



de esos síntomas son típicos y muy característicos de cada nutrimento, lo cual surge a partir de la función y funcionalidad que el mismo cumple y desempeña en la fisiología y metabolismo de la planta (Anderson y Bowen 1994).

Asegura Malavolta (1980) al respecto, que "La falta o exceso de un determinado elemento provoca siempre la misma manifestación visible de anormalidad cualquiera que sea la especie considerada visto que las funciones ejercidas en la vida de la planta son siempre las mismas: es ese el principio en que se basa la diagnosis visual como un método de evaluación del estado nutricional."

Señala Castro (2016) en relación con este importante tópico, que "Cuando la caña es incapaz de absorber cantidades suficientes de un nutriente en particular para mantener su proceso de crecimiento normal, algunos síntomas visuales de deficiencia son evidentes. Antes del desarrollo de los síntomas, ya hay una restricción del crecimiento o un hambre oculta, y la producción de la caña puede ser comprometida."

Los síntomas de deficiencia se tornan bastante evidentes cuando la deficiencia

es muy grave, lo cual, sin duda, como se indicó, ocasiona una pérdida irreparable en la tasa de crecimiento y en el rendimiento agroindustrial del cultivo, el cual no se puede recuperar a pesar de suplir el o los nutrimentos que se encuentren en estado deficiente.

El diagnóstico de las deficiencias nutricionales basado en la capacidad de identificar los síntomas visuales requiere incorporar imperativamente un enfoque integral y sistemático de observación en el campo. Los síntomas pueden en lo específico aparecer tanto en las hojas más viejas y maduras como también en las más nuevas y jóvenes, dependiendo de la capacidad de movilización que tenga el nutriente involucrado dentro de la planta.

Para diferenciar los síntomas causados por deficiencias nutricionales de otros problemas afines, similares o aún disímiles, se debe considerar en primera instancia que las deficiencias ocasionados por nutrientes siempre presentan un típico patrón simétrico en la hoja, al igual que en la posición y edad de éstas; así como otras secciones tipificantes de la planta.

Entre los síntomas más comunes atribuibles a deficiencias de nutrientes en las plantas, pueden mencionarse entre otros los siguientes aplicables a la sección foliar y radical:

- Hojas con coloración amarillento, amarillo-verdoso o "clorótico" de tenue a severo
- Bordes de las hojas amarillos o de color marrón
- Pérdida, ruptura y/o necrosamiento del material foliar
- Presencia de manchas amarillas o marrón en la hoja
- Aparición de estrías y rayas cloróticas intervenales y a lo largo de los márgenes foliares
- Hojas prematuramente secas en sus puntas
- Tejido foliar con apariencia de "falta de turgencia"
- Las hojas adquieren aspecto de estar quemadas o chamuscadas
- Hojas estrechas de color verde oscuro a verde azul
- Las hojas presentan tonalidad morada o roja
- Coloración amarillenta entre las venas
- Las hojas se tornan pequeñas o atrofiadas en su formación
- Las hojas se tuercen o deforman en formas típicas
- Aparecen "pecas" en las hojas
- Hojas de consistencia dura y coriácea
- Hojas viejas y jóvenes crecen y desarrollan desde un punto común en forma de "racimo"
- Lámina de la hoja puede separarse de la nervadura central
- Muerte del meristemo apical
- El sistema radical se atrofia
- Coloración rojiza en la vaina vascular
- Tallos finos de entrenudos cortos y elásticos
- Pobre ahijamiento

Como se infiere de lo anterior, poder

reconocer, caracterizar y tipificar una deficiencia nutricional a través de síntomas visuales requiere de una gran sensibilidad y capacidad de observación. adiestramiento y experiencia de campo. pues los efectos pueden fácilmente confundirse con otras causas que eventualmente podrían oriainar afecciones similares, como pueden ser las ocasionadas por bajas o altas temperaturas, viento fuerte, luminosidad, estados de humedad variable en el suelo por seguía o encharcamiento, causas fitosanitarias provocadas por plagas y patógenos (foliares y raíz), intoxicación o quema por agroquímicos, daños mecánicos y hasta afectación por animales.

Como apuntara Castro (2016) al respecto "Es de bastante utilidad estar familiarizado con los síntomas de deficiencia, particularmente para elementos que normalmente no son aplicados en programas de fertilización, para que entonces acciones correctivas sean tomadas.

Al interpretar los síntomas, la movilidad de los diferentes nutrientes en la caña de azúcar y en otras plantas, debe ser considerada...".

En esta materia deben eximirse y separarse los síntomas provocados por toxicidad y sobre dosis nutricional de los de deficiencia por insuficiencia, lo que hace aún más complejo el asunto. El tema aludido virtud de su amplitud y grado de complejidad será desarrollado como se merece con mayor especificidad y profundidad en otra oportunidad.





# Conclusión

De los diversos factores externos que participan e influyen de manera determinante sobre el crecimiento, el desarrollo de las plantas y con ello sobre los indicadores de productividad agrícola e industrial de la caña de azúcar, no hay duda que el suministro de nutrimentos mediante la fertilización constituye uno de los más accesibles, controlables y que con mayor facilidad puede ser intervenido, regulado y en alto grado manipulado en la forma que se estime válida y pertinente de acuerdo con las condiciones del entorno productivo y expectativas empresariales fijadas como meta por alcanzar.

Esta posibilidad habilita intervenir, conducir y adecuar los programas de fertilización comercial en el campo, de acuerdo con los requerimientos y necesidades nutricionales afines a las exigencias naturales y expectativas comerciales que se tengan del cultivo. La amplia extensión de terreno y confirmada heterogeneidad biótica y abiótica implicadas en un cultivo de características semiperenne como la caña de azúcar, obliga necesariamente generar programas de fertilización acordes con las condiciones edafoclimáticas de cada localidad y condición agroproductiva particular.

A lo anterior se suma la demostrada

capacidad extractora que posee la planta de caña, lo que conduce con el tiempo al agotamiento e indisponibilidad de nutrientes esenciales del suelo y la necesidad de incorporarlos vía fertilización con materiales químicos minerales u orgánicos, si se desea operar en condiciones técnicas y empresariales competitivas.

El uso y beneficio de los fertilizantes como insumo agrícola no está en absoluto en duda ni tampoco en cuestionamiento como se podría pensar; pese a lo cual su imperiosa necesidad ha conducido sin embargo lamentablemente a crear una enorme dependencia de los mismos como factores de la producción y la productividad, lo cual obliga sin justificación ni atenuante alguno a regular y optimizar su empleo, con el objeto de evitar la adición de altas dosis, mitigar pérdidas, lograr balances, eliminar contaminaciones y afectaciones ambientales potenciales, reducir costos innecesarios y maximizar efectos benéficos.

Caso se superen los efectos negativos y potencien los positivos, los fertilizantes cumplirán a cabalidad su papel como factor determinante y concluyente del éxito técnico productivo en la agricultura.

No puede dejar de mencionarse y valorarse en este contexto y realidad el enunciado casi profético expresado por Justus Von Liebig en el siglo XIX y mantenido vigente desde entonces, al manifestar, que "Los rendimientos de las cosechas son proporcionales a la cantidad del elemento fertilizante que se encuentra al mínimo en el suelo en relación con las necesidades de las plantas."

incuestionable importancia. trascendencia y aplicabilidad que tiene el tema de la nutrición del cultivo y los fertilizantes como vía para su adición y satisfacción, obligan atender con la prioridad necesaria los principios básicos y estratégicos que intervienen y regulan los mecanismos y procesos fisicoquímicos, fisiológicos y metabólicos involucrados, entre los cuales la esencialidad y disponibilidad de los nutrimentos en el suelo ocupa un rol especial y determinante, como también los mecanismos de transporte y absorción por la planta, complementados con los de movilización, translocación, asimilación y uso interno.

Conocer sobre la función y la funcionalidad de cada nutrimento en la planta resulta estratégico al momento de diseñar y formular un programa de fertilización serio y objetivo, orientado a satisfacer las necesidades nutricionales básicas del cultivo y no apenas a regar fertilizante en el campo; pues como es bien sabido, fertilizar y nutrir son conceptos afines cuando son bien conducidos, pero no necesariamente integrados y complementados y menos aún satisfechos en la labor habitual de campo.

Ala fecha se reconocen en la caña de azúcar un total de 17 nutrimentos declarados por su función como esenciales, como acontece con C, H, O, N, P, K, Ca, Mg y S reconocidos como macronutrimentos; complementados con otros 8 micronutrimentos por la menor concentración en que son requeridos y absorbidos: Fe, Zn, B, Mn, Cu, Mo, Cl y Ni. El níquel (Ni) representa el de más reciente incorporación en ese grupo selecto.

De acuerdo con la información disponible basada en estudios de campo, la extracción ejercida por la planta de caña de azúcar se da preferencialmente siguiendo el modelo: K > N = Si > Ca > S > P > Mg para los macro y Fe > Mn > Cu > Na > Zn > B > Al > Mo con los micro y otros elementos interesantes (útiles y tóxicos).

Como se indicó la mayoría (58,8%) de los 17 nutrimentos identificados y reconocidos como esenciales ingresa a la planta de caña por el mecanismo de **Flujo de Masas** como acontece con N, Ca, Mg, S, Zn, B, Cu, Fe, Mn y Mo; otros 4 (23,5%) nutrientes son movilizados hacia la raíz por Difusión: P, K, Zn y Ni. La absorción vía Intercepción radicular opera por ese mecanismo en el caso de 4 (23,5%) nutrimentos: Ca, Mg, Zn y Mn. Nótese que elementos como Ca, Ma y Mn comparten al menos dos mecanismos (Flujo de Masas e Intercepción) como principales y en el Zn su actividad se da en los tres, lo que favorece su absorción. Este conocimiento debe concebirse y aplicarse en el campo al momento de colocar el fertilizante buscando favorecer su rápida y efectiva movilización y absorción.

La función de los elementos químicos contenidos en concentración variable en los tejidos y organelas de la planta de caña



es muy diversa y compleja, pues interviene sobre reacciones y mecanismos fisiológicos, metabólicos, hormonales, enzimáticos, energéticos, estructurales, anatómicos y funcionales, cuya actividad estimula, regula y modera todas las etapas fenológicas de desarrollo del ciclo vegetativo del cultivo, como son germinación, brotación, retoñamiento, ahijamiento, crecimiento, floración y maduración, entre otras.

Como corolario de todo lo anterior es importante reseñar para fines prácticos en materia técnica y comercial, que se debe buscar siempre procurar satisfacer integralmente las necesidades nutricionales naturales y fundamentales de la planta de caña, y no apenas adicionar algunos pocos nutrimentos al suelo, pues los principios de equilibrio y balance se violentan generando por el contrario serias deficiencias que atentan sobre la posibilidad de alcanzar altas productividades de caña y azúcar sostenidas en el tiempo.

La práctica de la fertilización debe ser siempre integral, suficiente, equilibrada y oportuna considerando todos los nutrimentos y no apenas unos pocos, como lamentablemente ocurre en alta proporción con el cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica, donde la adición al suelo se restringe y limita a la incorporación de N, P, K y en algunos casos Ca y S, con marcados desequilibrios para los otros elementos minerales, especialmente los micro.

Tampoco se debe caer en el craso error de incorporar fórmulas cuya composición es comercialmente amplia en nutrimentos, pero muy limitada en contenidos, lo que poco beneficio aporta para el objetivo pretendido. Se debe evitar involucrarse en campañas y adquisición de productos comerciales engañosos y de composición técnica cuestionable, lo que obliga a la organización a desplegar una orientación profesional, objetiva y responsable en esta materia.



# Literatura citada

- Alcántar González, G.; Trejo Téllez, L.I. 2013. Capítulo 2. *Elementos esenciales*. En: Nutrición de Cultivos. 1ª edición. Coordinadores Gabriel Alcántar González y Libia I. Trejo-Téllez. México. Universidad Autónoma de Chapingo. Editorial Colegio de Postgraduados. p: 8-47.
- Alexander, AG. 1973. Sugarcane Physiology. Amsterdam: Elsevier. Scientific Publishing Company 752 p.
- Alfaro, R.; Chaves, M. 1999. Observaciones sobre la capacidad de extracción y agotamiento nutricional de un Ultisol cultivado con caña de azúcar. En: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, Congreso Nacional de Entomología, 5, Congreso Nacional de Fitopatología, 4, Congreso Nacional de Suelos, 3, Congreso Nacional de Extensión Agrícola y Forestal, 1, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED, julio. Volumen III. p: 36. También en: Participación de DIECA en el XI Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, julio 1999. p: 153. También en: Congreso de ATACORI "Randall E. Mora A.", 13, Guanacaste, Costa Rica, 1999. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica, setiembre. p: 84.
- Anderson, D.L.; Bowen, J.E. 1994. *Nutrición de la caña de Azúcar*. Quito, Ecuador. Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS). 40 p.
- Barber, S.A.; Olson, R.A. 1968. Fertilizer use on corn. In: Changing patterns in fertilizer use. Madison, Wis., Soil Science Society of América.
- Barber, D.A.; Gunn, K.B. 1974. The effect of mechanical forces on the exudation of organic substances by the roots of cereal plants grown under sterile conditions. New Phytol. 73: 30-45.
- Bertsch, F. 1998. *La Fertilidad de los Suelos y su Manejo*. 1ª ed. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). 157 p.
- Bertsch Hernández, F. 2003. Absorción de nutrimentos por los cultivos. 1º ed. San José, C.R.: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). 307 p.
- Calcino, D.; Kingston, G.; Haysom, M. 2000. *Nutrition of the Plant*. Chapter 9. In: Manual of Canegrowing. Edited by Hogarth and Peter Allsopp. Brisbane, Australia. Bureau of Sugar Experiment Stations. p: 153-193.
- Castro, RCP. 2016. STAB Fisiologia Aplicada a Cana-de-Açúcar. Piracicaba, São Paulo. STAB Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil. Regional Sul. 208 p.
- Chaves Solera, M.A. 1986. Requerimientos, extracción y remoción de nutrimentos por la caña de azúcar. Boletín Informativo DIECA (Costa Rica) Año 4, Nº 29, San José. p: 1-2.
- Chaves Solera, M.A. 1988. Efeito de Relãções Ca:Mg, utilizando Carbonatos e Sulfatos, sobre o crescimento e a nutrição mineral da cana-de-açúcar. Tesis Magister Scientiae. Viçosa,

- Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 186 p. Chaves Solera, M.A. 1990. Características de calidad de los correctivos de acidez del suelo. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, octubre. 12 p.
- Chaves, M. 1999. Nutrición y fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica. En: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED, julio. Volumen III. p: 193-214. También en: Participación de DIECA en el XI Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, julio 1999. p: 46-67.
- Chaves Solera, M. 2012. *Relaciones catiónicas y su importancia para la agricultura*. Revista Especializada Ventana Lechera, Dos Pinos. Fertilización: Práctica para mejorar la calidad y producción de forraje. San José, Costa Rica. Edición N° 18, Año 6, febrero 2012. p: 10-20.
- Chaves Solera, M.A. 2017. Suelos, nutrición y fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica. En: Seminario Internacional Producción y Optimización de la Sacarosa en el Proceso Agroindustrial, 1, Puntarenas, Costa Rica, 2017. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), octubre 10 al 12, Hotel Double Tree Resort by Hilton. 38 p.
- Chaves Solera, M.A. 2019a. *Clima y ciclo vegetativo de la caña de azúcar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(7): 5-6, julio.
- Chaves Solera, MA. 2019b. Entornos y condiciones edafoclimáticas potenciales para la producción de caña de azúcar orgánica en Costa Rica. En: Seminario Internacional: Técnicas y normativas para producción, elaboración, certificación y comercialización de azúcar orgánica. Hotel Condovac La Costa, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 2019. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 15, 16 y 17 de octubre, 2019. 114 p.
- Chaves Solera, M.A. 2020a. Atributos anatómicos, genético y eco fisiológicos favorables de la caña de azúcar para enfrentar el cambio climático. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(11): 5-14, mayo.
- Chaves Solera, M.A. 2020b. Participación del clima en la degradación y mineralización de la materia orgánica: aplicación a la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(12): 6-17, junio.
- Chaves Solera, M.A. 2020c. Clima, degradación del suelo y productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(15): 5-13, julio.
- Chaves Solera, M.A. 2020d. Clima, acidez del suelo y productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(18): 8-17, agosto.
- Chaves Solera, M.A. 2020e. Sistema radicular de la caña de azúcar y ambiente propicio para su desarrollo en el suelo. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(13): 6-18, junio. También en: Revista Entre Cañeros N° 17. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, setiembre. p: 51-71.

- Chaves Solera, M.A. 2020 f. *Materia orgánica y disponibilidad de nitrógeno para la caña de azúcar.* Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(21): 6-16, octubre.
- Chaves Solera, M.A. 2021a. *Principios generales de la nutrición y fertilización de cultivos.* San José, Costa Rica. Presentada en evento organizado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de la Región de Desarrollo Brunca, San Isidro de El General, con motivo de celebrar la "Jornada Agropecuaria Virtual", mayo. Presentación Electrónica en Power Point. 80 láminas.
- Chaves Solera, M.A. 2021b Estrés mineral y caña de azúcar en Costa Rica. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(11): 5-21, mayo.
- Chaves Solera, M.A. 2021c. Factores que intervienen y modifican la eficiencia y efectividad de la fertilización y los fertilizantes nitrogenados en la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(13): 5-20, junio.
- Chaves Solera, M.A. 2021d. *Caña de azúcar: una planta rústica pero sensible al ambiente*. San José, Costa Rica. Exposición realizada con motivo de celebrar la "Semana Ambiental", organizada por la Federación de Estudiantes de la Universidad de Costa Rica (FEUCR), junio. Presentación Electrónica en Power Point. 101 láminas.
- Chaves Solera, M.A. 2021e. Fijación biológica de nitrógeno atmosférico (N<sub>2</sub>) por la caña de azúcar: un importante potencial por aprovechar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(15): 7-24, julio.
- Chaves Solera, M.A. 2021f. Óxido nitroso (N2O) y uso del nitrógeno en la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(19): 5-29, setiembre.
- Chaves Solera, M.A. 2021g. *Nitrificación y pérdidas potenciales de nitrógeno en suelos cañeros.*Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(20): 6-24, setiembre.



57

- Chaves Solera, M.A. 2021h. Aluminio: un elemento contraproducente para la productividad y rentabilidad de la caña de azúcar. Revista Entre Cañeros N° 21. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, septiembre. p: 5-45.
- Chaves Solera, M.A. 2021i. Amonificación y volatilización de nitrógeno en suelos cañeros. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(21): 6-22, octubre.
- Chaves Solera, M.A. 2021. Sugerencias y recomendaciones para el uso óptimo de fertilizantes en la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(26): 8-23, diciembre.
- Chaves Solera, M.A. 2021k. Fertilización foliar en caña de azúcar: concepto, principios y práctica. Revista Entre Cañeros N° 22. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, diciembre. p: 65-125.
- Chaves Solera, M.A. 2022a. *Productividad agrícola de la caña de azúcar en Costa Rica según región productora*. Periodo 2012 2020 (9 zafras). Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(4): 5-31, febrero-marzo.
- Chaves Solera, M.A. 2022b. Esencialidad nutricional y fertilización de los cultivos agrícolas. Revista Entre Cañeros N° 23. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, marzo. p: .
- Chaves Solera, M.A. 2022c. Muestreo de suelos agrícolas: aplicación a la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(14): 5-22, julio.
- Epstein, E.; Bloom, A. 2006. *Nutrição Mineral de Plantas: Principios e Perspectivas.* 2 edic. Trad. María Edna Tenório Nunes. Londrina, Brasil. Editora Planta. 403 p.
- Ferreira, M.E.; Pessôa Da Cruz, M.C. 1991. *Micronutrientes Na Agricultura. Piracicaba, São Paulo.* Simpósio sobre Micronutrientes Na Agricultura. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato (POTAFOS). 734 p.
- Haag, H.P.; Dechen, A.R.; De Quirino, A.; Camargo, C. 1987. *Nutrição Mineral da Cana-de-Açúcar.* Em: 1° Volume. Cana-de-Açúcar. Cultivo e Utilização. Coordenado por Sérgio Bicudo Paranhos. Campinas, São Paulo. Fundação Cargill. p: 88-162.
- Jungk, A.O. 1991. Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface. In: Y Waisel, A. Eshel and U. Kafhafi (eds.). Plants roots: the hidden half. Marcel Dekker, New York. p: 455-481.
- Kingston, G. 2014. Mineral Nutrition of Sugarcane. In: Chapter 5. SUGARCANE: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology. Edited by Paul H. Moore, Frederick C. Botha. New York: Ed John Wiley & Sons, Inc. Iowa USA. p: 85-120.
- Malavolta, E.; Haag, H.P.; Mello, F.A.F.; Brasil Sobrinho., M.O.C. 1974. *Nutrição Mineral e Adubação de Plantas Cultivadas*. São Paulo, Brasil: Livraria Pionera Editora. 727 p.

- Malavolta, E.; Vitti, G.C.; De Oliveira, S.A. 1989. *Avaliação do Estado Nutricional*. Em: Avaliação do Estado Nutricional das Plantas. Principios e Aplicações. Piracicaba, São Paulo. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato (POTAFOS). p: 1-129.
- Malavolta, E. 1980. Os Elementos Minerais. Em: Elementos de Nutrição Mineral de Plantas. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda. p:
- Malavolta, E. 1981. Manual de Química Agrícola: Adubos e Adubação. 3era edic. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda. p:205-265.
- Malavolta, E. 1997. Sacarinas-Cana-de-açúcar. En: Manual de Calagem e Adubação das Principais Culturas. São Paulo, Brasil: Ed. Agronômica Ceres. p: 179-223.
- Marschner, H. 1986. *Mineral nutrition of higher plants*. London, Academic Press, Inc. 674 p.
- Mengel, K.; Kirkby, E. A. 2000. Los Nutrientes de las Plantas. En: Principios de Nutrición Vegetal. Traducción de 4a edición (1987). Basel, Switzerland, International Potash Institute. p: 11-24.
- Mortvedt, J.J.; Giordano, P.M.; Lindsay, W.L. 1972. *Micronutrients in Agriculture*. Madison, Wisconsin, USA. Soil Society of America, Inc. 666 p.
- Penatti, C.P. 2013. Adubação da Cana de Açúcar. 30 anos de experiência. 1º edição. São Paulo, Brasil. Ottoni Editora. 347 p.
- Rodríguez Mendoza, M de las N.; Trejo-Téllez, L.I.; Alcántar González, G. 2013. Capítulo 5. Acceso, absorción y transporte nutrimental. En: Nutrición de Cultivos. 1º edición. Coordinadores Gabriel Alcantar González y Libia I. Trejo-Téllez. México. Universidad Autónoma de Chapingo. Editorial Colegio de Postgraduados. p: 8-47.
- Salisbury, F.B.; Ross, C.W. 1994. *Fisiología Vegetal*. México. Grupo Editorial Iberoamericano S.A. 759 p.
- Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS). 1993. *Vocabulário de Ciência do Solo*. Coordenado por Nilton Curi, Jorge Olmos Iturri Larach, Nestor Kampf, Antonio Carlos Moniz, Luiz Eduardo Ferreira Fontes. Campinas, São Paulo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS). 90 p.
- Strebel, O.; Duynisveld, W.H.M. 1989. Nitrogen supply to cereal and sugar beet by mass flowand diffusion on silty loam soil. Z. Planzenernahr. Bodenk 152: 135-141.
- Villalobos Rodríguez, E.; Killorn, R. 2001. Capitulo V. *Nutrición Mineral*. En: Fisiología de la producción de los cultivos tropicales. Procesos fisiológicos básicos. 1ed. San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica. p: 159-197.

59

