

Periodo 14 de junio al 27 de junio 2021

El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) con el apoyo del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar de LAICA (DIECA-LAICA), presenta el boletín agroclimático para caña de azúcar.

En este se incorpora el análisis del tiempo, pronósticos, notas técnicas y recomendaciones con el objetivo de guiar al productor cañero hacia una agricultura climáticamente inteligente.

IMN

www.imn.ac.cr
2222-5616

Avenida 9 y Calle 17
Barrio Aranjuez,
Frente al costado Noroeste del
Hospital Calderón Guardia.
San José, Costa Rica

LAICA

www.laica.co.cr
2284-6000

Avenida 15 y calle 3
Barrio Tournón
San Francisco, Goicoechea
San José, Costa Rica

RESUMEN DE LAS CONDICIONES DE LA QUINCENA DEL 31 DE MAYO AL 13 DE JUNIO

En la figura 1 se puede observar, a partir de datos preliminares, el acumulado quincenal de lluvias sobre el territorio nacional.

Los distritos que sobrepasaron los 350 mm de lluvia acumulada en la quincena fueron Guápiles de Pococí, Corredores, Horquetas de Sarapiquí y La Ceiba de Orotina.

Los registros de lluvia de 126 estaciones meteorológicas consultadas muestran al viernes 11 de junio como el de mayor registro de lluvia acumulada. Por otra parte, el lunes 31 de mayo presentó los menores acumulados a nivel nacional.

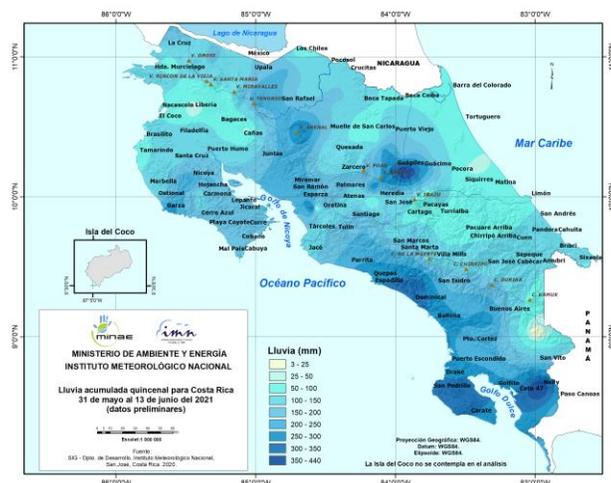


Figura 1. Valores acumulados de la precipitación (mm) durante la quincena del 31 de mayo al 13 de junio del 2021.

PRONÓSTICO PARA LAS REGIONES CAÑERAS PERIODO DEL 14 DE JUNIO AL 20 DE JUNIO

De la figura 2 a la figura 9, se muestran los valores diarios pronosticados de las variables lluvia (mm), velocidad del viento (km/h) y temperaturas extremas (°C) para las regiones cañeras. Se prevé una semana con condiciones levemente menos lluviosas de lo normal en todas las regiones cañeras, principalmente en Turrialba Alta y Turrialba Baja. Con alto aporte de humedad durante la primera mitad de la semana, que para el caso de la región Sur se mantiene hacia el fin de semana.

Las condiciones ventosas se mantendrán sutilmente por arriba de lo normal, especialmente en las regiones cañeras Sur y Puntarenas. Durante la primera mitad de semana predominará el viento del Oeste, en tanto que la segunda mitad de semana mantendrá vientos principalmente del Este. Mientras la temperatura media se mostrará ligeramente arriba de lo normal, particularmente en Guanacaste Oeste, exceptuando las regiones Turrialba Alta y Turrialba Baja donde se mantendrá levemente bajo lo normal para la época.

“Se espera la influencia de la onda tropical #5 a mediados de semana y de la onda #6 hacia el fin de semana.”

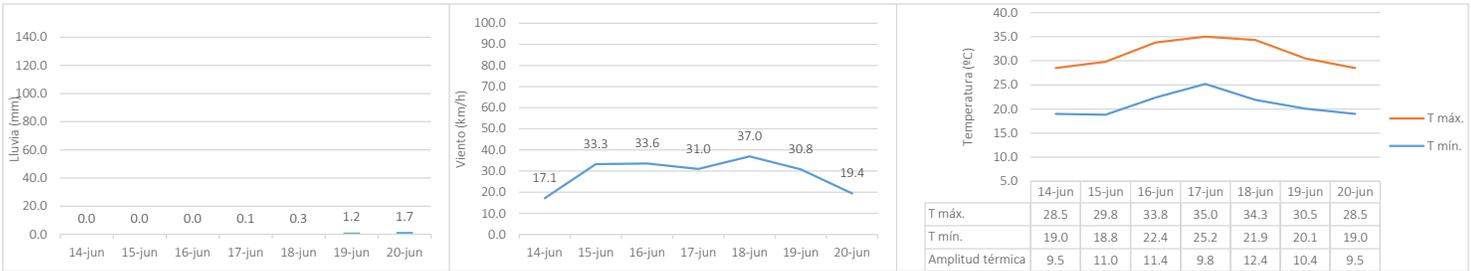


Figura 2. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 14 de junio al 20 de junio en la región cañera Guanacaste Este.

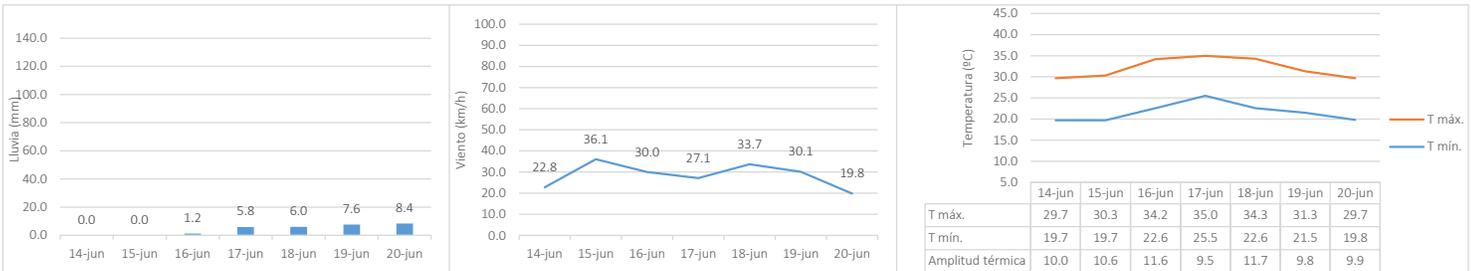


Figura 3. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 14 de junio al 20 de junio en la región cañera Guanacaste Oeste.

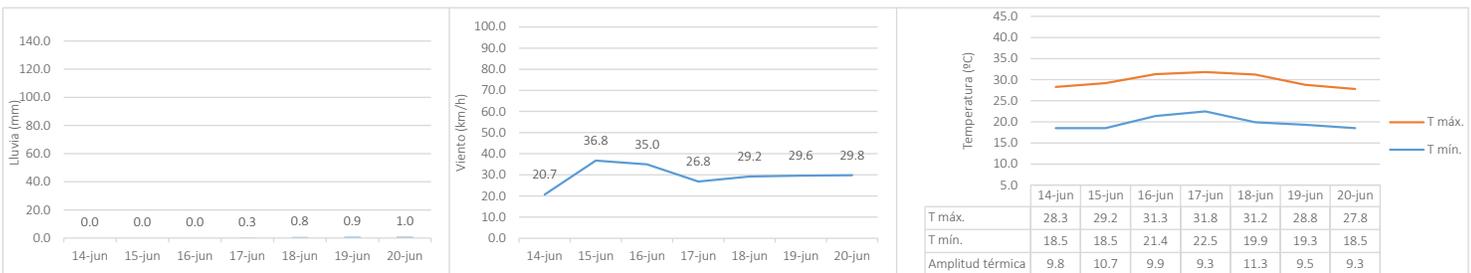


Figura 4. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 14 de junio al 20 de junio en la región cañera Puntarenas.

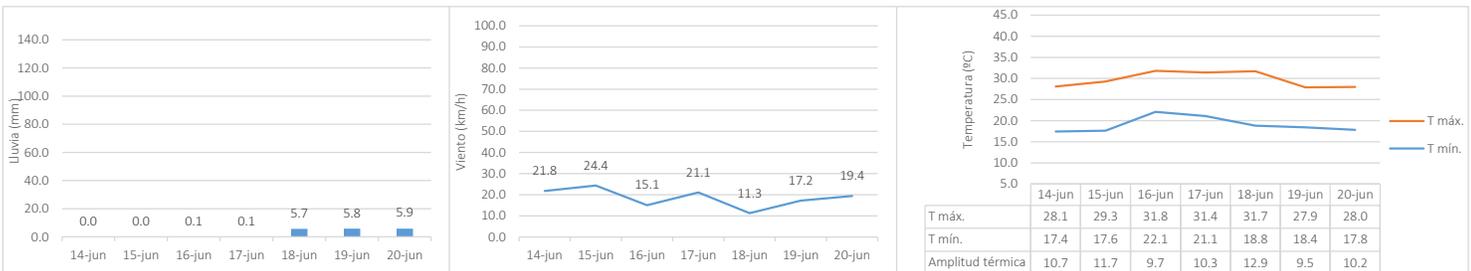


Figura 5. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 14 de junio al 20 de junio en la región cañera Zona Norte.

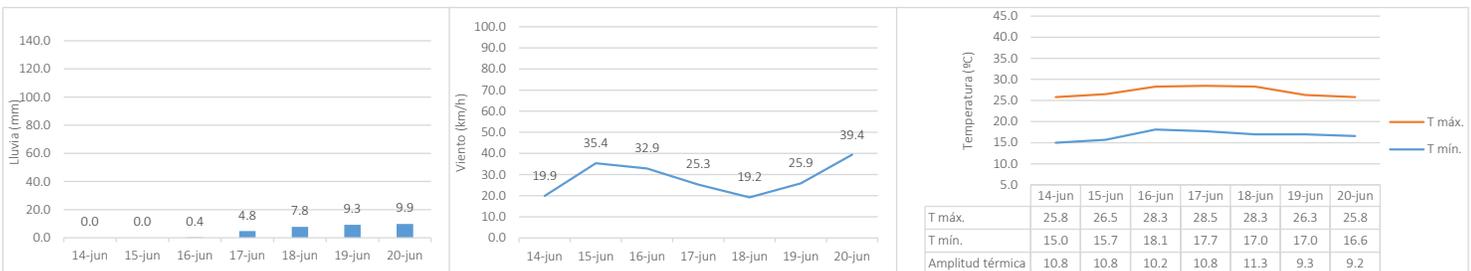


Figura 6. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 14 de junio al 20 de junio en la región cañera Valle Central Este.

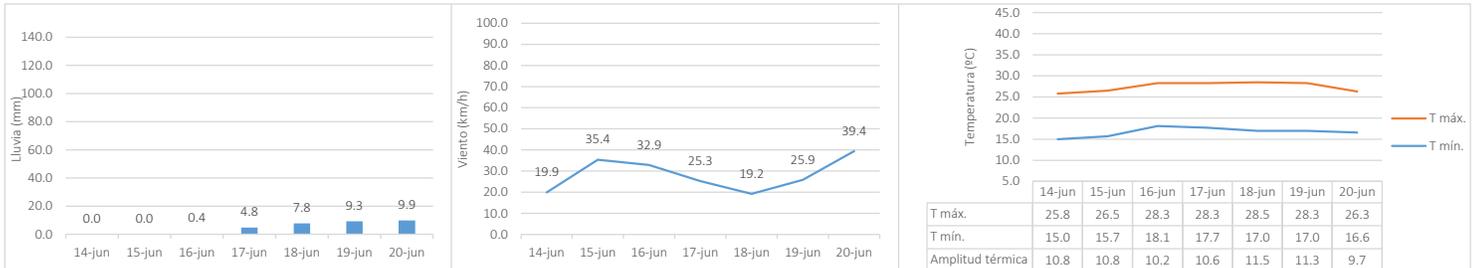


Figura 7. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 14 de junio al 20 de junio en la región cañera Valle Central Oeste.

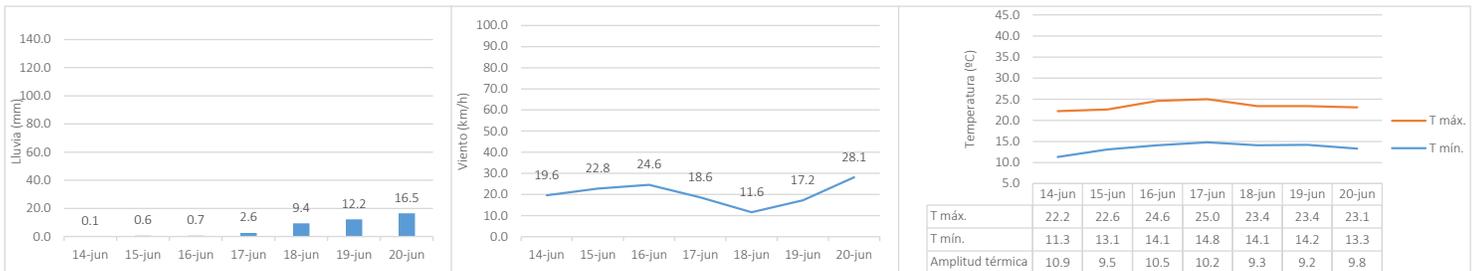


Figura 8. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 14 de junio al 20 de junio en la región cañera Turrialba.

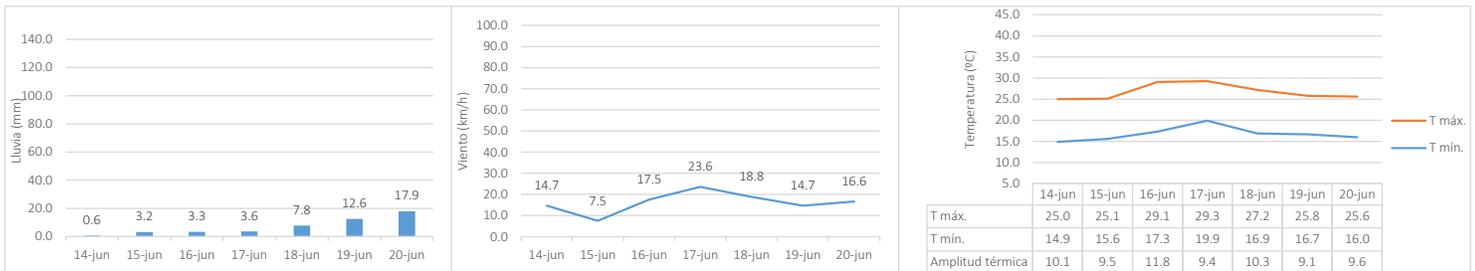


Figura 9. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 14 de junio al 20 de junio en la región cañera Zona Sur.

TENDENCIA PARA EL PERIODO DEL 21 DE JUNIO AL 27 DE JUNIO

Se prevé una semana levemente más lluviosa de lo normal y particularmente en la región Sur. Las condiciones ventosas se mantendrán normales en las diferentes regiones cañeras. La temperatura promedio se mantendrá normal a lo largo de la semana.

HUMEDAD DEL SUELO ACTUAL PARA REGIONES CAÑERAS

De acuerdo con Central America Flash Flood Guidance System (CAFFG), el cual estima la humedad en los primeros 30 cm de suelo, el lunes de la semana del 07 al 13 de junio de 2021 los suelos de las regiones Norte y Sur fueron los que presentaron porcentajes de humedad relativamente altos, el resto de las regiones tuvieron de intermedios a bajos porcentajes de saturación. A partir del martes las condiciones lluviosas que se presentaron en el país hicieron que la humedad de los suelos aumentara en todas las regiones cañeras, los mayores porcentajes se registraron en Guanacaste Oeste, Puntarenas, Región Norte y Región Sur.

Como se observa en la figura 11, el día de hoy la Región de Guanacaste Oeste presenta entre 15% y 90% de saturación, mientras que la Región de Guanacaste Este tiene entre 45% y 75%. Las regiones Puntarenas y Valle Central Oeste están entre 45% y 75%; la Región Valle Central Este presenta entre 45% y 60%.

El porcentaje de humedad de la Región Norte está entre 30% y 90%; la Región Turrialba Alta (> 1000 m.s.n.m.) tiene entre 45% y 100% y la Región Turrialba Baja (600-900 m.s.n.m.) presenta entre 45% y 75%. La Región Sur varía entre 15% y 100% de humedad.

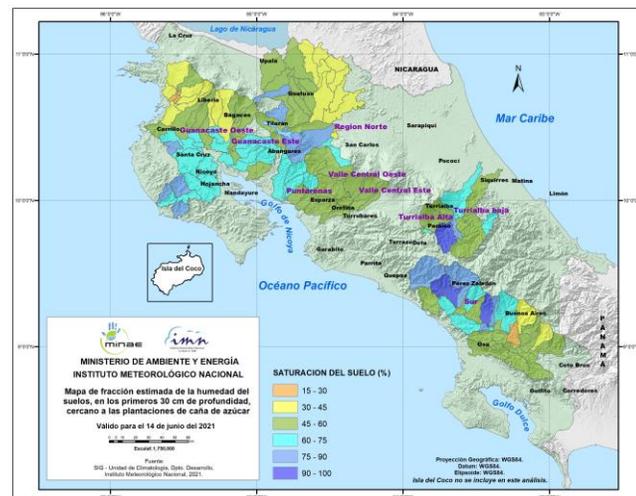


Figura 11. Mapa de fracción estimada de la humedad en porcentaje (%), en los primeros 30 cm de profundidad, cercano a las plantaciones de caña de azúcar, válido para el 14 de junio del 2021.

DIECA Y EL IMN LE RECOMIENDAN

Mantenerse informado con los avisos emitidos por el IMN en:

- @IMNCR
- Instituto Meteorológico Nacional CR
- www.imn.ac.cr

CRÉDITOS BOLETÍN AGROCLIMÁTICO

Producción y edición del Departamento de Desarrollo

Meteoróloga Karina Hernández Espinoza

Ingeniera Agrónoma Katia Carvajal Tobar

Geógrafa Nury Sanabria Valverde

Geógrafa Marilyn Calvo Méndez

Modelos de tendencia del Departamento de
Meteorología Sinóptica y Aeronáutica

INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL

NOTA TÉCNICA

**Factores que intervienen y modifican la eficiencia y efectividad de la fertilización
y los fertilizantes nitrogenados en la caña de azúcar**

Ing. Agr. Marco A. Chaves Solera, M.Sc.
chavessolera@gmail.com

Especialista en el cultivo de la Caña de Azúcar

No cabe la menor duda en reconocer que la fertilización de las plantaciones comerciales de caña de azúcar constituye una práctica agronómica habitual muy necesaria y de enorme relevancia y significancia, en el correcto y apropiado manejo del cultivo en un entorno muy variable y heterogéneo, visualizada y operada bajo la expectativa de procurar optimizar la productividad agroindustrial, la rentabilidad y con ello la competitividad y el deseado y necesario éxito empresarial.

Es reconocido por todos que el uso de fertilizantes orgánicos e inorgánicos han sido un componente muy crítico y hasta cuestionado en el mejoramiento de la productividad agroindustrial de la caña de azúcar, cuando aplicados en suelos agrícolas en los que la fertilización química ha contribuido de manera muy significativa y determinante al incremento de la productividad. En el país el empleo de fertilizantes químicos por unidad de superficie cultivable muestra sin embargo una tendencia reduccionista en el tiempo, pasando históricamente de 600 kg a 300 kg y hasta menos de producto comercial incorporado por hectárea, como puede ser verificado en los aportes de Chaves (1983, 2001, 2016bc), Barrantes y Chaves (2020); Calderón y Chaves (2020), Chaves y Barquero (2020), Angulo, Rodríguez y Chaves (2020); lo cual se ha debido fundamentalmente a razones de índole técnico y también económicas asociadas con la rentabilidad propia de la actividad agroindustrial.

No puede omitirse ni desconocerse, sin embargo, que los incuestionables beneficios inicialmente observados por el empleo de los fertilizantes químicos en general, aplicados e interpretados sobre la productividad agroindustrial del cultivo, se han visto opacados por estudios posteriores que demostraron los efectos negativos de la utilización excesiva de

estos productos químicos, tanto en los suelos como sobre el ecosistema. A esta contraproducente circunstancia, se le adiciona la cuestionada eficiencia lograda en el aprovechamiento de los fertilizantes químicos por parte de la planta de caña. Como se ha comprobado, los sistemas agrícolas basados en producción de biomasa, como es el caso de la caña, aprovechan cantidades muy bajas, muchas veces de tan sólo el 50% o hasta menos de las dosis aplicadas, independientemente de la fuente de nitrógeno incorporada. Estas ineficiencias son atribuidas a la susceptibilidad de algunos componentes propios de las formulaciones propensos a perderse, o también, al uso incorrecto de la práctica al incorporarse en los diferentes ambientes productivos (Chaves 2015), como será comentado más adelante.

La pretensión y aspiración de mejora integral requiere, sin embargo, incrementar insoslayablemente el uso apropiado y eficiencia de los fertilizantes en todos los ámbitos, virtud de su incuestionable impacto productivo, alto costo vinculado, la variabilidad de las fuentes y dosis comercialmente utilizadas, sumadas a las condiciones físicas, químicas y microbiológicas diferenciales que presentan los suelos sembrados con caña en el país. Lo anterior requiere adicionalmente, complementación y articulación con prácticas de manejo apropiadas de cultivo que la potencialicen, la hagan más eficiente y la optimicen. Por esas razones y circunstancias, **el reto que actualmente presenta la agricultura sostenible y sustentable en Costa Rica, entre ellas la caña de azúcar, es mejorar todos los factores y elementos que participan en la adición de fertilizantes minerales en las plantaciones, bajo principios de razonabilidad económica, productiva, ambiental y de ecoeficiencia.**

Consecuentes con ese objetivo, pretende el presente artículo abordar el tema de la fertilización nitrogenada y su eficiencia desde una perspectiva sencilla y muy pragmática respecto de los factores involucrados; todo visualizado y aplicado al cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica considerando las diferencias regionales, sectoriales (productores e ingenios), particularidades climáticas y variaciones agronómicas prevalecientes.

Ciclo del Nitrógeno

Se ha constatado a través de la investigación y también de manera experimental con la práctica agrícola, que las diferentes formas y la cantidad de nitrógeno contenido en el suelo cambian y se modifican de manera permanente y muy dinámica, debido a los procesos edáficos que en los ámbitos físico-químicos y biológicos acontecen. Como anotan y comentan Chaves (1999bc, 2010, 2017a), Fassbender y Bornemisza (1994), Bertsch (1998), Epstein y Bloom (2006), las formas orgánicas de nitrógeno presentes y disponibles en el sustrato involucran aminoácidos, proteínas y amino azúcares; en tanto que las formas inorgánicas que son por actividad las más absorbibles por las plantas, consideran amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-), como también las consideradas tóxicas para los vegetales, como es el caso del amoníaco (NH_3^+) y el nitrito (NO_2^-). El N en la solución del suelo está presente de manera predominante como NO_3^- -N, el cual es relativamente poco adsorbido y, por lo tanto, más propenso a sufrir pérdidas por lixiviación; así como el NH_4^+ -N, el cual, está unido en gran proporción a las partículas del suelo de carga negativa. El N puede ingresar al sistema suelo vía atmosférica mediante la deposición seca y húmeda del elemento, por los fertilizantes orgánicos y sintéticos, y también mediante la fijación simbiótica. Importante anotar que la caña de azúcar ha mostrado una importante y nada despreciable capacidad de fijación de N por esta vía (Chaves 1999c). Cabe señalar adicionalmente, que por medio de la descomposición y mineralización de los residuos biomásicos del cultivo que son depositados durante todo el ciclo vegetativo, se agrega nitrógeno a la reserva de nitrógeno orgánico del suelo.

La dinámica del N operando en los sistemas de producción agrícola se ve muy afectada por las grandes cantidades del elemento que se agregan comercialmente como fertilizantes nitrogenados. El suministro de N a los suelos está demostrado que incrementa la productividad y la cantidad de biomasa en el

corto plazo; sin embargo, los incrementos observados en el Carbono Orgánico del Suelo (COS), pueden acelerar la dinámica del nitrógeno y, por lo tanto, la emisión de N_2O a la atmósfera, un gas cuestionado por su efecto invernadero (GEI).

La nitrificación constituye un importante proceso biológico natural que acontece en el suelo y corresponde a la etapa de formación de nitratos a partir de sustancias que contienen N reducido. En el mismo el NH_4^+ -N es convertido en NO_3^- -N por parte de las bacterias *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*. Es el proceso biológico opuesto a la fijación biológica, en la cual los óxidos de nitrógeno (NO_3^- y NO_2^-) son reducidos sistemáticamente por la enzima reductasa del nitrato a óxidos gaseosos (óxido nítrico, NO; óxido nitroso, N_2O y nitrógeno molecular N_2).

Se ha constatado también, como señala Chaves (1999c), que algunos procesos promueven y facilitan en grado variable la pérdida de N en el sistema, como acontece en los siguientes procesos:

- ❖ Lixiviación
- ❖ Fijación
- ❖ Denitrificación
- ❖ Inmovilización
- ❖ Volatilización
- ❖ Erosión
- ❖ Remoción y absorción por cosechas
- ❖ Quema de plantaciones y residuos vegetales

La volatilización del amoníaco (NH_3^+), es un proceso en el cual el NH_3^+ -N se pierde a través de emisiones gaseosas hacia la atmósfera en la forma de amoníaco, óxido nítrico, así como nitrógeno molecular (N_2), todas las cuales, a excepción de la última, son consideradas como fuentes potenciales de contaminación y deterioro ambiental; el proceso es favorecido por condiciones secas, pH elevados ($\text{pH}>7$) y altas temperaturas. Las pérdidas se dan también por la emisión de productos de la denitrificación (N_2 , N_2O , NO) bajo condiciones anaeróbicas, las cuales pueden reducir significativamente el N contenido en el suelo. En caso de tener un exceso de humedad, el nitrógeno mineral (particularmente el NO_3^-) puede lixiviarse (lixiviación, movimiento descendente del NO_3^- a través del suelo por infiltración y flujo del agua) y perderse hacia zonas distantes del alcance del sistema radical del cultivo. El N mineral contenido en el suelo puede asimismo agotarse por causa de la extracción y absorción por el cultivo, tornando el suelo infértil. En la inmovilización los residuos del cultivo con bajas

concentraciones de N (Relaciones C/N>30) causan la sujeción temporal neta del N a partir de la cual el crecimiento microbiano es limitado. La **quema** de plantaciones para su cosecha o de residuos vegetales, constituye también una pérdida neta de N del sistema, que de manera contraproducente alimenta adicionalmente los GEI mediante la emisión de CO₂. El ciclo del nitrógeno en el suelo es intervenido por la **mineralización** de la materia orgánica, donde ocurre la transformación del N orgánico en Carbono Orgánico del Suelo (COS) y abono en N inorgánico, lo que finalmente da lugar al amonio, por medio de la actividad

Se considera que los sistemas de agricultura conservacionista presentan mayores pérdidas de nitrógeno debido a un incremento en la volatilización del NH₃-N y una insuficiente incorporación del fertilizante.

¿Qué es eficiencia y que efectividad en la fertilización de cultivos?

El tema del uso eficiente de los nutrimentos, en particular el nitrógeno por su dinámica, propensión y facilidad a perderse luego de aplicado por los mecanismos ya señalados, ha ganado en los últimos tiempos mucho interés y atención, virtud del costo implicado e invertido por los fertilizantes, y la permanente preocupación por el impacto ambiental generado, asociado a otros efectos detrimentales producidos sobre el ecosistema (Chaves y Bermúdez 1999a).

Se considera que los criterios e indicadores empleados para determinar y estimar la eficiencia en el uso de cualquier nutrimento esencial que se incorpore en un cultivo, debe responder de manera satisfactoria a cuatro interrogantes básicas, que son:

- 1) ¿Cuánto de los nutrimentos aplicados es realmente absorbido y asimilado por el cultivo?
- 2) ¿Cuánto rendimiento adicional se obtiene por cada unidad de nutrimento incorporado?
- 3) ¿Cuánto puede el cultivo actual beneficiarse de los nutrimentos nativos y residuales procedentes de cultivos o plantaciones anteriores?
- 4) ¿Cuál es la tasa de retorno monetario recuperada a partir de los nutrimentos aplicados?

En primera instancia se debe tener claro que el mejoramiento de la eficiencia en el uso de los nutrimentos es un factor de significativa importancia en el campo productivo, económico y ambiental. Debe considerarse que lograr un incremento y mejora sustantiva en la eficiencia de la fertilización favorece la rentabilidad y la sostenibilidad del sistema de producción, pues reduce el efecto e impacto de los fertilizantes sobre el ecosistema y demás áreas del entorno, donde los mismos no son deseados ni requeridos.

Existen diferentes razonamientos, formas y mecanismos para determinar y estimar la denominada **Eficiencia en el Uso del Nitrógeno (EUN)** y los componentes que la integran. Una de las definiciones establece que la EUN *“es la proporción de rendimiento del cultivo, toneladas de caña, por ejemplo, por unidad de nitrógeno disponible, incluido el nitrógeno residual presente en el suelo y el fertilizante nitrogenado”*. Sin embargo, es entendible, que no todo el N absorbido por la planta proviene necesariamente del fertilizante nitrogenado aplicado. La EUN es una función compleja y multivariada donde intervienen e interactúan elementos de la estructura y composición del suelo, las condiciones climáticas presentes en el lugar, las interacciones surgidas entre el suelo, los procesos bacterianos y la naturaleza de las fuentes de N orgánicas e inorgánicas presentes, lo cual no está incluido y contemplado en la fórmula siguiente mediante un balance parcial de nitrógeno, donde:

EUN = nitrógeno exportado del campo a los cultivos / nitrógeno aplicado.

Entre los métodos válidos y viables para determinar la EUN se pueden emplear estudios de carácter fisiológico combinados con experimentos (campo, invernadero) utilizando fertilizante marcado con 15N, de preferencia en campo, para identificar los componentes importantes de la EUN y la variabilidad genética de la dinámica de distribución del N dentro de la planta. Al respecto, Dobermann (2007) sugiere y establece varios índices agronómicos que pueden ser usados para evaluar la eficiencia del uso de nutrimentos, como que se anota en el Cuadro 1:

Cuadro 1.	
Índices agronómicos de eficiencia en el uso de Nitrógeno.	
Índices	Cálculos
Eficiencia Aparente de Recuperación	ER = Kg de incremento en absorción entre kg de nutriente aplicado $= (U - U_0)/F$
Eficiencia Fisiológica	EF = Kg de incremento en rendimiento por kg de nutriente absorbido $= (R - R_0)/(U - U_0)$
Eficiencia Interna de Utilización	EI = Kg de rendimiento entre kg nutriente absorbido $= R/U$
Eficiencia Agronómica	EA = Kg de incremento en rendimiento entre kg de nutriente absorbido $= (R - R_0)/F = ER \times EF$
Factor Parcial de Productividad	FPP = Kg de rendimiento entre kg de nutriente aplicado $= R/F = (R_0/F) + EA$
Dónde:	R = Rendimiento del cultivo con aplicación de nutrientes R ₀ = Rendimiento del cultivo sin aplicación de nutrientes F = Dosis del nutriente U = Absorción del nutriente de la biomasa sobre el suelo a madurez fisiológica U ₀ = Absorción de la planta sin aplicación de fertilizantes
Fuente: Dobermann (2007).	

Por su parte, Stewart (2007) plantea y ejecuta un amplio desarrollo en relación con el tema de la eficiencia del nitrógeno, como se expone a continuación:

- La **Eficiencia Aparente de Recuperación (EAR) del Nitrógeno**. Se define como el porcentaje del nutrimento recuperado en la biomasa de la planta, que se encuentra sobre el suelo durante el ciclo vegetativo. Este índice responde la inquietud ¿cuánto del fertilizante aplicado es absorbido por el cultivo? Se ha estimado que la Tasa de Utilización para N proveniente de fertilizantes (eficiencia de recuperación del cultivo) es bajo condiciones favorables de 50 a 70%. La eficiencia puede ser valorada en el corto o el largo plazo y puede basarse en el rendimiento, recuperación o remoción.
- **Eficiencia Fisiológica (EF)**. Esta eficiencia responde a la interrogante ¿cuánto rendimiento adicional se produce por cada unidad adicional de nutrimento absorbido?
- La **Eficiencia Agronómica (EA)** responde por su parte a ¿cuánto rendimiento adicional se obtiene por cada kilogramo de fertilizante aplicado? La eficiencia

desarrollada en el uso de nutrimentos es un concepto dinámico y muy complejo que incluye una gran diversidad de componentes, que reflejan la recuperación de nutrientes y el balance o rendimiento producido por unidad de nutriente incorporado. Este es el índice más utilizado por investigadores para evaluar el uso eficiente de nutrientes, ya que indica las unidades de incremento obtenidas en rendimiento (toneladas de caña o azúcar/hectárea) por unidad de nutriente aplicado, en el presente caso nitrógeno.

- El **Factor Parcial de Productividad (FPP)** se refiere a ¿cuánto rendimiento se obtiene por cada kilogramo de fertilizante aplicado? Lo cual incluye y considera el aporte nativo de nutrimentos del suelo.
- La **Eficiencia Económica (EE)** da respuesta a la inquietud ¿cuánto ingreso adicional se produce por la inversión realizada con la aplicación del fertilizante? La eficiencia de la fertilización y la viabilidad económica forman parte del sistema total de producción, donde cada uno de ellos contiene a su vez factores que necesitan ser optimizados para lograr alcanzar la meta de producción pretendida.

¿Qué factores participan e intervienen?

Los fertilizantes nitrogenados varían en su formulación química, su concentración de nitrógeno y en la forma en la que se agregan al suelo y los cultivos. La elección del mejor fertilizante depende de varios factores como son las condiciones del clima, el índice de pH, la humedad presente en el suelo, el contenido de nitrógeno disponible y accesible en el suelo, el acceso y adquisición del fertilizante, el equipo de aplicación del producto y los costos relacionados por unidad de N por hectárea (eficiencia), las particularidades de la variedad sembrada y el cultivo involucrado, entre otros. No hay una receta ni recomendación universal que tipifique y defina el mejor tipo y cantidad de fertilizante necesario aplicar en la caña de azúcar, por cuanto en esa decisión participan otros factores ajenos al producto que determinan la misma. Los agricultores necesitan evaluar y decidir cuál fuente de nitrógeno es la más adecuada para sus condiciones específicas de cultivo, con el objeto de minimizar las pérdidas por lixiviación, volatilización, denitrificación y otras, con el fin de superar los efectos de la insuficiencia de N.

Como toda práctica de índole y naturaleza agrícola, la fertilización de las plantaciones comerciales mantiene activos una serie de factores y elementos de índole biótico y abiótico que determinan, maximizan y optimizan su eficiencia, su rentabilidad y su aprovechamiento productivo agroindustrial; motivo por el cual se debe siempre buscar su mejoramiento continuo y adecuación. Dichos factores operan en sentido positivo mediante efectos sinérgicos, aunque también en sentido contrario bajo principios antagónicos. Es por esta razón que se debe realizar un sano, prudente y necesario inventario de actividades y labores y ubicar aquellas acciones que resulten necesario potenciar, estimular y promocionar; o en su caso, por el contrario, evitar, mitigar y contrarrestar para hacer un aprovechamiento pleno de las ventajas que incuestionablemente aporta la fertilización. El tema adquiere mucha relevancia y actualidad si consideramos dos elementos muy particulares que tipifican la agroindustria azucarera costarricense: a) la gran heterogeneidad y disparidad que existe entre regiones productoras de caña que limitan poder generalizar el manejo de las plantaciones y, b) la alta sensibilidad del elemento nitrógeno a perderse ante esas condiciones tan disímiles, particularmente las vinculadas con el clima.

Considerando esta realidad, actualmente se vienen desarrollando estrategias para procurar reducir y optimizar el uso, disminuir las pérdidas e incrementar el empleo eficiente del N en los cultivos, entre ellos la caña de azúcar, la cual por sus características biomásicas tiene grandes demandas por el nutrimento. Entre las principales estrategias destaca indudablemente el desarrollo de genotipos dotados de una mayor rusticidad y eficiencia en el aprovechamiento del N proveniente de la fertilización, conocedores que los complejos procesos bioquímicos, fisiológicos y moleculares implicados en la absorción y metabolismo del N están muy influenciados y determinados por la genética de la planta. Otra de las estrategias comerciales operada por el sector es el uso de fuentes nitrogenadas modernas de eficiencia mejorada, que son fertilizantes que reducen las pérdidas asociadas con el sistema de producción. Estos fertilizantes se basan en dos principios básicos: 1) pueden disminuir y dosificar la velocidad de liberación del N al medio, o 2) pueden interferir con los procesos de transformación de las fuentes y reducir sus pérdidas. Los fertilizantes nitrogenados de liberación lenta y/o controlada y los inhibidores de nitrógeno son dos clases importantes de estas fuentes. Por lo tanto, la respuesta de los cultivos al nitrógeno aplicado y su eficiencia de uso deben monitorearse continuamente como estrategia técnica para maximizar el potencial de rendimiento por cada unidad de N utilizado en el sistema de producción.

Optimizar la eficiencia de uso de los nutrimentos incorporados mediante la fertilización conlleva imperativamente la aplicación correcta de productos comerciales, considerando: **fuerza apropiada, dosis justa, en el momento oportuno y en la forma de colocación (ubicación) correcta**. Esos cuatro factores inevitablemente interactúan entre sí, como también con las condiciones edafoclimáticas y las prácticas de manejo del cultivo en el lugar. Seguidamente se hace un sucinto comentario en torno a esos indicadores:

1) Fuente Fertilizante:

Existen en el mercado diversas fuentes dispuestas para uso del productor de caña, donde la selección y el empleo correcto de las distintas opciones comerciales implica necesaria e imperativamente:

- a) Diferenciar y seleccionar la fuente requerida y que mejor se ajusta con las necesidades específicas concordantes con el ciclo vegetativo del cultivo, sea

caña planta o retoño (soca); así como también con el momento fenológico que atraviese la planta en su fase natural de crecimiento y desarrollo (germinación, retoñamiento, ahijamiento, encepamiento, crecimiento). La cantidad de cosechas (cortes) también cuenta.

- b) Conocer la composición y disponibilidad de los nutrimentos de las fuentes fertilizantes utilizadas y conocer la sensibilidad de los cultivos a determinados elementos químicos (Cl, S, Na) adicionales, lo cual en el caso de la caña no es tan preocupante, aunque sí en otras plantas.
- c) Conocer la condición físico-química y microbiológica del suelo donde será aplicada, para lo cual es obligado contar con un muestreo amplio y representativo acorde con la anatomía del cultivo.
- d) Considerar en la selección de la fuente por utilizar las propiedades químicas y físicas de los suelos, por ejemplo, el grado de acidez (pH), fertilidad natural actual y potencial.
- e) Conocer la compatibilidad entre las fuentes de fertilizantes que serán utilizadas.
- f) Considerar el o los nutrimentos(s) complementario(s) o acompañante(s) que componen la fuente, como son SO_4^- , Ca, Mg, Zn, B. Este factor es muy relevante pues contribuye con la nutrición integral.
- g) En el caso particular del N, es muy importante conocer la proporción relativa de la fuente nitrogenada presente en la formulación, sea nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_3^+).
- h) Tener control de elementos contaminantes, no nutritivos, que pudiesen estar contenidos en las fuentes.
- i) Considerar y tener muy presente las interacciones entre fuentes fertilizantes y variables climáticas (uso de nitratos, amonio).
- j) Disponibilidad del nutrimento para la planta medida en términos de tiempo (urea se absorbe por Ej. muy rápido).
- k) Considerar si la formulación es de presentación comercial química o física (valorar relleno).

La urea y el nitrato de amonio son fertilizantes tradicionales de uso muy común y difundido entre productores de caña, pero que por su naturaleza y acción química pueden sufrir mayores pérdidas de nitrógeno debido al aumento de la actividad de la

ureasa en los residuos del cultivo y la lixiviación de la fuente nitríca por el agua. La decisión en este caso es muy importante no solo en su eficiencia metabólica, sino también en el nivel potencial de pérdidas que puedan darse.

Por su trascendencia técnica y práctica es importante referirse con mayor especificidad a la **selectividad y preferencia que pueda tener la planta de caña de azúcar por las formas nitrícas o amoniacaes de nitrógeno** ¿Cuál tiene preferencia? En torno al tema, cabe reiterar lo señalado por Chaves (1999c), al anotar, que:

“Una de las inquietudes y cuestionamientos que surgen a menudo entre productores e investigadores, lo constituye lo relacionado con el comportamiento, la eficiencia y la efectividad de las fuentes nitrogenadas aplicadas al suelo, lo cual genera alguna incertidumbre en virtud de los intereses particulares de quienes promueven las diversas fuentes comerciales, afirmando la superioridad de algunas de ellas sobre otras.

La confusión tiene sentido, debiéndose afirmar que en términos prácticos no existe ninguna fuente nitrogenada que sea la más idónea para todas las situaciones, pues existen factores que favorecen en ciertas condiciones algunas de ellas. Está demostrado que cada fuente nitrogenada induce diferentes respuestas fisiológicas en la planta.

La literatura es contundente mayoritaria al afirmar que, en condiciones de campo y suelos con buena aireación, el NO_3^- es la forma de N predominante en la solución y por tanto más intensamente absorbida por las plantas.

Una vez que el nitrato es absorbido por las raíces puede tomar varias rutas como son, ser reducido en esa sección de la planta por medio de la enzima conocida como reductasa del nitrato (NR), almacenado en las vacuolas o en su caso ser transportado a la sección aérea, donde podrá ser almacenado o asimilado en formas orgánicas.

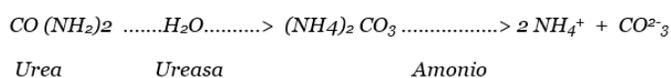
La absorción del NO_3^- en las plantas superiores es muy rápida y sigue los mismos patrones y modelos establecidos para la absorción de iones, requiriendo para ello de energía. En la caña de azúcar se ha demostrado que la concentración de N en la planta disminuye en función de la edad como se comentara más adelante.

El nitrato debe ser reducido antes de ser asimilado, en tanto que el amonio, una vez absorbido, puede ser inmediatamente

utilizado en la síntesis de aminoácidos y otros componentes orgánicos.

El amonio aplicado en forma directa, o aquel proveniente del nitrito, nitrato o la urea es incorporado en aminoácidos a través de una serie de reacciones enzimáticas.

La urea constituye otra fuente de N de muy amplio uso como fertilizante comercial en la caña de azúcar, que pueden las plantas emplear de varias maneras, siendo la más común la siguiente:



En este caso la urea es hidrolizada por la ureasa, enzima de muy amplia distribución, en una molécula de CO_2 y dos de amonio; como se nota, el producto final del proceso de transformación de la urea es N de la forma amoniaca. La urea puede ser también absorbida en forma directa, aunque a una velocidad muy inferior respecto al NO_3^- y al NH_4^+

Como está demostrado, el NO_3^- es la forma nitrogenada que más absorbe la caña de azúcar, aun cuando la fertilización se realiza en forma amoniaca; lo cual es debido a las oxidaciones

biológicas que ocurren en el suelo promovidas por la actividad microbial.

La absorción de NO_3^- es un proceso netamente activo, lo cual no está aún claro en el caso del NH_4^+ .

Se atribuyen las diferencias observadas en la tasa de absorción de las formas nítrica y amoniaca, como debidas a la acidez del medio. Indican Rao y Rains (1976), que la absorción de NH_4^+ se ve favorecida con pH neutros y se reduce al disminuirse este; mientras que en el caso de los NO_3^- la absorción es más rápida en pH bajos. Agregan que a valores de pH de 6,8 ambas formas iónicas son absorbidas en forma equivalente.

Como práctica racional para evitar establecer alguna predominancia en este sentido, resulta importante que al definir el programa de fertilización que se va a utilizar, se procure emplear una fuente que incorpore ambas formas químicas y establezca un equilibrio en esta materia. “

En el Cuadro 2 se desarrolla un interesante ejercicio por medio del cual se demuestra que no todas las fórmulas fertilizantes disponibles en el comercio, se ajustan a las necesidades nutricionales y fenológicas del cultivo y la razonabilidad financiera de la empresa cañera.

Cuadro 2. Relación económica de aplicar 120 kg de N empleando 11 fórmulas fertilizantes comerciales diferentes.

Fórmula Comercial	% N	Sacos (45 kg)		Costo Total (¢)	Diferencia (¢)	%	Aporte de otros nutrimentos (kg/ha)								
		Precio c/Saco*	N°				P2O5	K2O	CaO	MgO	S-SO4	B	Zn		
12 - 11 - 18 - 3 - 0,15	12	23.863	22,2	529.758	+441.946	603	109,9	179,8			30			1,5	
10 - 30 - 10 - 3,6 (S)	10	19.788	26,7	528.340	+440.528	602	360,4	120				129,7			
10 - 30 - 10	10	17.455	26,7	466.049	+378.237	531	360,4	120							
18 - 46 - 0 (DAP)	18	22.548	14,8	333.710	+245.898	380	306,4								
17 - 6 - 18 - 5 - 0,2 - 0,1 (Zn)	17	16.814	15,7	263.980	+176.168	301	42,4	127,2			35,3		1,4	0,7	
19-4-19-2-0,1 (B) - 1,8 (S) - 0,1 (Zn)	19	17.018	14	238.252	+150.440	271	25,2	119,7			12,6	34	0,6	0,6	
15-3-31	15	12.912	17,8	229.834	+142.022	262	24	248,3							
17-2-25-4,5 (MgO)-3,7 (S)- 0,2 (Zn)	17	13.031	15,7	204.586	+116.774	233	14,1	176,6			31,8	78,4		1,4	
27 - 6 (CaO) - 4 (MgO)	27	12.454	9,9	123.295	+35.483	140				26,7	17,8				
Nitrato de Amonio (33,5% N)	33,5	13.855	8	110.840	+23.028	126									
Urea (46% N)	46	15.140	5,8	87.812	-----	100									

Fuente: * Cámara Productores de Caña Zona Sur, precios del 07 mayo 2021.
Para pasar de S a forma absorbible SO4 se multiplica x 3; de B a B2O3 por 3,18.

Se infiere de la información de dicho cuadro varios asuntos relevantes, importantes y trascendentes que destacar y tener presente, virtud de sus consecuencias técnico-económicas, como son entre otras las siguientes:

- ❖ Supone la información contenida en dicho cuadro, que se pretende teóricamente incorporar una dosis de 120 kg de nitrógeno por hectárea, para lo cual se proponen y disponen 11 fórmulas opcionales disponibles en el

comercio (Cámara Productores de Caña Zona Sur, mayo 2021).

- ❖ Las preguntas inmediatas que surgen al respecto son ¿cuál fórmula seleccionar? ¿cuál es la mejor opción técnico-económica? ¿qué implicaciones y consecuencias tiene la decisión que adopte?
- ❖ En primera instancia es sano saber que todas las fórmulas y presentaciones comerciales de fertilizantes tienen una nomenclatura de aceptación mundial para indicar y expresar su contenido nutricional; el cual corresponde al siguiente orden en su numeración: N-P-K-Mg-B, donde los otros nutrimentos adicionales que puedan estar contenidos deben ser necesariamente identificados y anotados expresamente entre paréntesis (). La fórmula 17-2-25-4,5(MgO)-3,7(S)-0,2(Zn) es un buen ejemplo.
- ❖ La composición y los contenidos nutricionales son muy diversos creando un primer factor diferenciador determinante para tomar la decisión de cual adquirir, mostrando algunas opciones una constitución mineral amplia y compleja (ej. 19-4-19-2-0,1(B)-1,8 (S)-0,1 (Zn)); otras por su parte son simples y muy específicas para nitrógeno (ej. urea, nitrato de amonio, sulfato de amonio).
- ❖ En las fórmulas completas las materias primas que se empleen como base para incorporar N u otros nutrimentos impactan no solo la naturaleza y acción química del producto, sino también el costo de la misma.
- ❖ Complementario a lo anterior, las concentraciones de nutrimentos varían también de manera muy significativa entre fórmulas, lo que en el caso específico del nitrógeno se da en el ámbito del 10% al 46%.
- ❖ Los precios unitarios (€/saco de 45 kg) no son similares pues varían significativamente entre fórmulas dependiendo de su composición, lo que establece otro elemento decisivo importante que atender y resolver satisfactoriamente. La variación de precios se establece en el rango €12.454 - €23.863 para una diferencia de €11.409 correspondiente a un significativo e incuestionable 91,6%. La decisión de que fórmula utilizar adquiere por tanto consecuencias financieras importantes por su impacto directo en los costos relacionados.

- ❖ Para incorporar los 120 kg de N/ha el costo implicado usando urea (46% de N) es de €87.812; lo cual si por el contrario decido hacerlo con la fórmula 12-11-18-3-0,15 el mismo se eleva a €441.946, o sea un 603% más para un incremento en el valor de €529.758, lo que dimensiona el impacto financiero de la decisión. Si la decisión es incorporar 10-30-10-3,6 (S) el monto erogado sería de €528.340 o sea un 602% más. Otras fuentes son menos onerosas, pero menos concentradas, lo que determina la cantidad de sacos implicada en la aplicación.
- ❖ Cualquier formulación que contenga mayor concentración del elemento fósforo (P) será por lo general más onerosa por razones de formulación industrial. La presencia de otros nutrientes adicionales encarece también el valor.
- ❖ Es definitivo que la decisión administrativa se debe adoptar considerando varios elementos determinantes, como son: ¿cuánto aplico? ¿qué además de N incorporo? ¿cuál es el monto de la inversión? ¿cuál sería mi afectación en lo técnico, productivo y económico? ¿hay retorno?
- ❖ Lo ideal es siempre buscar en la decisión por adoptar una fórmula bien concentrada en N (ej. urea, nitrato de amonio, sulfato de amonio) que me reduzca la cantidad de sacos que debo adquirir, transportar, almacenar, llevar al campo y distribuir en la plantación, lo que impacta los costos y dificulta la operación técnica. La cantidad de sacos aumenta de manera paralela con la reducción de la concentración, por ej. con urea (46% N) solo requiero de 5,8 sacos de 45 kg para incorporar los 120 kg de N/ha; en tanto que con la 10-30-10 son necesarios 26,7 sacos debido a su menor contenido (10%).
- ❖ Acontece que las formulaciones simples no aportan por lo general otros nutrimentos adicionales como P, K, Ca, Mg, S, Zn, B, lo cual dependiendo del plan o programa de fertilización previsto cumplir, puede resultar contraproducente. Caso se utilicen fórmulas simples resulta necesario complementar con otras opciones bajas en N, pero completas en otros nutrimentos también esenciales, como son las N-P-K con elementos adicionales, lo que implica tener que combinar o fraccionar las aplicaciones.

- ❖ Siempre usar fórmulas concentradas resulta más económico, operativo y funcional, lo cual amerita como se indicó, decidir cómo incorporar los otros nutrimentos requeridos. Sin embargo, debe tenerse sumo cuidado en no exceder los contenidos de los elementos adicionales (P-K), los cuales pueden ser excesivos y sobre todo innecesarios, como acontece si se emplearan las opciones 10-30-10, 18-46-0 y 15-3-31 para incorporar N; en el otro extremo están las fórmulas simples como ya se comentó.
- ❖ Se aprecia en el Cuadro 2 como la adición de nutrimentos esenciales complementarios es importante en las fórmulas completas, lo que es muy satisfactorio e implica más costo por precio de la fórmula.
- ❖ No siempre la presencia de más nutrimentos en una formulación comercial significa e implica necesariamente más beneficio nutricional, pues ello depende del grado de concentración presente, lo cual muchas veces se reduce a trazas sobre todo con el Boro (B) y el Zinc (Zn). Debe tenerse cuidado en este aspecto y no caer en el error de incorporar fórmulas más de corte comercial que técnico.

Se concluye de todo lo expuesto que seleccionar la mejor formulación comercial para fertilizar la plantación no es una decisión sencilla, solo basada en precio, como por lo general ocurre, pues incorpora y considera otros elementos que deben ser de previo analizados, decididos y tomados en cuenta.

2) Dosis:

Este importante y determinante factor técnico está expresado también por varios condicionantes que lo hacen muy específico, como son entre otros los siguientes:

- a) La dosis por aplicar (kg/ha) debe irrestrictamente estar sustentada en criterios objetivos basados en análisis físico-químicos de suelos y foliares de ser viable; también en los resultados experimentales y experiencias productivas consolidadas en las localidades donde se ubica la plantación.
- b) La cantidad de nutrimentos incorporada debe considerar las condiciones edáficas, pero también las

climáticas prevaecientes en la localidad donde se produce la caña.

- c) No puede desconocerse la condición edafoclimática y de fertilidad actual del suelo en la expectativa productiva agroindustrial que se fije como meta empresarial; considerando que hay muchos factores que intervienen en esa pretensión, no solo la fertilización.
- d) Tener presente que aplicar más fertilizante no necesariamente asegura más productividad agroindustrial, pero sí de fijo más costo.
- e) Importante concebir que fertilizar no implica necesariamente por razones de integralidad nutrir la plantación, razón por la cual el concepto de integralidad, interacción y sinergismos resulta esencial de tener presente e implementar al momento de definir un plan o programa de fertilización y adquirir las fuentes comerciales. **La nutrición se induce con la fertilización, pero no por fertilizar se logra necesariamente nutrir una plantación.**

Es importante destacar que incorporar un exceso de N en el sistema de producción de la caña de azúcar por dosis elevadas, contribuye ostensiblemente a la contaminación del ambiente, especialmente en los trópicos, donde la eficiencia del nitrógeno de los fertilizantes es baja. Se estima que cerca de un tercio del fertilizante nitrogenado aplicado se pierde en la atmósfera o se filtra hacia aguas subterráneas en forma de amoníaco, óxido nitroso y nitratos; motivo por el cual, se ha sugerido la adopción, implementación y ejecución de varias estrategias técnico-administrativas para procurar mejorar la eficiencia de la fertilización nitrogenada y reducir con ello las pérdidas de N en el ambiente.

El Cuadro 3 resume y expone de manera simple y sucinta, el rango con las dosis de nitrógeno actualmente aplicadas en las plantaciones comerciales de caña de azúcar de Costa Rica, desagregada por región agrícola productora y sector implicado, sea productores independientes o ingenios azucareros. Los rangos consignados recogen las dosis extremas mínima-máxima aportada por las fuentes consultadas.

Cuadro 3. Cantidad de Nitrógeno aplicado en plantaciones de caña en CR.

Región Productora	kg N/ ha *			
	Productores		Ingenios	
	Caña planta	Caña soca	Caña planta	Caña soca
Guanacaste	120 - 130*	120 - 140	90 - 100	90 - 135
Pacífico Central	105 - 115	120 - 130	150 - 160	130 - 140
Valle Central	90 - 130	90 - 110	75 - 145	50 - 115
Zona Norte	70 - 90	70 - 80	90 - 110	80 - 100
Zona Sur	105 - 125	90 - 100	147 - 160	122 - 130
Turrialba / Juan Viñas**	130 - 187	90 - 145	267 - 287	210 - 230
Costa Rica - Ámbito	70 - 187	70 - 145	75 - 287	50 - 230
Costa Rica - Promedio	128,5	107,5	181	140

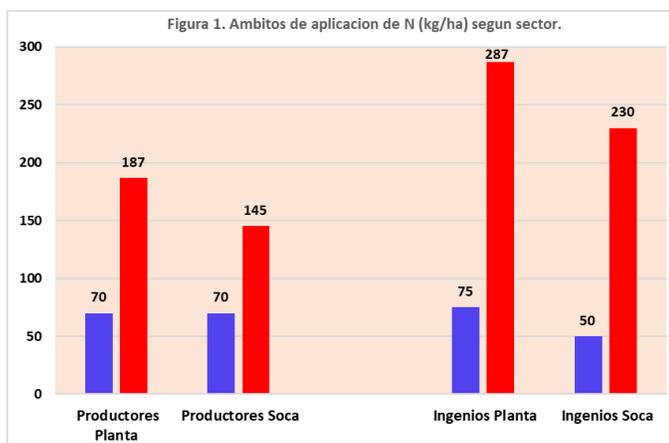
Fuente: DIECA (diciembre 2020).

* Establecidos a partir de consulta experta hecha a técnicos y productores.

** Algunas plantaciones corresponden a ciclos vegetativos de 18 a 24 meses.

Se infiere de esa información lo siguiente:

- ❖ La variación y dispersión en las dosis aplicadas en el campo cañero están determinadas por razones edáficas, climáticas, productivas, financieras, de ciclo vegetativo, varietales y expectativas del agricultor.
- ❖ Las cantidades de N aplicadas en el país, varían significativamente entre regiones, lo que responde a diferencias físico-químicas y microbiológicas de los suelos, clima e inversión en tecnología inducida por rentabilidad, entre otras.
- ❖ La Zona Norte es la región agrícola que en promedio menores cantidades de N (86,3 kg/ha) incorpora, seguida por el Valle Central (100,6 kg); en contrapartida, Turrialba-Juan Viñas por su parte, es significativamente la más alta (193,3 kg), seguida por el Pacífico Central (131,3 kg).
- ❖ Las dosis más altas de N (210-287 kg/ha) corresponden a plantaciones de ciclo bianual (18-24 meses) ubicadas en la zona alta (>1.000 msnm) de los cantones de Turrialba, Jiménez (Juan Viñas), Alvarado y Paraíso.
- ❖ Es evidente como se aprecia en la Figura 1, que las dosis de N incorporadas son mayores en el caso de los ingenios respecto a los productores independientes, al mostrar promedios de 181 y 128,5 kg/ha para caña planta y de 140 y 107,5 kg para el ciclo de soca o retoño, respectivamente. Uno de los motivos es la capacidad financiera disponible y disposición a invertir en tecnología.
- ❖ La caña planta de primer ciclo incorpora en promedio nacional más N (134,3 kg) que la de soca o retoño (123,8 kg).
- ❖ Turrialba-Juan Viñas es la localidad cañera donde más se polarizan (mínima-máxima) las dosis de N incorporadas en el caso de los productores con 57 kg en caña planta y 55 kg en soca; lo cual se da también en los ingenios del Valle Central con índices de 70 y 65 kg/ha, respectivamente.
- ❖ Pareciera razonable en algunas localidades cañeras revisar con prudencia y objetividad la cantidad de N aplicada, pues en concordancia con el grado de productividad agroindustrial obtenido pareciera que pueden ser reducidas en cantidad importante sin afectar rendimientos de campo.



3) Momento - época:

Como es comprensible entender, la sincronización y armonización de acciones y labores de campo surgidas entre la demanda del cultivo y la disponibilidad (oferta) de nutrimentos aportada para mejorar la eficiencia en el uso de los fertilizantes, es indudablemente muy pertinente y necesaria; motivo por el cual, la fenología del cultivo y la condición agronómica particular de la plantación en cada región y localidad es necesaria de tomar en cuenta. La caña de azúcar posee un ciclo vegetativo que por comodidad y diferenciación de actividades fisiológicas y metabólicas (fotosíntesis, división celular, crecimiento, hormonas y enzimas) se ha dividido en cuatro fases fenológicas (Chaves 2019a), siendo las dos primeras (Fases 1 y 2) las de interés para fines nutricionales.

La selectividad de los nutrimentos es máxima dependiendo de la fase fenológica en que se encuentre el cultivo, lo cual viene determinado expresamente por la "función y funcionabilidad" de los nutrimentos esenciales; esto operado de acuerdo con la edad de la planta. El P por ejemplo es obligado incorporar durante la siembra o luego de la cosecha (Fase 1), por su vínculo funcional directo con la división celular y promoción de nuevo tejido entre ellos el radical, motivo por el cual es conocido como "enraizador". El K virtud de tener relación con toda la actividad enzimática y osmótica de la planta, es siempre requerido, pues actúa inicialmente (Fases 1, 2 y 3) sobre la enzima invertasa ácida promotora del crecimiento y al final (Fase 4) sobre la maduración por medio de la invertasa neutra. Cada nutrimento cumple una función fisiológica y metabólica específica, la cual se puede ver afectada e intervenida por la generación de un estado de "estrés mineral" causado por insuficiencia y deficiencia, o en su caso por exceso y toxicidad (Chaves 2021).

El N es por excelencia el principal promotor de la división celular y el crecimiento vegetal, por lo que determina la producción de biomasa y con ello el tonelaje de la plantación, razón por la cual se debe adicionar durante las Fases 1 y 2 del ciclo vegetativo. Existe una reconocida relación de sinergia N-K, como señalara Chaves (2017b), que debe ser entendida, fomentada y fortalecida para obtener sus beneficios; la acción del K se considera como "una de las llaves fisiológicas" para que el N funcione correctamente. En consideración de su alta solubilidad y predisposición a perderse fácilmente, el N debe ser manejado con mucho cuidado y prudencia, incorporando prácticas que mitiguen y eviten posibles pérdidas innecesarias por una mala gestión técnica en el campo.

El fraccionamiento de la fertilización nitrogenada resulta ser una labor de campo obligada cuando es pertinente y efectiva como medida de control de pérdidas potenciales, como acontece en zonas de alta precipitación como la región Norte y la zona alta de la región Turrialba (Juan Viñas), lo cual debe ejecutarse apropiadamente respetando el principio de la "función y funcionabilidad" del nutriente. Es imperativo por esto que las fechas de aplicación y los momentos de adición del fertilizante fraccionado, responda a tiempos del cultivo en cuanto a crecimiento, máxima necesidad y aprovechamiento metabólico. Las aplicaciones tardías, luego de 90 días de ocurrida la siembra o la cosecha deben evitarse en cultivos con ciclo anual. No puede tampoco omitirse que fraccionar implica aumentar el costo por concepto de aplicación, el cual se compensa con la reducción de fertilizante perdido destinado a cumplir un objetivo específico.

Otra estrategia viable y razonable para mejorar y aumentar la sincronización entre la aplicación y la absorción del N por la planta, es la utilización de productos comerciales dotados de una menor solubilidad (fertilizantes de liberación lenta) o de liberación regulada (cutícula porosa), lo cual favorece la dosificación y disposición lenta del N de manera que las raíces de la planta pueden absorber el nutriente con mayor eficiencia. Los fertilizantes tradicionales de liberación rápida son útiles cuando la planta tiene igual velocidad de absorción y asimilación; sin embargo, como todavía no la poseen, los fertilizantes de liberación lenta son una excelente alternativa para disminuir las pérdidas. Chaves (2016a) expone los resultados alcanzados en las seis regiones productoras de caña del país, empleando 9 fuentes diferentes con aporte de N, donde destacan los beneficios de este tipo de formulaciones.

4) Colocación - ubicación:

La determinación de una correcta ubicación del fertilizante nitrogenado con relación a la planta de caña, puede ser un asunto tan importante como la decisión de definir la dosis de aplicación requerida. Existen varias posibilidades de sitios de ubicación del fertilizante, pero las opciones de colocación más comunes son superficialmente o sub-superficialmente, en bandas o al voleo, antes o después del momento de siembra-cosecha. Pese a su alta solubilidad y movilidad, se recomienda ubicar el fertilizante muy próximo a la zona de raíces absorbentes; esto es cerca de la banda de plantas y preferiblemente incorporado al suelo y tapado, sobre todo si el terreno presenta algún grado de pendiente, hay altas temperaturas, el pH es alto o hay posibilidades de lavado y erosión. No se recomiendan las aplicaciones al voleo por elevar la posibilidad de incurrir en pérdidas.

5) Otros factores vinculados:

Además de los factores mencionados anteriormente y señalados como primarios, existen otros adicionales que tienen también una influencia determinante en la eficiencia y efectividad de la fertilización y los fertilizantes nitrogenados, entre los que pueden mencionarse sucintamente los siguientes:

- a) **Condiciones climáticas:** las condiciones extremas de humedad, temperatura, luminosidad, viento, evapotranspiración y radiación, resultan contraproducentes y provocan afectación del metabolismo general de la planta, y con ello, su capacidad de absorción, distribución y asimilación nutricional.
- b) **Nivel de humedad contenida en el suelo:** el medio suelo debe contar con suficiente humedad (no insuficiente y seca ni tampoco excesiva generadora de anoxia) que favorezca la disociación del producto en el medio.
- c) **Variedad sembrada:** no todas las variedades de caña como está demostrado, tienen la misma capacidad asimiladora, productividad potencial de biomasa y requerimientos nutricionales similares, en particular de N.
- d) **Número de cosechas de la plantación:** resulta obvio y entendible que una plantación vieja y en estado decadente tiene menos necesidades nutricionales virtuales de su capacidad productiva disminuida; razón por la

cual en ciclos avanzados (+4 cosechas) las cantidades deben ser racionadas y adecuadas a la condición particular de productividad.

- e) **Edad (meses) del plantío:** por razones ajenas a circunstancias técnicas y/o biológicas (enciclaje, industriales, daño, razones fitosanitarias, etc.), muchas veces las plantaciones comerciales deben cosecharse antes o después del tiempo ideal previsto (12 meses), lo cual obliga a revisar el componente nutricional con el fin de reducirlo o en su caso incrementarlo de ser conveniente.
- f) **Uso para semilla:** una plantación destinada a la reproducción de semilla mejorada y con tiempo de cosecha recortada (7-9 meses), requiere producir mucha biomasa, lo que sugiere elevar la dosis de N.
- g) **Fertilización complementaria:** por razones de balances y equilibrios nutricionales, una fertilización debe visualizar siempre un efecto de integralidad; motivo por el cual el N debe complementarse con todos los nutrientes que la planta requiere, y no independizarlo del resto de elementos. Adiciones de solo N son generadoras de infertilidad y pérdida sistemática y acelerada de productividad en poco tiempo (cosechas); en cuyo caso *"lo barato sale caro"*.
- h) **Fuentes foliares:** la aplicación foliar de productos nitrogenados como la urea no han demostrado ser lo suficientemente eficientes y rentables para pretender complementar y, menos aún, sustituir las aplicaciones de N granular al suelo. Otras fuentes en presentación líquida (amoniacaes) fueron evaluadas en el país con resultados técnicos satisfactorios, aunque limitante en cuando a la posibilidad de implementar y operar pragmáticamente el mecanismo implicado en buena parte de nuestras plantaciones por motivos de relieve, razones mecánicas, económicas y operativas.
- i) **Acondicionamiento y corrección de suelos:** una nutrición prudente y técnicamente efectiva requiere del obligado acondicionamiento y mejoramiento previo del suelo, sea por corrección de la acidez, atención de la compactación o la incorporación de abonos orgánicos. Un fertilizante ve severamente limitado su accionar si las condiciones del sustrato no son las mejores.
- j) **Grado de pendiente de la plantación:** las posibilidades de perder fertilizante por erosión, lavado y arrastre en

localidades de pendiente variable (agricultura de ladera) puede ser elevada, lo cual en muchos casos resulta significativo y preocupante. Es imperativo en esas condiciones contar con un programa de conservación de recursos naturales, como son los que atacan la erosión del suelo.

- k) **Forma de aplicación:** las modalidades de aplicación del fertilizante en forma manual y/o mecanizada tradicional marcan diferencias en cuanto a la pérdida potencial de producto, lo cual se maximiza si la condición de relieve del terreno y condición del equipo no es la mejor.
- l) **Costo del fertilizante:** como se demostró, este aspecto resulta determinante y a la vez limitante si no se cuenta con las condiciones financieras necesarias para satisfacer la ejecución de un programa integral y completo en todos los indicadores técnicos involucrados.

Participación e incidencia del clima

La solubilización, disponibilidad, absorción, transporte y asimilación de nutrientes corresponde a un proceso complejo y multivariado de naturaleza física-química-biológica-metabólica, donde ocurren múltiples interacciones sinérgicas y antagónicas en el ámbito de las relaciones clima-suelo-planta.

En ese dinámico contexto, la condición en que se encuentren los elementos del tiempo climático resultan determinantes para el éxito productivo y económico de una fertilización. La humedad, la temperatura y el oxígeno disponible en el medio influyen sustantivamente sobre los procesos que determinan la solubilidad, velocidad y los contenidos de N que estarán dispuestos a las plantas para su absorción.

La humedad es considerada por mayoría uno de los elementos del clima más importantes y determinantes del proceso, pues regula la solubilidad, el metabolismo de la planta y la actividad microbiana del suelo de diferentes formas, como lo anotara Chaves (2020a) al señalar al respecto como mecanismos participantes los siguientes “a) como componente del protoplasma celular, b) modificando las tasas de intercambio gaseoso y c) disolviendo y transportando diferentes nutrientes esenciales. Lo anterior conduce con argumento sólido a establecer una asociación válida entre las condiciones de pluviosidad y el contenido de N presente en el suelo; por lo cual, al intensificarse las lluvias se genera una vegetación más

exuberante, incrementando la deposición de restos orgánicos elevando así el contenido de N; lo cual favorece las condiciones para activar la fijación biológica de N.”

Debe sin embargo reconocerse que las interacciones y los efectos combinados que surgen entre todos los factores bióticos y abióticos, son más determinantes que los efectos que individualmente cualquier variable pueda ejercer sobre el sistema suelo-planta.

Conclusión

En la práctica agrícola el cuidado y mejoramiento del suelo evitando y contrarrestando su degradación como lamentablemente viene aconteciendo en el campo cañero nacional (Chaves 2020b), asociado a un correcto manejo en el empleo de los fertilizantes conducen a capitalizar y optimizar la función de los nutrientes. En este contexto, el desafío planteado para el agricultor y la institucionalidad azucarera nacional, es gestionar la implementación de las mejores prácticas en procura de cumplir con cuatro objetivos básicos: a) maximizar el potencial de las variedades cultivadas y el sistema productivo, b) producir materia prima de la más alta calidad que satisfaga los requerimientos fabriles, c) optimizar la eficiencia productiva agroindustrial y económica de los insumos aplicados y d) preservar y/o mejorar la calidad del ecosistema en un ambiente de ecoeficiencia.

Entre esas mejores prácticas de manejo del campo cañero es necesario e imperativo considerar, intervenir y accionar en principio sobre seis pasos básicos que conducen a lograr un eficiente y satisfactorio uso de los fertilizantes, como son: la selección de la fuente, la dosis incorporada (kg/ha), la forma de colocarlo, el momento de realizar la aplicación, la condición y estado de la planta y las condiciones climáticas prevalecientes en el lugar. Adicionalmente, el diseño de las estrategias de intervención en el manejo de los fertilizantes y los nutrientes no puede alejarse, descuidar, ni desatender los principios básicos que procura satisfacer el productor de caña, entre los cuales están: 1) incrementar de manera sostenida la productividad agroindustrial, 2) reducir y minimizar los costos de producción vinculados sin afectar productividad, 3) maximizar la rentabilidad y las utilidades de la empresa y 4) optimizar la sustentabilidad del sistema de producción y la protección del ambiente. La gestión y labor del agricultor es compleja si desea ser eficiente, muy competitivo y mantenerse vigente en el negocio de la caña.

Para alcanzar todas esas metas es necesario e insoslayable conocer los mecanismos que involucran la dinámica y el accionar de los nutrientes en el sistema suelo-planta; utilizar los métodos más convenientes para evaluar su disponibilidad en el suelo; saber la demanda particular del cultivo (variedad) en el entorno en que se desarrolla la plantación; y por último, conocer la condición e influencia que tienen los factores climáticos sobre la disponibilidad y accionar de los nutrientes en el suelo y la planta (Chaves 2019b). Es sin embargo una realidad que no puede evadirse, reconocer que la forma, circunstancia y contexto en que operan los sistemas actuales de producción de caña de azúcar nacional y mundial, hacen que cada vez sea más difícil poder cumplir y satisfacer estas pretensiosas pero deseadas y necesarias metas. Es un hecho conocido que **muchos de los problemas de fertilidad del suelo superan la problemática del cultivo, pues son de carácter natural e intrínsecos al sistema agroproductivo.**

Es definitivo que el efecto y la eficiencia que los fertilizantes tienen en la obtención de un mayor tonelaje de caña puede ser estimado, evaluando el impacto de los mismos sobre indicadores reveladores y representativos y sobre la combinación de los mismos, de tal forma que incluyan y participen factores limitantes y promotores de la producción, y no sólo por medio de la eficiencia agronómica. Por ello, se debe echar mano a todas las herramientas tecnológicas y medidas administrativas de apoyo que coadyuven en la toma de decisiones.

No cabe la menor duda que los efectos e impactos provocados por el cambio climático han venido a crear un nuevo contexto para que la industria de los fertilizantes, contribuya a mitigar y adaptarse pronto al nuevo entorno productivo, en procura de producir y hacer agricultura en un ambiente más sostenible y seguro para la seguridad alimentaria global. La mayor productividad agrícola, alcanzada por un uso más eficiente y racional de los fertilizantes químicos, se convierte en una excelente estrategia para prevenir una mayor deforestación, favorecer la protección de la biodiversidad y reducir con ello los niveles de emisión de gases GEI por unidad de producto agrícola. Los aportes de los nuevos y modernos productos que se dispongan para uso comercial deben conducir a evitar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera; reduciendo como prioridad, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O), entre otras. **Si la agroindustria azucarera costarricense desea contribuir efectiva**

y significativamente en la mitigación del calentamiento global, debe intervenir y optimizar como prioridad ineludible, las emisiones generadas a partir del nitrógeno incorporado con la fertilización de las plantaciones comerciales; otras acciones son apenas cosméticas y de poco impacto para ese objetivo.

Como corolario es imperativo y obligado mencionar en este tópico tan preciso, que se necesita en el país desarrollar aún más investigación específica y de muy alto nivel técnico, orientada a comprobar el grado de eficiencia y efectividad con que opera la fertilización que se practica en los diferentes sistemas de cultivo y ambientes nacionales donde se siembra y cosecha caña de azúcar. Los estudios en campo a largo plazo e invernadero, son instrumentos operativos que pueden brindar un mejor conocimiento sobre el efecto e impacto de las tecnologías basadas en la aplicación de fertilizantes y de nitrógeno en lo específico. Es notoria también la clara necesidad de investigación aplicada para ajustar y optimizar el manejo de los fertilizantes nitrogenados, la maquinaria requerida y traducir los resultados en recomendaciones viables, factibles, pragmáticas y accesibles para el agricultor.

Las recomendaciones que se generen y socialicen en materia nutricional deberán ser por consecuencia muy específicas para cada localidad y entorno agroproductivo de caña, considerando la condición de factores abióticos prevalecientes, tales como el tipo y la condición de fertilidad del suelo, la cantidad de lluvia caída y temperatura dominante; así como también en los elementos bióticos y prácticas agronómicas que se realicen, tales como variedad sembrada, renovación de plantaciones, ciclo vegetativo y número de cosechas, estado fenológico y fitosanitario de la plantación, la cantidad de residuos del cultivo que quedan en el campo y finalmente, considerar los objetivos, disposición y acciones del agricultor orientadas a producir mayores rendimientos del cultivo.

Literatura citada

- 1) Angulo Marchena, A.; Rodríguez Rodríguez, M.; Chaves Solera, M.A. 2020. **Guía Técnica. Cultivo Caña de Azúcar. Región: Guanacaste.** San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 78 p.
- 2) Barrantes Mora, J.C.; Chaves Solera, M.A. 2020. **Guía Técnica. Cultivo Caña de Azúcar. Región: Sur.** San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 75 p.

- 3) 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.
- 4) Calderón Araya, G.; Chaves Solera, M.A. 2020. **Guía Técnica. Cultivo Caña de Azúcar. Región: Turrialba**. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 95 p.
- 5) Chaves Solera, M.A. 1983. **Nuevas recomendaciones para la fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica**. Boletín Informativo DIECA (Costa Rica) Año 1, N° 4, San José, diciembre. p: 1-3.
- 6) Chaves, M.; Bermúdez, A. 1999a. **Por una mayor conciencia ambiental en el sector azucarero**. En: Congreso de ATACORI "Randall E. Mora A.", 13, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 1999. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), setiembre. p: 274-278.
- 7) Chaves, M. 1999b. **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.
- 8) Chaves Solera, M. 1999c. **El Nitrógeno, Fósforo y Potasio en la caña de azúcar**. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, setiembre. 130 p.
- 9) Chaves Solera, M. 2001a. **Fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica: experiencias de los Últimos 20 Años (Periodo 1980-2000)**. En: Congreso Latinoamericano, 15 y Congreso Cubano, 5, de la Ciencia del Suelo, Varadero, Cuba, 2001. Programas y Resúmenes. Varadero, Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. 2001. Nov. 11-16. Boletín N° 4. p: 114. También en: En: Congreso de ATACORI "Ing. Agr. José Luis Corrales Rodríguez", 15, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 2003. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), setiembre. p: 49-54.
- 10) Chaves Solera, M. 2010. **Dinámica del Nitrógeno en el suelo y la planta de caña de azúcar**. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, noviembre. Presentación Electrónica en Power Point. 57 Láminas.
- 11) Chaves Solera, M.A. 2015. **Errores y omisiones técnico-administrativas que sacrifican productividad y cuestan dinero en la agroindustria azucarera**. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, febrero. 16 p.
- 12) Chaves Solera, M.A. 2016a. **Estudio de 9 fuentes de Nitrógeno realizados en 6 regiones productoras de caña de azúcar de Costa Rica: compendio de resultados**. Liberia, Guanacaste, Costa Rica, abril. Presentación Electrónica en Power Point. 107 Láminas.
- 13) Chaves Solera, M.A. 2016b. **Resultados de investigación con el uso del Nitrógeno en la caña de azúcar en Costa Rica**. En: Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Latinoamérica y El Caribe (ATALAC), 10, y Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de México (ATAM), 38. Memoria Digital y Resúmenes. Setiembre 2016, Veracruz, México. 26 p.
- 14) Chaves Solera, M.A. 2016c. **El Nitrógeno como factor de productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica**. En: Congreso Nacional Agropecuario, Forestal y Ambiental, 14, Centro de Conferencias del Hotel Wyndham Herradura, Heredia, Costa Rica, 2016. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Colegio de Ingenieros Agrónomos de Costa Rica, octubre 27 al 29. 9 p.
- 15) Chaves Solera, M.A. 2017a. **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, 2017a. 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.
- 16) Chaves Solera, M.A. 2017b. **Sinergismo N-K y productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica**. En: Congreso Nacional de Suelos, 9, San José, Costa Rica, 2017. Memorias. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS), octubre 25 al 27, Hotel Crowne Plaza San José Corobici. 7 p.
- 17) Chaves Solera, M.A. 2019a. **Clima y ciclo vegetativo de la caña de azúcar**. Boletín Agroclimático 1(7): 5-6, julio.
- 18) Chaves Solera, M.A. 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.
- 19) Chaves Solera, M.A. 2020a. **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.
- 20) Chaves Solera, M.A. 2020b. **Clima, degradación del suelo y productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica**. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(15): 5-13, julio.
- 21) Chaves Solera, M.A.; Barquero Madrigal, E. 2020. **Guía Técnica. Cultivo Caña de Azúcar. Región: Zona Norte**. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 135 p.
- 22) Chaves Solera, M.A. 2021. **Estrés mineral y caña de azúcar en Costa Rica**. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(11): 5-21, mayo.
- 23) Dobermann, A. 2007. **Nutrient use efficiency-measurement and management**. Proc. Of International Fertilizer Industry Association (IFA) Workshop on Fertilizer Best Management Practices. Brussels, Belgium. March 7-9.
- 24) Epstein, E.; Bloom, A. 2006. **Nutrição Mineral de Plantas: Principios e Perspectivas**. 2 edic. Trad. Maria Edna Tenório Nunes. Londrina, Brasil. Editora Planta. 403 p.
- 25) Fassbender, H.W.; Bornemisza, E. 1994. **Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina**. Hans W. Fassbender y Elemer Bornemisza. 2ª. Ed. Rev. San Jose, CR: IICA. 420 p.
- 26) Stewart, W.M. 2007. **Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes**. Quito, Ecuador. Informaciones Agronómicas. International Plant Nutrition Institute (IPNI), N° 67. 7 p. octubre.

Recuerde que puede acceder los boletines en
www.imn.ac.cr/boletin-agroclima y en
www.laica.co.cr