

## Periodo 06 de setiembre al 19 de setiembre 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 06 DE SETIEMBRE AL 19 DE SETIEMBRE

En la figura 1 se puede observar, a partir de datos preliminares de 110 estaciones meteorológicas, el acumulado quincenal de lluvias sobre el territorio nacional.

Los acumulados diarios de lluvia superiores a 40 mm se registraron en la región azucarera Guanacaste Este durante el 9 y 15 de setiembre; mientras Guanacaste Oeste el 10 de setiembre; Norte el 15 de setiembre; Puntarenas el 10 de setiembre; Sur durante el 5 de setiembre. Las regiones que superaron los 20 mm diarios de lluvia son Turrialba el 13 de setiembre y Valle Central el 6-7 y 15 de setiembre.

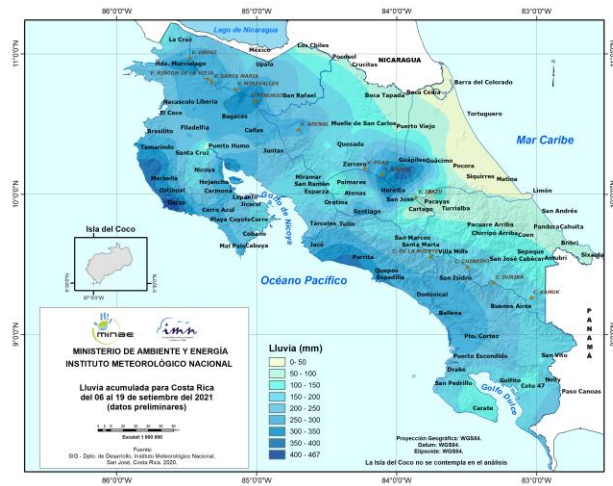
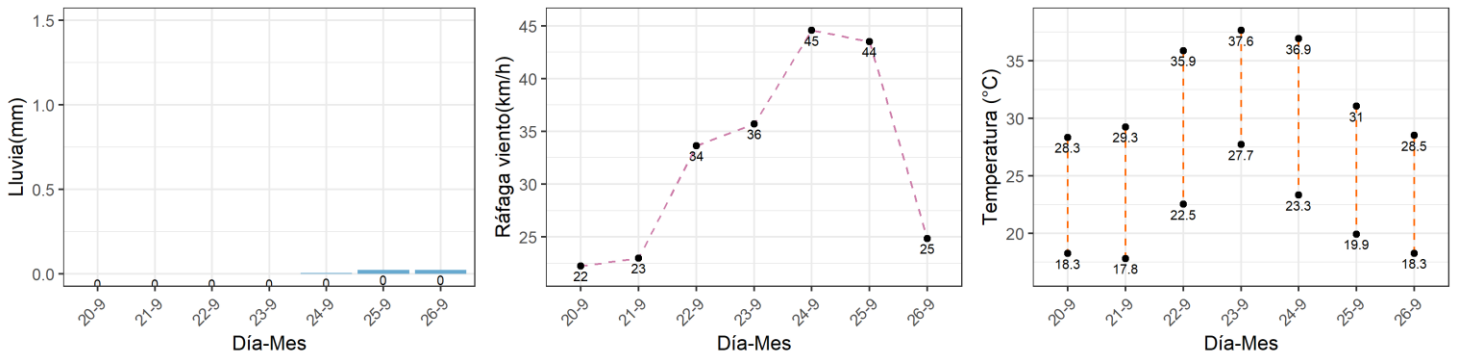


Figura 1. Valores acumulados de la precipitación (mm) durante la quincena del 06 de setiembre al 19 de setiembre del 2021.

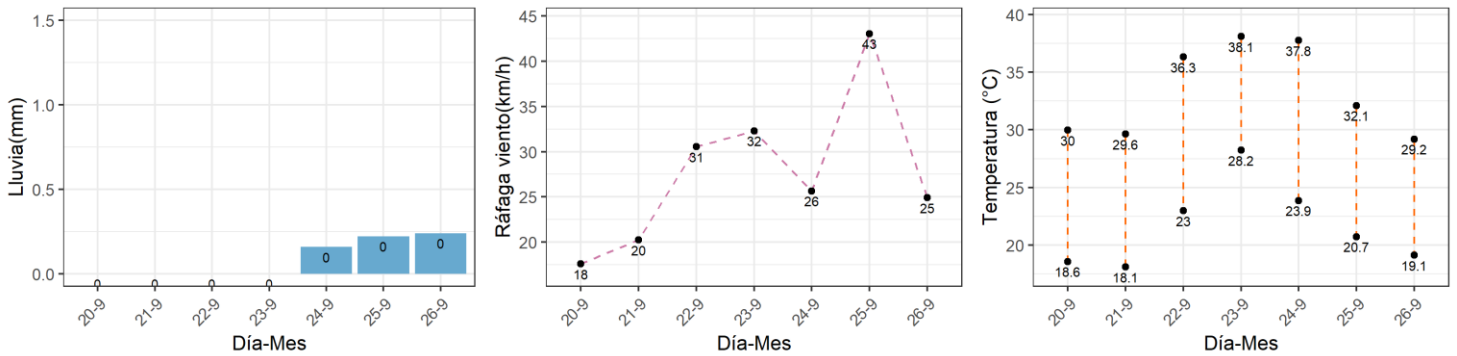
## PRONÓSTICO PARA LAS REGIONES CAÑERAS DEL 20 DE SETIEMBRE AL 26 DE SETIEMBRE

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. La Región Norte mantendrá viento del Este; mostrando su mayor contenido de humedad hacia el fin de semana y temperaturas medias variable. Guanacaste (Este y Oeste) presentará viento Este, con el contenido de humedad entre bajo-medio y su máximo hacia el fin de semana; así como reducción paulatina de la temperatura media. Valle Central (Este y Oeste) tendrá viento variable y contenido de humedad más alto en la segunda mitad de semana: así como temperatura media más alta en la primera mitad de semana. Para Turrialba (Alta y Baja) se prevé viento dominante del Este, excepto jueves y viernes que permanecerá variable, humedad de media a alta y temperatura variable. En la región Sur se espera viento del Oeste con cambio a viento Este a partir del sábado; iniciando la semana con contenido de humedad bajo que a partir del miércoles oscila entre medio- alto; así como temperatura media variable que muestra sus mínimos hacia el fin de semana. Puntarenas inicia la semana con humedad baja cambiando a media-alta después del miércoles; así como viento del Este con un incremento considerable hacia el fin de semana; y temperatura media más baja en la segunda mitad de semana.

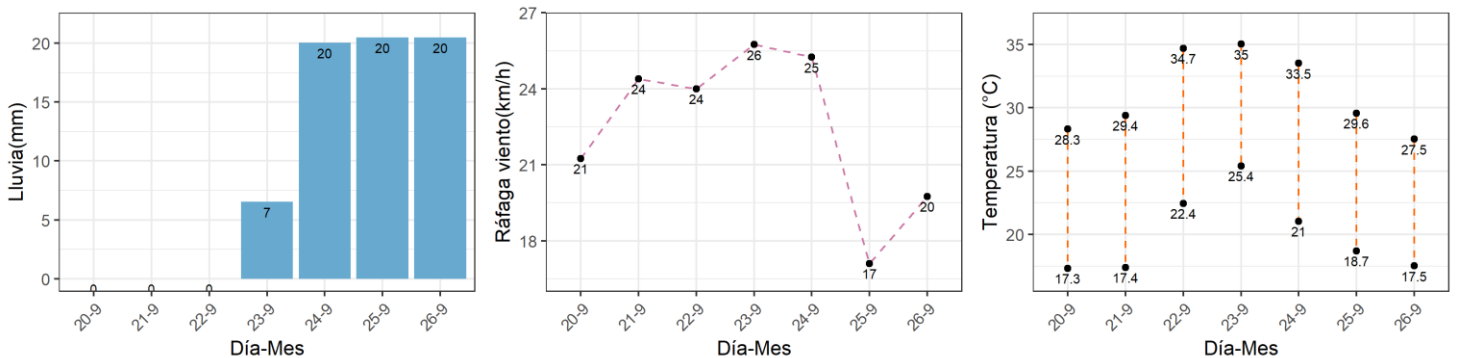
*“La onda tropical #36 transita sin afectación sobre el país el día de hoy. Las tormentas tropicales Peter y Rose **no tendrán** influencia indirecta ni directa sobre Costa Rica. Se espera el tránsito de la onda tropical #38 hacia el fin de semana.”*



**Figura 2.** Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 20 de setiembre al 26 de setiembre en la región cañera Guanacaste Este.



**Figura 3** Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 20 de setiembre al 26 de setiembre en la región cañera Guanacaste Oeste.



**Figura 4.** Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 20 de setiembre al 26 de setiembre en la región cañera Puntarenas.

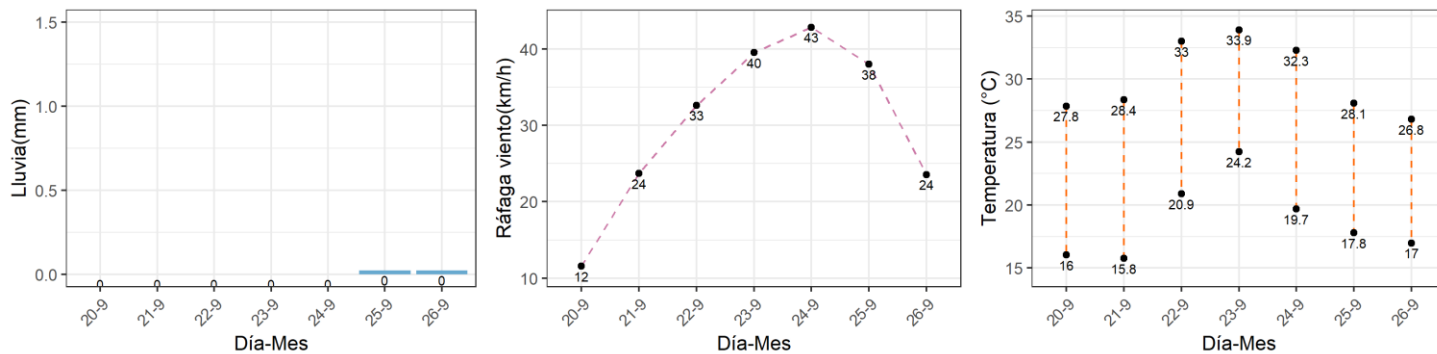


Figura 5. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 20 de setiembre al 26 de setiembre en la región cañera Zona Norte.

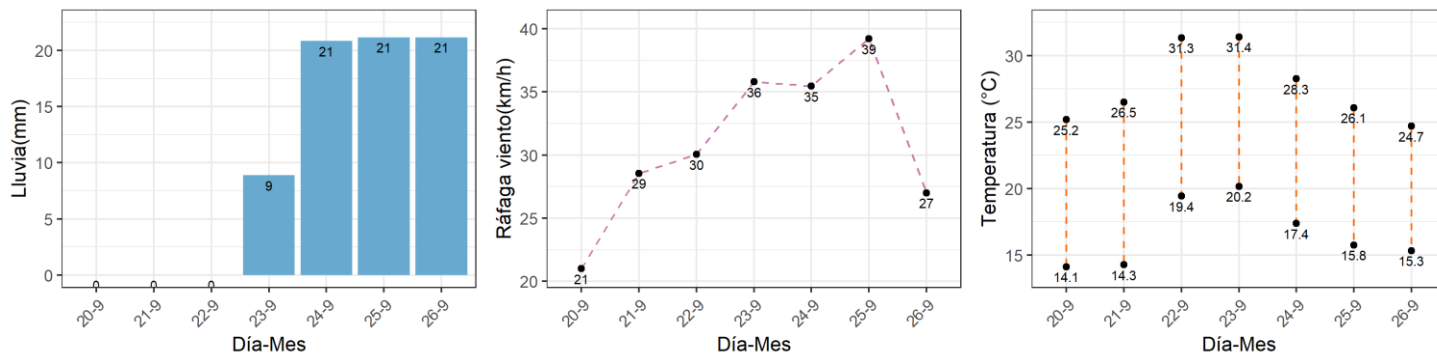


Figura 6. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 20 de setiembre al 26 de setiembre en la región cañera Valle Central Este.

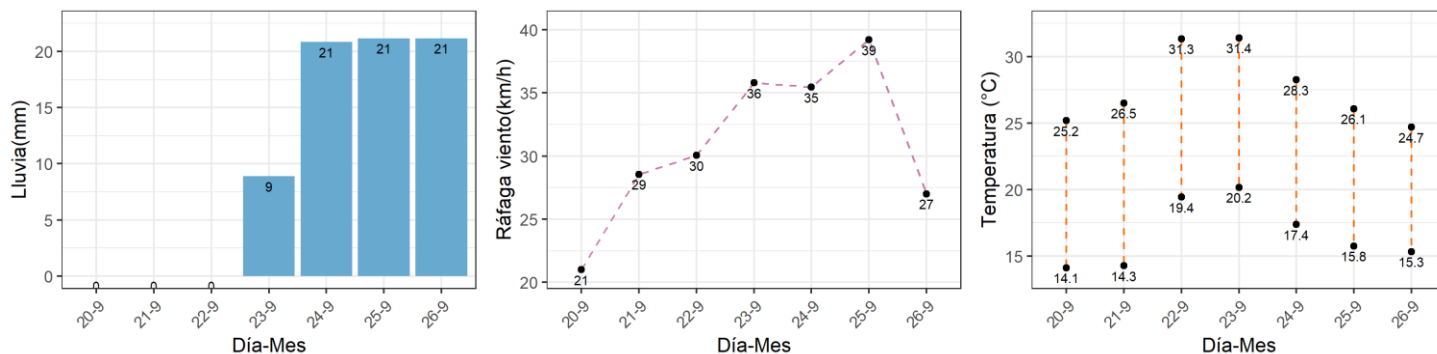


Figura 7. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 20 de setiembre al 26 de setiembre en la región cañera Valle Central Oeste.

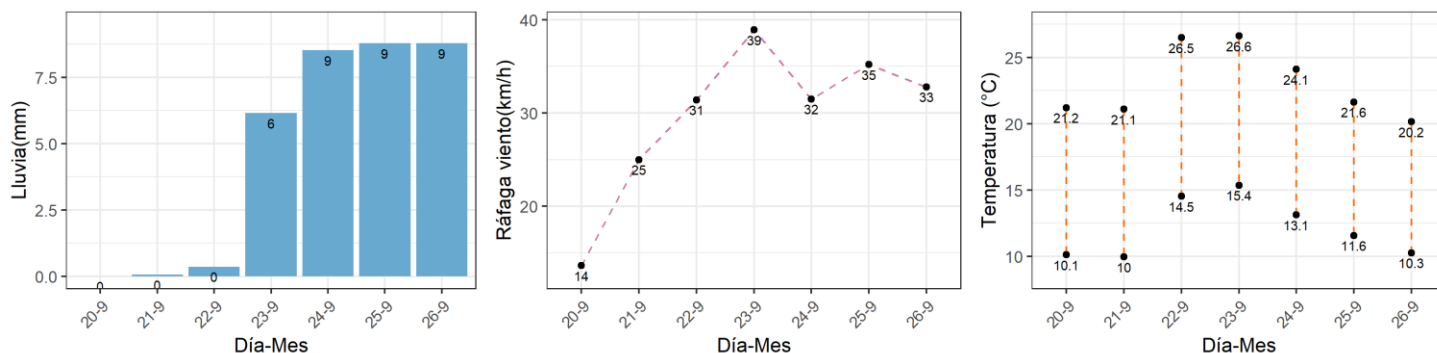


Figura 8. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 20 de setiembre al 26 de setiembre en la región cañera Turrialba.

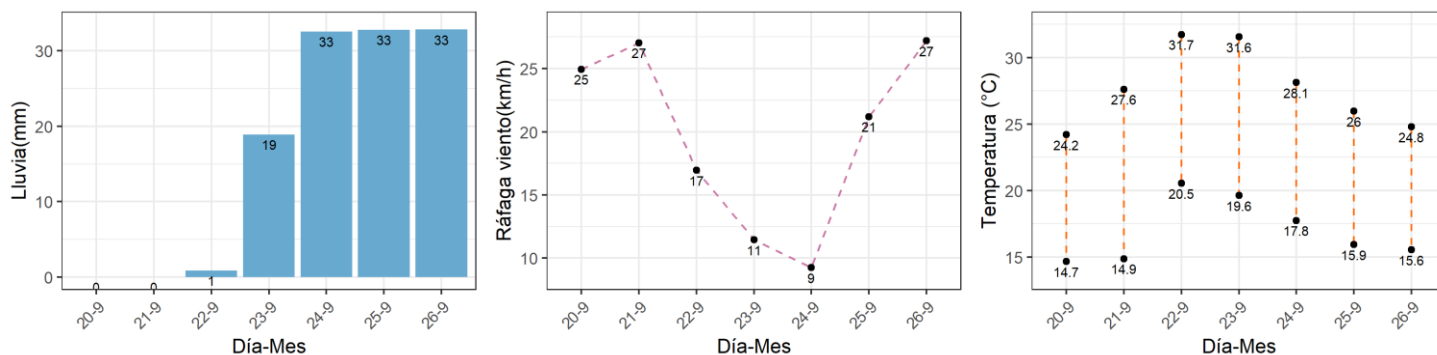


Figura 9. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 20 de setiembre al 26 de setiembre en la región cañera Zona Sur.

## TENDENCIA PARA EL PERIODO DEL 27 DE SETIEMBRE AL 03 DE OCTUBRE

Se prevé una semana menos ventosa que la anterior. De momento no se prevé el paso de una onda tropical afectando el país. La onda tropical #40 que actualmente tiene alto potencial de convertirse en Tormenta Tropical, ubicada detrás de la Tormenta Tropical Rose, no se espera que tenga influencia indirecta ni directa sobre Costa Rica.

La Región Norte inicia la semana con humedad media, viento del Este y temperatura variable; de forma que la semana muestre condiciones levemente más lluviosas de lo normal acompañado de viento del Este más acelerado de lo normal. Guanacaste (Este y Oeste) iniciará la semana con viento del Oeste, además de contenido de humedad de medio a alto y temperatura variable; en tanto la semana completa evidencia condiciones levemente más lluviosas de lo normal y viento del Este más acelerado de lo normal. Valle Central (Este y Oeste) inicia la semana con viento, humedad y temperatura media variable; de forma que la semana sea más lluviosa de lo normal y viento del Este sutilmente más acelerado de lo normal. Para Turrialba (Alta y Baja) se prevé que la semana de inicio con viento variable, alta humedad y temperatura media fluctuante; manteniéndose la semana más lluviosa de lo normal y viento del Este sutilmente más acelerado de lo normal. En la Región Sur se espera un inicio de semana con viento del Oeste, condiciones de humedad media y temperatura variable; donde se espera que la semana sea levemente más lluviosas de lo normal acompañado de viento normal de la época. Puntarenas inicia la semana con humedad entre baja a media, así como viento del Oeste y temperatura media variable; esperándose que la semana mantenga condiciones más lluviosas de lo normal y viento del Este sutilmente más acelerado de lo normal.

## 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, durante la semana del 13 al 19 de setiembre de 2021 se presentó alta saturación en los suelos de las regiones Guanacaste Oeste y Este, Región Norte y Región Sur; en las regiones Valle Central Oeste y Este se tuvo alta humedad en los primeros días de la semana, pero disminuyó a partir del miércoles. Las regiones Puntarenas, Turrialba Baja (600-900 m.s.n.m.) y Turrialba Alta (> 1000 m.s.n.m.) presentaron bajos porcentajes durante todo el periodo.

Como se observa en la figura 11, las regiones Guanacaste Oeste y Valle Central Oeste presentan entre 30% y 75%, mientras que las regiones Guanacaste Este, Puntarenas y Valle Central Este tienen entre 30% y 60%.

El porcentaje de humedad de la Región Norte está entre 45% y 90%; la Región Turrialba Alta tiene entre 30% y 90% y la Región Turrialba Baja presenta entre 30% y 75%. La Región Sur varía entre 30% y 90% de humedad.

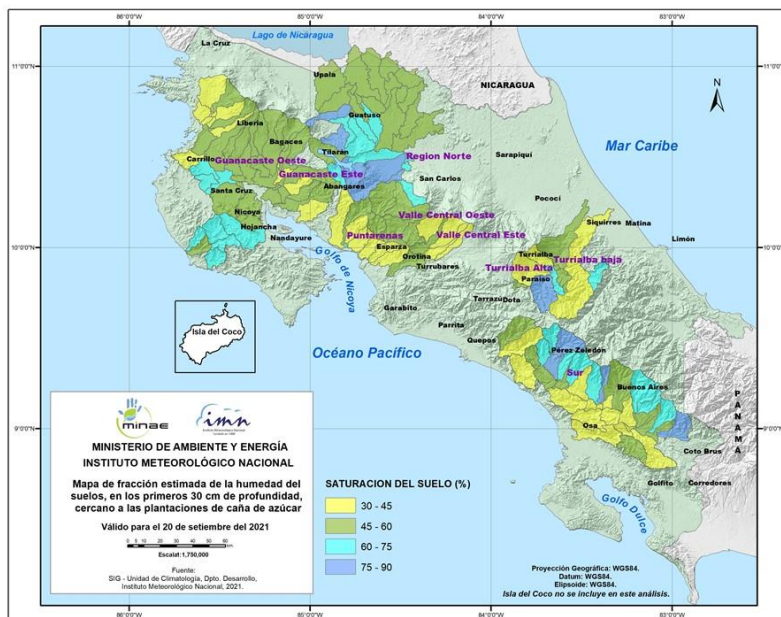


Figura 11. Mapa de fracción estimada de la humedad en porcentaje (%), en los primeros 30 cm de profundidad, cercano a las plantaciones de caña de azúcar, válido para el 20 de setiembre del 2021.

## 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

## Nitrificación y pérdidas potenciales de nitrógeno en suelos cañeros

**Ing. Agr. Marco A. Chaves Solera, M.Sc.**

*chavessolera@gmail.com*

*Especialista en el Cultivo de la Caña de Azúcar*

## Introducción

La fertilización es una práctica agrícola común y tradicional de campo que resulta incuestionablemente necesaria y estratégica en el manejo y producción eficiente y rentable de los cultivos, lo que no es excepción en el caso particular de la caña de azúcar; sin embargo, requiere para satisfacer a cabalidad esa pretensión, incrementar significativamente su eficiencia y optimizar su empleo debido al alto costo involucrado y los efectos ambientales contraproducentes generados colateralmente. Es conocido por todos, que el nitrógeno (N) sin menoscabo, inadvertencia, ni desconsideración de los otros nutrimentos esenciales, representa sin lugar a duda virtud de sus características y propiedades, el elemento más importante y al que debe prestársele mayor atención en cualquier programa de nutrición comercial que aspire a ser sostenible y competitivo.

Cada vez oímos hablar con mayor frecuencia y preocupación de los impactos que sobre el ambiente y la sociedad viene provocando el modelo de vida actual, donde muchas de las prácticas y actividades (antropogénicas) desarrolladas por la “modernidad”, se tornan contraproducentes para el balance y la estabilidad futura del sistema. Las formas desproporcionadas y descontroladas de producir y consumir han venido lamentablemente provocando e induciendo, la presencia y acumulación creciente de problemas serios y complejos que merecen su atención y solución inmediata con el fin de evitar su agotamiento y colapso.

En torno a esta sentida y razonable preocupación, expresa Chaves (2021e) con absoluta convicción, que *“Una población cada vez mayor en el mundo se siente perturbada, preocupada y muy alarmada ante la seria amenaza que para la naturaleza y el ambiente, y por ende para la estabilidad y calidad de vida de*

*toda la humanidad, significa e implica el alto grado de contaminación, polución, degradación, pérdida de recursos naturales y biodiversidad que de manera sistemática y creciente se viene observando y que están impactando los ecosistemas. Dicho efecto es promovido y provocado en lo esencial por muchos (no todos) los procedimientos empleados en las actividades y prácticas urbanas, comerciales, industriales y también agrícolas. Los estudios revelan con angustiosa contundencia que, de mantenerse esta tendencia, el sistema en poco tiempo no será sostenible, con las graves consecuencias que ello significa e implica para todos. Son conocidos y muy lamentables los efectos negativos que el denominado “cambio climático” viene provocando en la actualidad a nivel mundial.*

*Estos impactos y amenazas son diversos en su origen, características y consecuencias, lo que involucra factores bióticos y abióticos que como se indicó ocasionan efectos por contaminación (hídrica, atmosférica, edáfica, sónica), polución, destrucción de hábitats, agotamiento de los recursos minerales y biológicos que disminuyen la biodiversidad, cambios de fondo en la pauta climática por causa de la combustión de combustibles de origen fósil y con ello el calentamiento global (efecto de invernadero), el agotamiento de la capa de ozono, la desertificación, la erosión y la degradación sistemática de los suelos. La relación e interacción de esos elementos es causante como se ha demostrado, de serios problemas de estrés y salud pública que van lamentablemente en detrimento directo de la calidad de vida de la humanidad.”*

Acontece que cuando en la producción de alimentos se abona la tierra con el objeto de mejorar la condición del sustrato e incrementar con ello los rendimientos agropecuarios y agroindustriales, para satisfacer las crecientes necesidades alimentarias de la población, se utilizan grandes cantidades de

fertilizantes orgánicos y predominantemente sintéticos, formulados de acuerdo con las diferentes necesidades del campo. Entre esos insumos, los productos nitrogenados tienen especial relevancia virtud de su efecto favorable sobre la productividad y la calidad de los alimentos por la proteína que aportan cuando son bien utilizados. Es conocido y está comprobado, sin embargo, que lamentablemente la impericia y el uso excesivo de fertilizantes bajo premisas y expectativas equivocadas ha venido generando graves consecuencias ambientales de enorme impacto a los ecosistemas, como lo señalara con gran detalle Chaves (2021e); las cuales se generan principalmente por pérdidas de N por gasificación en forma de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) muy reactivos, como es el caso del óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y lavado de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), entre otras.

Consecuentes y concordantes con lo que manifestara Chaves (2021e) en relación con la materia aludida, *“El tema de las pérdidas de N en la agricultura es prioritario, muy importante de abordar y estimar por lo que no puede ser desconocido y menos desatendido como estrategia productiva, económica y ambiental, todas vinculadas directamente con la sostenibilidad y competitividad del sistema agroproductivo.”* Sin embargo, lo más preocupante de esta situación claramente inconveniente, es que esas pérdidas se traducen lamentablemente en contaminación ambiental, cambio climático, afectación de los ecosistemas, pérdidas de biodiversidad, impactos en la salud, sentida desmejora en la calidad de los alimentos y quebranto de la calidad de vida de la población; lo que obliga a revisar, actuar, corregir y mitigar la ecuación agro-productiva donde sea viable y factible.

Uno de los efectos indeseables provocados por los fertilizantes nitrogenados es la pérdida potencial y real de N que se da en forma de nitratos y nitritos por lavado, componentes que son conducidos hacia las capas internas del suelo contaminando las fuentes hídricas, muchas de consumo humano y otras con gran contenido y actividad biológica. La acumulación de esos nitratos y nitritos en el agua tiene, cuando sobrepasa los niveles de tolerancia admitidos y permisibles, serias consecuencias sobre la salud humana y ambiental. El nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) es por sus características y propiedades un compuesto químico formado básicamente por nitrógeno y oxígeno, que se encuentra de forma natural en el suelo y el agua, por lo que resulta ser un nutrimento fundamental para muchos seres vivos. El problema

surge con el aumento desmedido de su concentración por el aporte de los fertilizantes sintéticos empleados y efluentes generados en las actividades agropecuarias. Con el paso del tiempo, y debido principalmente a la acción biológica promovida por algunas bacterias, los nitratos generados por los fertilizantes evolucionan a nitritos como se explicará más adelante, iones considerados todavía mucho más tóxicos.

No cabe la menor duda en reconocer que la principal consecuencia inducida por la adición de un exceso de nitratos y nitritos en el medio acuoso, caracterizada por la contaminación de las aguas que se da en todos los niveles, puede distinguirse por las siguientes consideraciones:

- a) Las características fisicoquímicas y microbiológicas de los suelos influyen de manera determinante sobre la capacidad y velocidad de retención, movilización, transporte y concentración de esos compuestos; lo cual viene determinado por su textura (arenosa-arcillosa), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), nivel de agregación, cobertura vegetal, contenido de materia orgánica, índice de pH, relación C/N, cobertura vegetal existente, grado de pendiente del terreno, entre otros.
- b) El exceso de nitratos y nitritos contenidos en el agua subterránea tiene su principal origen en las filtraciones profundas que se producen cuando el agua de lluvia o la proveída por el sistema de regadío movilizan, favorecidos por la textura (gruesa-arenosa-arcillosa), hacia los horizontes internos del perfil del suelo.
- c) El riesgo de contaminación es significativamente mayor cuando se emplean sistemas de riego por superficie (gravedad) y aspersión, mientras que es mínimo cuando el agua se aplica localizada y regulada mediante sistemas de riego por goteo. En las aguas freáticas el nitrato provoca contaminación.
- d) La contaminación de las fuentes acuíferas superficiales se produce muchas veces como consecuencia del arrastre de los nitratos disueltos en el agua, y también, por la procedente de los horizontes subterráneos del suelo, las cuales se juntan e integran luego en fuentes de mayor caudal (riachuelos, ríos, lagos, etc.).
- e) Las consecuencias de esos nitratos pueden tener resultados ambientales tan serios como son la de generar un exceso de crecimiento vegetal en el medio

y provocar la muerte de la fauna acuática a largo plazo. Está demostrado que el exceso de nitrato en las aguas potencia el crecimiento de las algas.

- f) La contaminación inducida por el exceso de nitritos en el agua puede provocar la afectación de la calidad de los alimentos, pues no se puede desconocer que con ella se riegan muchos cultivos. Por lo tanto, muchos vegetales de consumo humano pueden verse también seriamente afectados.
- g) Esos nitratos y nitritos contenidos en el agua pueden incidir de manera muy negativa en la salud de las personas; motivo por el cual, para evitar problemas, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece y recomienda un límite de 50 miligramos de nitrato por litro de agua. En estas cantidades, se debe considerar siempre el aporte de los fertilizantes nitrogenados incorporados a los cultivos, particularmente los formulados a base de nitratos; aunque los amoniacales también contribuyen.

La elevada concentración de  $\text{NO}_3^-$  presente en suelos y aguas vinculada con los procesos asociados a este componente, representan en la actualidad un problema de enorme interés a nivel mundial para la protección del recurso hídrico subterráneo de localidades rurales y urbanas, en donde el mismo es en muchos casos el único recurso que opera como fuente acuífera para consumo humano. Al problema trasciende también para el recurso hídrico superficial, en consideración de los graves problemas de eutrofización que pudieran generarse por el excesivo aporte de estos nutrientes a los ecosistemas acuáticos. Entiéndase por eutrofización, el *“Proceso natural y/o antropogénico que consiste en el enriquecimiento de las aguas con nutrientes, a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, de manera que la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno en las aguas profundas.”* (Wikipedia, 2021).

Las razones anteriores invocan y exhortan, por lo tanto, la imperiosa y obligada necesidad de complementar los programas de nutrición y fertilización de cultivos, con la adopción y ejecución de prácticas de manejo que potencien, racionalicen, eficienten y optimicen el uso del N. El reto que actualmente presenta la agricultura sostenible y sustentable en Costa Rica y, en particular la cañero-azucarera, es mejorar ostensiblemente los programas tecnológicos de los cultivos con

la adopción y utilización de los mejores recursos y técnicas de producción, lo que incluye redescubrir y conducir los principios microbiológicos que dominan el suelo, para su correcta y óptima utilización en la producción rentable y ecoeficiente de la caña de azúcar.

Por estos motivos, se procura por medio del presente documento abordar con alguna profundidad y detalle el tema de la nitrificación, las pérdidas de nitrógeno generadas por la lixiviación y los peligros de contaminación que se ciernen sobre las fuentes acuíferas con fuerte impacto ambiental y de salud pública, que surgen con el empleo sin control técnico de fertilizantes formulados a base de nitratos.

#### Nitrógeno: un nutrimento muy especial

Esa contundente y hasta temeraria aseveración preferencial por el N, lo hace ver como un nutrimento selectivo y casi exclusivo, lo cual resulta cierto y viene sustentado por argumentos y razonamientos técnico-económicos muy sólidos, como son entre otros, los siguientes:

- A. Función: la función del N es determinante e incuestionable en el accionar normal y comercial de las plantas, señalando Chaves (1999a) expresamente para la caña de azúcar entre otras, las siguientes: a) es determinante en el metabolismo general de los compuestos orgánicos de la planta, b) forma parte de numerosos compuestos como aminoácidos y proteínas, aminos, amidas, aminoazúcares, nucleótidos, purinas y pirimidinas, alcaloides, coenzimas, vitaminas y pigmentos, c) es un componente importante de la molécula de clorofila, d) forma parte de la estructura molecular de los ácidos nucleicos (ADN y ARN) y también de los citocromos, e) al formar parte de gran cantidad y calidad de compuestos, está implicado directamente en muchos de los procesos de crecimiento y desarrollo de la planta, f) mantiene una relación sinérgica particularmente especial con el potasio, favoreciendo o limitando su accionar dependiendo de la condición de equilibrio en que se encuentre, g) aumenta la longitud y el grosor de los tallos por lo que determina en buena parte los rendimientos agrícolas y h) aplicado tardíamente o en altas cantidades puede afectar negativamente la calidad de los jugos, reduciendo su pureza e incrementando el contenido de azúcares reductores (glucosa y fructuosa), lo que



consecuentemente disminuye la concentración de sacarosa en los jugos aumentando los de melaza.

- B. **Funcionabilidad:** por su función, la funcionabilidad del N expresada por el accionar físico, químico y biológico en el suelo y fisiológico y metabólico en la planta es muy especial y particular, debiendo por ello pasar por varios y complejos procesos de transformación para lograr su disponibilidad, absorción, transporte y asimilación por la planta. En su accionar el N sea indiferentemente originado a partir de fuentes orgánicas o sintéticas, sufre de diversos efectos sinérgicos y también antagónicos que definen su disponibilidad para la planta. Como anotara Chaves (2020b), *“Al descomponerse por acción de los microorganismos, el N queda libre en su forma amoniacal ( $NH_4^+$ ), la cual es rápidamente convertida a su forma nítrica ( $NO_3^-$ ) para ser absorbida; su aporte de N es apreciable. La materia orgánica contiene además otros nutrimentos primarios y secundarios como fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S) y micronutrimentos, los cuales son convertidos a sus formas asimilables a medida que el proceso de descomposición tiene lugar.”*
- C. **Formas químicas:** para que el N pueda estar disponible y accesible para ser asimilado y utilizado por las plantas, debe sufrir diversas y complejas transformaciones en el suelo, que lo disponen finalmente como iones amonio ( $NH_4^+$ ), amoníaco ( $NH_3$ ), nitrato ( $NO_3^-$ ), nitrito ( $NO_2^-$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), óxido nítrico (NO) y hasta N molecular ( $N_2$ ), lo que eleva su potencial de sufrir pérdidas en grado variable pero siempre importante. Esa particularidad incrementa significativamente la posibilidad del elemento de perderse por gasificación hacia la atmósfera elevando los Gases de Efecto Invernadero (GEI) o por lixiviación en el suelo contaminando fuentes acuíferas y el recurso hídrico en general.
- D. **Absorción:** en lo específico el nitrógeno es absorbido por las plantas en su forma química amoniacal ( $NH_4^+$ ) y también preferiblemente como nitrato ( $NO_3^-$ ). Se ha encontrado que la caña de azúcar tiene especial avidez y selectividad por los segundos, como lo señalara Chaves (1999b, 2021abcde). La urea ( $CH_4N_2O$ ) es otra fuente nitrogenada muy importante y utilizada por sus bondades y atributos en sistemas productivos, con posibilidad de uso foliar y al suelo.
- E. **Sensibilidad:** el elemento por su naturaleza y características químicas es altamente sensible a las condiciones del medio,

por lo cual mantiene activos y es intervenido en su accionar por una serie de factores y elementos de índole biótico y abiótico que determinan, maximizan y optimizan su eficiencia, su rentabilidad y su grado de aprovechamiento productivo agroindustrial. Cabe reconocer, sin embargo, que esos mismos factores y elementos del entorno, pueden en discordia actuar y operar de forma contraria y favorecer las pérdidas del nutrimento favoreciendo la contaminación por diferentes vías.

- F. **Interferencia:** el contenido y la expresión del N en la planta esta intervenida por varios factores edafoclimáticos, genéticos y de manejo agronómico, como son entre otros: a) las condiciones climatológicas prevalecientes en el lugar (agua, luz, temperatura, radiación solar, viento), b) el orden taxonómico del suelo que define sus características físicas (textura) y químicas (materia orgánica, contenidos nutricionales, N), c) el contenido de humedad presente en el suelo y el tejido de la planta, d) la variedad cultivada, e) la condición fitosanitaria general de la plantación, f) el manejo agronómico (anterior y actual) prestado a la plantación, referido principalmente a nutrición, enclavado, quema y uso de residuos biomásicos, g) uso y presencia de agroquímicos, h) sección de la planta muestreada y i) edad del tejido analizada.
- G. **Cantidad aplicada:** las dosis de N incorporadas en el cultivo de la caña de azúcar el país es en general consideradas como elevadas, lo que opera procurando complementar y equilibrar los contenidos presentes en el suelo y retribuir a su vez, las necesidades que la planta tiene para satisfacer sus necesidades fisiológicas y metabólicas asociadas a la producción de biomasa y producto comercial deseado. Estimo Chaves (2021d) en su estudio, que la caña planta de primer ciclo incorpora en promedio de acuerdo con las estimaciones nacionales más N, en dosis de 136,4 kg/ha, respecto a la de soca o retoño (120,9 kg). La media nacional fue estimada en este caso en 134,7 kg de N/ha. De igual manera, se encontró en dicho estudio que los Ingenios adicionan en promedio significativamente más N (138 kg) respecto a los Productores Independientes (111,7 kg). Las dosis más altas de N (210-287 kg/ha) se ubicaron en plantaciones de ciclo bianual (18-24 meses) situadas en la zona alta (>1.000 msnm) de los cantones de Turrialba, Jiménez (Juan Viñas), Alvarado y Paraíso; mientras que fue la Zona Norte la región que en promedio menores

cantidades de N (86,3 kg/ha) reporta en el país, seguida por el Valle Central (100,6 kg). La variación es alta en todos los sentidos (geográfica, sectorial, ciclo vegetativo, variedad cultivada, estructura de tenencia, capital invertido, etc.) lo que obliga generar interpretaciones puntuales evitando las inconvenientes y sesgadas generalizaciones.

- H. **Oferta comercial:** en consideración de la importancia, relevancia y trascendencia que el N posee como factor incuestionable de la producción, la industria agroquímica mundial ha desarrollado tecnologías plasmadas en nuevos productos de uso comercial a base de urea, amonio, nitratos, sulfatos asociados con cationes importantes como K, Ca, Mg, Zn y Na y aniones como S y B, entre otros (Cuadro 1). El fertilizante nítrico es en este sentido un producto muy soluble en agua que no es retenido por el complejo de cambio del suelo, lo que favorece y permite que descienda por arrastre, lavado, infiltración, lixiviación (desplazamiento de sustancias solubles o dispersables (arcilla, sales, hierro, nitrógeno, humus) ocasionado por el movimiento descendente del agua en el suelo, y es, por ello, característico de climas húmedos y sistemas irrigados) y percolación concebido por el paso lento del agua a través de materiales porosos a capas profundas del terreno arrastrado por el agua.
- I. **Efecto productivo:** la bondad del N es precisamente virtud de sus características intervenir de manera positiva, determinante y concluyente, cuando es bien utilizado, sobre la productividad de los cultivos agrícolas; lo cual, sin embargo, se torna contraproducente y negativo cuando su empleo resulta incorrecto. En el caso de la caña de azúcar y actuando en esa misma dirección, la adición de N al suelo se traduce cuando se adiciona correctamente en incrementos significativos en las toneladas (t) de materia prima (caña) cosechadas, la concentración de sacarosa contenida en sus tallos (kg/t) y el azúcar que se produzca por unidad de área (t/ha). El beneficio de N es incuestionable.
- J. **Costo relacionado:** no cabe la menor duda que el valor económico que la fertilización y en particular el elemento N tienen en la estructura general de costos es muy significativa, no solo por su valor unitario, sino también por las cantidades adicionadas; motivo por el cual, cualquier esfuerzo en procura de lograr su optimización resulta trascendente en la rentabilidad final del emprendimiento agro productivo. Como señalara Chaves (2021d) en

referencia expresa y directa al tópico, *“El costo implicado y vinculado con la aplicación de fertilizantes minerales en la caña de azúcar es alto y significativo, [-] al ubicarlos en el ámbito nacional en un promedio de 19,3% (13,2% sin considerar la corrección de acidez) en ciclo planta y 13% en el ciclo soca; valor que se concentra fuertemente en el fertilizante nitrogenado.”*

### Nitratos y nitritos

Las plantas y los animales requieren nitrógeno y otros nutrientes esenciales para desarrollar y completar con normalidad sus actividades vitales básicas y fundamentales; lo cual, pese a reconocer que el N es un gas abundante en la atmósfera ( $\approx 78\%$ ), resulta cierto que no todo puede ser absorbido directamente en su forma molecular como  $N_2$ ; motivo por el cual, primero debe ser transformado y convertido en varios compuestos para poder ser absorbido, asimilado y utilizado por las plantas y los animales. Este complejo proceso se conoce como Ciclo del Nitrógeno (Chaves 2021e). El nitrato es un compuesto de nitrógeno que se forma en el agua residual al convertirse el amonio en nitrato a través del nitrito, generados en el proceso conocido como nitrificación. Químicamente los nitratos son sales que se producen cuando a nivel industrial el ácido nítrico se combina con una base (Figura 1).

El nitrato y el nitrito son entre otros, dos de los compuestos nitrogenados que son usados por la biota del suelo, que eventualmente pueden bajo ciertas circunstancias particulares, ser devueltos a la atmósfera en forma de gas como lo anotara Chaves (2021e). El nitrato es un componente muy común que cuenta sin embargo con un importante potencial contaminante, que se encuentra por lo general en los alimentos y en el agua subterránea, el cual puede provocar efectos nocivos si se consume en altas concentraciones. El nitrato es inodoro e incoloro. Debe indicarse que las bajas concentraciones de nitrato son normales, pero la presencia de altas cantidades puede contaminar en grado variable las fuentes de agua potable de consumo humano.

En la naturaleza y en la agricultura, las plantas utilizan el nitrato como un elemento nutritivo esencial sin el cual su potencial genético y productivo puede difícilmente ser maximizado y aprovechado. En el comercio, por su parte, la mayor cantidad

del nitrato se formula y emplea en los abonos inorgánicos. Los nitratos pueden producirse en el entorno natural por la descomposición de proteínas, por ejemplo. Es de igual manera conocido, que el nitrato y el nitrito también se utilizan en la industria alimentaria para la conservación y preservación de alimentos, como componentes en algunos medicamentos y en la manufactura de municiones y explosivos; lo cual demuestra la diversidad de destinos utilitarios que tienen.

No todo el problema ambiental y de salud pública surgido con los nitratos es exclusivo y atribuible al uso de fertilizantes en la agricultura, como muchas veces de manera calculada y hasta malintencionada se plantea; esto por cuanto está comprobado que existen otras fuentes importantes de contaminación orgánica donde el nitrato tiene presencia, como acontece con los pozos sépticos para almacenamiento de efluentes cloacales de viviendas, residuos de establecimientos de cría de cerdos, vacunos, aves, etc., cuya presencia también se asocia a la contaminación del recurso hídrico subterráneo. El problema puede darse en este caso por causa del escurrimiento superficial provocado por la precipitación en intensidades importantes, o también por el desborde de lagunas de retención de efluentes. Lo anterior no exime en absoluto el importante aporte que los fertilizantes nitrogenados tienen en esa ecuación.

La gran mayoría de fuentes nitrogenadas formuladas industrialmente para uso agropecuario se basan en amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) de origen sintético, lo cual no exime que existan otras fuentes alternativas como el nitrato de potasio y de sodio, mejor conocidos como salitre de Chile, que son compuestos químicos naturales que contienen nitrógeno, oxígeno, potasio y sodio en su estructura, como lo indica el Cuadro 1. En los nitratos, el nitrógeno está unido a tres átomos de oxígeno, mientras que, en los nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), el nitrógeno está unido a dos átomos de oxígeno. Queda claro que el nitrato y el nitrito son dos de los compuestos nitrogenados que son empleados por las plantas y los animales, los cuales eventualmente devuelven parte del nitrógeno en forma de gas al aire y otros compuestos (orina) al suelo. En el caso de los seres humanos, se tiene que el nitrato y el nitrito pueden ser producidos naturalmente por el mismo cuerpo como parte de su metabolismo.

### Fuentes nitrogenadas nítricas

El tema de las fuentes comerciales disponibles para adicionar el fertilizante nitrogenado siempre resulta de enorme interés y relevancia, por la implicación pragmática que tiene para el agricultor. Esto por cuanto el resultado investigativo y la industria tecnológica pueden proponer y recomendar opciones químicas teóricamente muy interesantes, sin embargo, muchas veces la realidad comercial del campo resulta muy diferente, debido a la indisponibilidad y acceso a las mismas en el lugar o al elevado costo asociado que tornan la opción inviable de adquirir y utilizar.

El nitrógeno como elemento esencial y primordial de cualquier programa de nutrición y fertilización, ha tenido el favor de la industria manifestado en la capacidad de desarrollar una importante cantidad y diversidad de opciones químicas con enfoque y alcance comercial variable, que habilitan y posibilitan al agricultor poder atender las necesidades particulares de los cultivos con mucha especificidad. Las opciones nitrogenadas existentes en el comercio permiten diseñar y formular programas de nutrición con enfoques diferentes, afines a las condiciones del lugar y las necesidades del cultivo de acuerdo con su estado fisiológico.

La cantidad de opciones comerciales granulares existente es importante y de propiedades químicas y nutricionales muy diferentes en cuanto a:

- Forma química de N presente, sea como urea ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ).
- Nutrimiento complementario acompañante: fosfato, potasio, calcio, magnesio, sulfato, sodio, zinc, boro, cloro, entre otros.
- Proporción porcentual (%N) de la fuente nitrogenada empleada y el ión (catión-anión) acompañante en la formulación.
- Dinámica fisicoquímica y actividad fisiológica de la fuente en el suelo y la planta.
- Velocidad de absorción y asimilación por la planta.
- Disposición y potencial de pérdida en el medio por gasificación y lixiviación.
- Potencial de afectación y daño ambiental.
- Impacto sobre la productividad agroindustrial y calidad del producto final.

La Figura 1 expone con algún grado de detalle un diagrama de flujo mostrando la conversión de amoníaco y amonio en diferentes fertilizantes nitrogenados de amplio uso comercial, lo que demuestra la gran versatilidad y variabilidad que el N posee; así como la diversidad de formulaciones químicas comerciales granulares y líquidas, generadas por la industria de los fertilizantes a partir de  $NH_3$ , en asocio con otros componentes complementarios. Como se infiere, la cantidad y variabilidad de opciones es muy alta lo que permite acondicionar las mismas a las características y propiedades particulares del entorno agro productivo, visualizando las diferencias en materia edáfica, climática, naturaleza y características del cultivo y plan de manejo agronómico previsto incorporar, lo que incluye obviamente la fertilización.

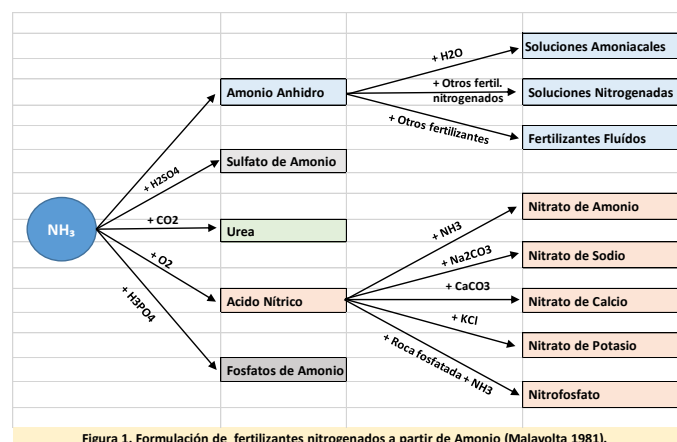


Figura 1. Formulación de fertilizantes nitrogenados a partir de Amonio (Malavolta 1981).

Con el fin de ubicar y contextualizar mejor lo concerniente específicamente al uso de nitratos, se presenta en el Cuadro 1 un detalle de 15 formulaciones comerciales de fertilizante granular, elaboradas empleando particularmente esa fuente nitrogenada. La cantidad y variabilidad de opciones es alta, lo que posibilita aplicaciones de N ajustadas a las condiciones y necesidades particulares de la unidad productiva, tomando en consideración entre otros factores, elementos determinantes, como: taxonomía del suelo, tipo de textura (arenosa, limosa, arcillosa), condiciones de clima del lugar (lluvia, temperatura, radiación, viento, evapotranspiración, etc.), grado (%) de pendiente del terreno, cobertura vegetal existente, contenido de materia orgánica, relación C/N, grado de acidez presente, nivel de fertilidad actual, antecedentes de fertilización incorporada con anterioridad en particular vinculada al N, grado de mecanización, plan de manejo agronómico previsto

desarrollar, cultivo y variedad sembrada, época del año, número de cosechas y edad (meses) a cosecha en el caso particular de la caña de azúcar, expectativa de producción y disposición a invertir, entre otros.

Cuadro 1. Fertilizantes nitrogenados (15) formulados conteniendo Nitratos.				
Producto	Fórmula	Contenido total N (%)	Contenido % $NO_3$	Equivalente a Acidez *
Nitrato de Amonio	$NH_4NO_3$	33,5	16,7	-535
Nitrosulfato de Amonio	$NH_4NO_3, (NH_4)2SO_4$	26 - 30	6,5	
Nitrato Amonio Calcáreo**	$NH_4NO_3 (*CaCO_3)$	20 - 22	11	0
Nitrato de Potasio	$KNO_3$	13	13	+236
Nitrato de Calcio	$Ca(NO_3)_2$	15-19	14,4	+181
Nitrocalcio		26	14,2	-280
Nitrato de Magnesio	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	9-11	9-11	
Nitrato de Sodio ***	$NaNO_3$	16	16	+263
Nitrato de Sodio y Potasio ***		15	15	+249
Nitrato de Zinc	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	18	18	
Nitraboro		20	10	
Urea-Nitrato de Amonio	$CO(NH_2)_2, NH_4NO_3$	28 - 32		
Nitrofosfatos		14 - 22		-181
Sulfonitrato de Amonio	$(NH_4)2SO_4, NH_4NO_3$	26		-770
Nitrosulfocalcico		27		-353

Fuente: Elaborado por el autor con base en información de Bertsch (1998); Meléndez y Molina (2003); Malavolta (1979, 1981).

\* kg  $CaCO_3$ /ha requeridos para compensar la acidificación del suelo causada por una tonelada de fertilizante: (-) calcario necesario para neutralizar 1 ton de fertilizante; (+) cantidad de cal equivalente a 1 ton de fertilizante.

\*\* Magnesamón o Nitramón.

\*\*\* Salitre de Chile.

Por lo general, al menos en el caso particular de la caña de azúcar en Costa Rica, es común que se utilicen fuentes mixtas de N formuladas a base de  $NH_4^+$  y  $NO_3^-$ , lo que evita la prevalencia y dominio de una en específico. La urea (45-46% N) y el nitrato de amonio (33,5% N) son las de mayor uso.

### ¿Qué es y en que consiste la Nitrificación?

Este importante proceso forma parte del ciclo natural del nitrógeno y corresponde a la formación de nitratos a partir de sustancias que contienen N en su forma reducida. El mismo inicia con la mineralización del  $NH_4^+$  presente en el medio en formas orgánicas (aminas), como también el incorporado con los fertilizantes mediante productos de síntesis industrial, y que, por procesos con una importante intervención biológica bacteriana se convierte en  $NO_3^-$ . Por sus consecuencias ambientales negativas, es relevante señalar que la energía metabólica requerida por los organismos autótrofos para operar el proceso es aportada por el amonio existente en el medio; además de la procedente de las sales inorgánicas simples y del carbono del  $CO_2$  atmosférico (Chaves, 1999a).

La nitrificación de acuerdo con lo manifestado por Chaves (2020b), “Comprende la transformación del N hasta llevarlo a la forma química de nitratos, donde el  $\text{NH}_4^+$  es mineralizado a partir de las formas orgánicas, así como también involucra al  $\text{NH}_4^+$  que es incorporado al suelo con los fertilizantes, el cual es transformado en  $\text{NO}_3^-$  por medio de bacterias nitrificantes. En este caso el  $\text{NH}_4^+$  sirve también como fuente energética para operar esa acción microbial, ejecutada por organismos autotróficos que obtienen su energía a partir de la oxidación de sales inorgánicas simples y del carbono del  $\text{CO}_2$  atmosférico. La Nitrificación se realiza en dos fases simultáneas con velocidades similares. En la primera fase el ion  $\text{NH}_4^+$  es convertido en nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), principalmente por las bacterias *Nitrosomonas*, para que luego ese  $\text{NO}_2^-$  sea transformado en  $\text{NO}_3^-$  por bacterias del género *Nitrobacter*. Debe tenerse presente que la fuente nítrica es altamente soluble y susceptible de perderse con facilidad en el suelo, lo que aplica y tiene alcance para los fertilizantes comerciales. En estas reacciones el grado de aireación presente y la cantidad de amonio producida controlan la nitrificación de manera apreciable. En el proceso hay producción también de iones  $\text{H}^+$  que contribuye a modificar la acidez del medio y reducir el valor de pH del suelo y con ello la actividad de las bacterias involucradas, la cual será acentuada si el pH cayera por debajo de 5,5.”

Anotan Epstein y Bloom (2006) en relación con la acidez del medio, que “El pH óptimo para absorción de  $\text{NO}_3^-$  por las raíces esta generalmente debajo de 6, presumiblemente debido a la mayor disponibilidad de  $\text{H}^+$  para co-transporte.”

La Figura 2 expone con detalle las reacciones involucradas en la formación de nitratos y nitritos en el suelo:

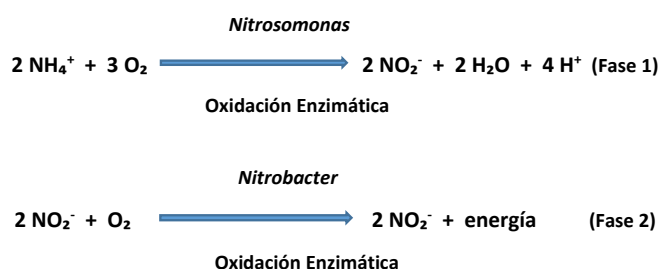


Figura 2. Fases del proceso de Nitrificación en el suelo.

Queda claro a partir de esa información, que la concentración inicial de  $\text{NH}_4^+$  es la que determina y controla el proceso de

transformación química conformado por dos fases sucesivas y continuas; el cual es por naturaleza aeróbico, lo que obliga a contar para que sea dinámico y completo, con un ambiente de buena aireación y oxigenación que evite los problemas de encharcamiento, mal drenaje y baja lixiviación, pues ello dará lugar a que ocurra la indeseable desnitrificación y pérdida de N a la atmósfera contribuyendo al incremento de los Gases con Efecto Invernadero (GEI), como lo expusiera Chaves (2021e) con gran detalle. Como se infiere de dicha reacción, la nitrificación es generadora de acidez ( $\text{H}^+$ ) que induce la reducción del pH afectando la actividad microbial en detrimento de este y otros procesos biológicos acontecidos en el suelo (Chaves, 2021c); efecto que se agrava con el empleo continuo acidificante de esta fuente.

Como fenómeno microbiológico, la primera fase de la nitrificación conocida como nitrificación es operada por bacterias de los géneros *Nitrosomonas*, *Nitrosolobus*, *Nitrospira* y *Nitrosococcus*, organismos autotróficos aeróbicos que utilizan la energía liberada por la oxidación del amonio. En el segundo paso también denominado nitratación, interviene *Nitrobacter* que es también una bacteria autotrófica aeróbica que aprovecha en este caso la energía liberada en la oxidación de los nitritos. Los oxidantes de amonio y de nitratos operan en serie. Aseguran Mengel y Kirkby (2002) que “Tanto los oxidantes del amonio como los oxidantes del nitrito son obligadamente aeróbicos. En suelos inundados la oxidación del  $\text{NH}_4^+$  se ve restringida. Además, las bacterias nitrificantes prefieren un pH neutro o levemente ácido.” Un exceso de amonio puede en este caso, de acuerdo con Núñez (2013), inhibir la nitratación en mayor grado que la nitrificación, favoreciendo la acumulación de nitritos, lo cual resulta indeseable por su carácter fitotóxico y mayor susceptibilidad al pasar a formas gaseosas inestables en el suelo, propias de la desnitrificación.

En el proceso de desnitrificación, el  $\text{NO}_3^-$  es convertido a  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{N}_2$  como se observa en la reacción adjunta a través de microorganismos desnitrificantes, que tienen la capacidad de tomar el  $\text{NO}_3^-$  o  $\text{NO}_2^-$  como fuentes aceptores de electrones en lugar del  $\text{O}_2$  del aire, siempre que esté presente una fuente de carbono orgánico como fuente proveedora de electrones. Este proceso se ve favorecido cuando el suelo se encuentra en condición de saturación, debido a que el transporte de oxígeno se ve muy limitado.

**2 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> → 2 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> → 2 NO → 2 N<sub>2</sub>O → N<sub>2</sub>**

Como resultante de los procesos de conversión biológica vinculados, el NO<sub>3</sub><sup>-</sup> se constituye por su magnitud en el compuesto mayoritario en suelos agrícolas, siendo una fuente de N fácilmente absorbida por las plantas en su fase de crecimiento activo. Los microorganismos del suelo absorben e incorporan los productos de conversión (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en sus estructuras vitales a través del proceso de inmovilización, el cual comprende el paso de formas inorgánicas de N a formas orgánicas del tejido microbiano. Este proceso ocurre en el tanto existan fuentes de carbono fácilmente aprovechables.

De acuerdo con la literatura especializada en el tema, se considera que cuando el proceso de nitrificación no presenta condiciones adversas que lo limiten, el paso de nitrito a nitrato (NO<sub>2</sub><sup>-</sup> → NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) es muy rápido y dinámico, evitando que los nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) se acumulen en el suelo; pese a lo cual se han revelado posibles evidencias de retención en suelos alcalinos con pH>7. Como se comentará más adelante, se atribuyen a los nitritos graves problemas de toxicidad que afectan plantas, animales y la salud de las personas.

En relación con este compuesto, expresan Epstein y Bloom (2006), que *“El nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) es un ión altamente reactivo, potencialmente tóxico. Células vegetales transportan inmediatamente el NO<sub>2</sub><sup>-</sup> generado durante la reducción de nitrato del citosol para los cloroplastos en las hojas y plastidios en las raíces. En esas organelas, la enzima reductasa de nitrito reduce NO<sub>2</sub><sup>-</sup> a NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.”* Amplían los mismos autores señalando, que *“En la mayoría de las especies de plantas, tanto las raíces como la parte aérea tienen la capacidad de asimilar de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a NO<sub>2</sub><sup>-</sup> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. La intensidad relativa con que la reducción de nitrato ocurre en las raíces o en las hojas depende de varios factores, incluyendo el nivel de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> proporcionado a las raíces y las especies de plantas.”*

Para que el N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pueda ser asimilado y metabolizado por la planta luego de sufrir las transformaciones señaladas, debe en primera instancia, pese a ser la fuente nitrogenada más absorbida por la caña de azúcar, ser reducido a su forma amoniacal dentro de la planta propiamente en el citoplasma de la célula, lo que es promovido por las enzimas Reductasa del Nitrato y Reductasa del Nitrito. En este sentido la urea

(CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) y el amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) ingresan de forma directa a la planta sin requerir de esa acción enzimática (Chaves, 1999a).

Aseguran Epstein y Bloom (2006) que, *“El rendimiento de la planta-sea su aptitud, producción, eficiencia nutricional o susceptibilidad al estrés biológico o ambiental- generalmente depende de su habilidad en obtener NH<sub>4</sub><sup>+</sup> o NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.”*

Se ha encontrado que hay factores ambientales que pueden modificar la tasa y velocidad de nitrificación en el suelo, como son entre otras: los suelos ácidos de pH bajo, las condiciones de inundación la restringen e inhiben significativamente, así como también en condiciones de suelos muy secos. La temperatura tiene un efecto marcado, logrando la nitrificación su óptimo a 26°C, lo que para la amonificación puede ser de acuerdo con los resultados reportados por Beck (1983) citado por Mengel y Kirkby (2001) tan alto como 50°C, diferencia debida presuntamente a la distribución del amonio y el nitrato en el suelo.

A manera de resumen pueden ubicarse genéricamente como posibles destinos potenciales de los nitratos existentes y disponibles en el suelo, los siguientes:

- Ser absorbido por las raíces y metabolizado por la planta.
- Ser lixiviado, arrastrado y/o drenado a capas (horizontes) internas del suelo, perdiéndose por esa causa.
- Ser utilizado como fuente energética por parte de los microorganismos del suelo.
- Ser reducido (gasificado) a compuestos volátiles (NO<sub>x</sub>) y perdido por medio del proceso de la desnitrificación.

No puede ni debe desconocerse en el caso particular de la caña de azúcar, que la planta dotada de características anatómicas, fisiológicas y genéticas excepcionales como lo demostrara Chaves (2020a), cuenta con el ventajoso atributo estructural de poseer un sistema de raíces profuso dotado de una gran capacidad de desarrollo en masa y profundidad, que le permiten movilizarse espacialmente en sentido horizontal y vertical cubriendo un área potencial de absorción muy amplia y significativa; lo cual se evidencia y expresa por su reconocido poder de extracción de agua y nutrimentos. La caña de azúcar crece y desarrolla en condiciones donde otras no subsisten.

En torno al tema, apunta Núñez (2013) que las condiciones más favorables para la nitrificación son:

*“Reacción del suelo.- Existe un amplio margen de pH para que la nitrificación se lleve a cabo, abarcando valores desde 5,5 hasta 10; sin embargo, el pH óptimo está alrededor de 8,5.*

*Aireación del suelo.- Tratándose de que los organismos responsables son aeróbicos y las reacciones son fundamentalmente de oxidación, se requiere de oxígeno disponible para su realización. Su concentración óptima en la fase gaseosa del suelo es del 20%. Debe tenerse en mente, sin embargo, que el suelo no es un medio homogéneo, sino que pueden presentarse microsítios, especialmente cercanos a poros, donde puede estar realizando la nitrificación, mientras que en el centro de los agregados pueden continuar condiciones de reducción.*

*Población de organismos nitrificantes.- Normalmente estos organismos están presentes en el suelo (excepto en los suelos inundados), dependiendo su actividad de las condiciones del medio.*

*Temperatura.- Tratándose de reacciones microbiológicas, su velocidad está directamente influenciada por la temperatura, con un óptimo entre 27 y 35°C. Chandra (1962) en 24 días de incubación encontró una nitrificación de 100% del amonio agregado al suelo, cuando la temperatura fue de 27°C. El porcentaje de nitrificación descendió a 59 y 29% cuando las temperaturas fueron de 16 y 5°C, respectivamente.*

*Humedad.- Parker y Larson (1962) encontraron reducción en la nitrificación a esfuerzos de humedad inferiores a 0,05 atmósferas. Izaguirre y Fernández (1963) encontraron también abatimientos en la nitrificación al descender la humedad del suelo de capacidad de campo (cc) a punto de marchitamiento permanente (pmp).*

*Disponibilidad de nutrimentos.- Se requiere de suficiente amonio como sustrato, así como de calcio, de fósforo y de otros nutrimentos demandados por los microorganismos responsables.”*

### Lixiviación de nitratos

En torno a este tópico tan específico y determinante en el asunto aquí abordado, debe reconocerse el suelo operando como un sistema natural muy activo que está sometido a padecer de interacciones muy dinámicas con la atmósfera y con los estratos sub superficiales, los cuales influyen de manera

concluyente sobre las condiciones del clima y también sobre el ciclo hidrológico global; sirviendo adicionalmente como sustrato para el crecimiento y desarrollo de una gran variedad y diversidad de organismos vivos (biota). Además, desempeña un rol ambiental muy importante como reactor bio-fisicoquímico, mineralizando y descomponiendo residuos orgánicos que son luego reciclados en nutrientes para la regeneración continua de la vida en la tierra.

El suelo que forma parte de la denominada zona no saturada (espacio de poros ocupado por al menos dos fases, aire y agua), constituye una sección extremadamente compleja, compuesta por una mezcla variable y heterogénea de material sólido (partículas minerales de composición química, tamaño, forma y orientación variable, y por sustancias amorfas como la materia orgánica), líquido (agua en el suelo) y gaseoso (atmósfera del suelo) en proporciones variables, en la cual el área interfacial por unidad de volumen puede ser muy alta (Figura 3). La naturaleza dispersa del suelo y, en consecuencia, su actividad variable, determinan la presencia de efectos importantes como son la adsorción de agua y otras sustancias químicas, el intercambio iónico, la capilaridad, la expansión y contracción de las arcillas (montmorrillonitas en Vertisoles), entre otros. En asocio y complemento con los materiales inertes, el suelo está habitado por una gran diversidad de comunidades de organismos vivos.



**Figura 3. Suelos de textura gruesa (arenosa) y fina (arcillosa) con infiltración diferencial.**

La dinámica y facilidad de movimiento natural que poseen los nitratos en el suelo ha generado y es motivo, como ya se indicó, de grandes preocupaciones en materia ambiental, debido a que los mismos constituyen fuentes potenciales y reales de contaminación puntual y difusa de suelos y aguas. Esta turbación surge como resultado y producto de la acumulación del compuesto por el uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados, y también, vale mencionarlo, por las deyecciones

de los animales y del recorrido no controlado de efluentes, procedentes principalmente de la actividad pecuaria.

La experiencia investigativa y pragmática de campo han demostrado que la presencia y detección de grandes pérdidas de nitrógeno en el caso de los suelos que han sido fertilizados con fuentes nitrogenadas, principalmente nítricas, ocurren principalmente por lixiviación; aunque también por escorrentía superficial, la cual está directamente asociada con eventos de alta precipitación o alta intensidad y frecuencia en el caso del riego. El agua del suelo se encuentra bajo la influencia de la fuerza de gravedad que ocasiona su movimiento vertical hacia las capas más profundas. En el suelo, el  $\text{NO}_3^-$  sigue el movimiento del agua, pero migra también por difusión. En torno a tipos de suelo, se ha encontrado que los de textura y granulometría fina (arcillosos) presentan condiciones particulares que impactan en el flujo de agua y el movimiento de solutos. La generación de grietas originadas por la alternancia de períodos de humedecimiento/secado (típico de los suelos del orden Vertisol), crean caminos de flujo secundarios que facilitan el transporte de agua y los solutos a través de los macroporos. Esta evidenciado, asimismo, que los ciclos de secado y humedecimiento representan un factor importante y determinante en las tasas de mineralización y nitrificación de los compuestos de N que se acumulan en el suelo, donde el  $\text{NO}_3^-$  adquiere su mayor concentración. No puede desconocerse que el movimiento del agua en el suelo, conteniendo nitratos, tiene también un importante movimiento ascendente promovido por la evaporación y la transpiración de las plantas, sobre todo en épocas secas; el cual es mayor en suelos de textura arcillosa.

Los excesos de nitrato contenidos en el suelo son muy susceptibles a sufrir lixiviación, proceso que se ve favorecido por su afinidad con el agua y su baja tasa de adsorción en las partículas sólidas del suelo por su carga negativa común. En este mecanismo la absorción de los nitratos las plantas tienen un efecto importante y determinante en el proceso. El laboreo intensivo, continuo y excesivo de los suelos puede, por el contrario, cuando estos son vulnerables, generar erosión que promueve y favorece la pérdida de nutrimentos.

En el caso de los suelos de granulometría gruesa como son los de textura arenosa, la situación es aún más limitante ya que la migración de nitratos es en este caso muy superior debido a

contar con un mayor espacio poroso, con macroporos que se constituyen en vías preferenciales que facilitan el proceso de infiltración en suelos con esa granulometría. No cabe la menor duda que la dinámica de infiltración y los flujos de movimiento vertical de agua en un suelo arenoso son muy superiores con relación al arcilloso. El nitrato, acarreado con la solución del suelo sigue el gradiente hidráulico o toma rutas de flujo preferencial generadas por las grietas producidas por la contracción de las arcillas, pudiendo por ello profundizar con relativa mayor velocidad en horizontes profundos. La pérdida de N en forma de nitratos es muy diferente y variable según se trate de flujo saturado o no saturado de agua.

El sistema radical de las plantas desarrolla y mantiene en condiciones normales una activa y dinámica absorción de nutrientes, incluyendo los nitratos, llegando a agotar el contenido disponible en la rizósfera; lo cual es compensado y balanceado mediante difusión de nutrimentos de la solución circundante del suelo, pese a lo cual el movimiento del agua puede tener una dirección distinta. Como es sabido y esta constatado, ese movimiento depende de la estructura y la porosidad de este, del suministro de agua de lluvia y/o riego, del grado de drenaje y el grado de evapotranspiración que mantenga el sistema según la época del año.

En relación con el movimiento de los nitratos en el perfil del suelo, señala Bertsch (1998) al respecto, que los estudios sobre el tema revelan que sus contenidos fluctúan de manera estacional durante el año, lo que no sucede con el amonio; lo cual se da de la siguiente manera:

- A. Durante la estación seca el  $\text{NO}_3^-$  se acumula lentamente en la superficie arable del suelo por causa de los movimientos capilares ascendentes del agua por efecto de la transpiración y la evaporación.
- B. Se observa también una concentración mayor de  $\text{NO}_3^-$  aunque de corta duración al inicio de la estación lluviosa.
- C. Ocurre una rápida disminución durante el resto del periodo lluvioso.

Amplia, asimismo, que, con la llegada de la estación lluviosa, los nitratos descienden por el perfil del suelo a velocidad variable entre 0,5 y 5 mm por cada mm de lluvia precipitada en suelos de textura arenosa (gruesa). Mientras que en los suelos finos de textura arcillosa la pérdida es más lenta debido al limitado



espacio poroso existente, como también a la retención iónica que pueda darse por intercambio aniónico.

Con el objeto de evitar y superar los graves problemas de toxicidad y salud asociados con los nitratos y nitritos, la industria química agrícola moderna procura eliminar o al menos retardar su presencia en el medio por varias vías, con lo cual se lograrían varias e importantes ventajas, como son entre otras las siguientes:

- 1) Habría un aumento en la eficiencia del fertilizante comercial incorporado al suelo al reducir las pérdidas de N por causa de la lixiviación ( $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$ ) y la desnitrificación ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ).
- 2) El incremento en la eficiencia permitiría consecuentemente reducir la cantidad de N incorporada, con sendos e importantes ahorros económicos y bienvenidos beneficios ambientales.
- 3) No se generaría acidez que inhiba y afecte la actividad de los microorganismos y reacciones fisicoquímicas del suelo, evitando la insolubilización e indisponibilidad de nutrimentos importantes para la estabilidad planta. Por el contrario, la salud del suelo se vería en este caso muy beneficiada (Chaves 2021c).
- 4) Se viabiliza contar con una mayor cantidad de  $\text{NH}_4^+$  en el medio que podría ser potencialmente utilizada por las plantas.
- 5) Se lograría un importante ahorro de energía metabólica en la planta, al no tener que reducir y convertir en el interior de la planta el  $\text{NO}_3^-$  absorbido del suelo; la cual puede emplearse en otros procesos fisiológicos.
- 6) Se evita el lavado, transporte y deposición de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  en fuentes acuíferas favoreciendo la Eutrofización y el consecuente agotamiento del oxígeno disponible en el agua por causa de la sobrepoblación microbial. Se protegería y resguardaría de esta forma el valioso recurso hídrico de uso humano, agropecuario e industrial.
- 7) Podrían evitarse graves problemas asociados con la salud humana por afectación del metabolismo normal del cuerpo.

Con este objetivo se han desarrollado y perfeccionado recientemente por parte de la industria de los agroquímicos, productos inhibidores de la nitrificación buscando evitar y minimizar las pérdidas de N generadas por ese proceso. Dicha tecnología provoca la inhibición bloqueando la oxidación del  $\text{NH}_3$  a  $\text{NO}_2^-$  por la acción de varias especies de *Nitrosomonas*,

*Nitrosocystus* y *Nitrosospira*. Básicamente los inhibidores actúan bloqueando la acción microbiana del  $\text{N-NH}_4^+$  a  $\text{NO}_2^-$  evitando con ello la formación de nitratos; con lo cual se evita la salida de N del sistema por lixiviación o desnitrificación. En el Cuadro 2 se anotan algunos productos comerciales empleados en la inhibición de la nitrificación en el suelo.

**Cuadro 2. Principales inhibidores comerciales de nitrificación.**

Producto	Fórmula
Nitrapirina	2-cloro-6-[triclorometil] piridina = N-Serve
ST	2-sulfanilamida-triazol
Terrazol	5-etoxi-3-triclorometil- 1, 2, 4 tiadizol
AM	2-amino-4-cloro-6-trimetilpirimidina
$\text{KN}_3$	Azida potásica
	Amida 2,5-diclorofenil succinica
Diciandiamida	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N} - \text{C} - \text{NH} - \text{C} = \text{N} \\ \parallel \\ \text{NH} \end{array}$
Fuente: Mengel y Kirkby (2001).	

Mencionan Mengel y Kirkby (2001) hecho destacable, que “Recientemente se han encontrado inhibidores naturales como el *Neem* que se da en semillas de *Azadiracta indica* y *Karanjin* que está en las semillas, hojas y corteza de la *Pongamia glabra*. Estos inhibidores naturales pueden llegar a ser importantes en países subdesarrollados donde el coste de los agroquímicos es elevado.”

#### Toxicología, salud y afectación por nitratos

La literatura mundial reporta un inconveniente, pero estrecho vínculo y relación de los nitratos contenidos en los alimentos con la salud de la población, lo cual merece toda a atención y, sobre todo, la adopción de las medidas de prevención del caso; principalmente cuando el presunto origen de los males es atribuido a la agricultura y en particular al uso de los fertilizantes nitrogenados utilizados para su producción. El nitrato es un elemento normal contenido en las células de las plantas. Los nitratos en sí son relativamente poco tóxicos; sin embargo, su toxicidad viene determinada por su conversión a nitrito. Es conocido que todos ingerimos nitrato al comer alimentos e ingerir bebidas, entre ellas el agua; como también, que el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) contenido en el aire que respiramos, al ser absorbido por los pulmones, proporciona

nitrito en cantidades insignificantes en comparación con la contenida en los alimentos y el agua que consumimos.

El tema y la preocupación pasan sin embargo por la cantidad de nitrato digerida, asimilada y acumulada. El efecto se da mayoritariamente a través del consumo de verduras y hortalizas contaminadas; siendo menor en el caso de los granos. Como se anotó con anterioridad, el límite establecido por la OMS para el agua de consumo humano es de 50 mg de  $\text{NO}_3^-$ /litro. Es importante señalar que el cuerpo puede producir en condiciones normales nitratos (30-60 mg/día) como parte de su metabolismo natural, lo que puede incrementarse en el caso de padecer infecciones intestinales. Acontece que el nitrato es absorbido y conducido al torrente sanguíneo desde el intestino delgado, excretando la mayor parte de forma rápida (24-48 horas) con la orina, no existiendo acumulación alguna en el cuerpo. Se indica que cerca del 20% de todo el nitrato asimilado por el cuerpo es excretado por medio de la saliva y reducido parcialmente a nitrito en la boca, estimando valores de 5 mg de  $\text{NO}_2^-$ /día. De igual manera, el nitrato es excretado al estómago como parte de los jugos gástricos, pudiendo reducirse a nitrito por acción de las bacterias en cantidades variables. Se estima que es relativamente poco el nitrato que logra llegar al intestino grueso, donde puede ocurrir la reducción a nitrito y la desnitrificación.

La exposición a nitratos y nitritos puede darse por causas diversas, como son entre otras las siguientes:

- El nitrógeno existe en forma natural en los suelos, asociado a la materia orgánica y los minerales; motivo y circunstancia por la cual las formas de nitrógeno disponibles, incluso nitrato y nitrito, se encuentran presentes por lo general en bajas cantidades en los suelos, el agua, el aire y los productos agropecuarios.
- Consumo de verduras (especialmente apio, lechuga, remolacha y espinaca), frutas, carnes curadas, pescado, productos lácteos, cerveza y cereales; por lo que se encuentran en la dieta diaria.
- Contenido en algunas carnes y productos que utilizan el nitrato o nitrito de sodio como preservativo.
- Por naturaleza, el cuerpo es capaz de producir alguna cantidad de nitrato y nitrito en forma normal.
- Siempre se está expuesto a la posibilidad (consciente o no) de consumir agua procedente de pozos u otra que contiene

nitratos provenientes de fuentes tales como escorrentía de desechos, efluentes animales o fertilizantes.

- La liberación al suelo o al agua en vertederos puede contaminar las fuentes de agua potable y aumentar la incorporación por las plantas de consumo humano.

Queda claro que la simple presencia de nitratos y nitritos en el medio no implica necesariamente afectación a la salud o al ecosistema, pues forman parte de la naturaleza, lo cual viene determinado por otras causas asociadas de forma directa e indirecta. Es por ello importante señalar que la mayoría de la población no está expuesta a niveles altos de nitrato o nitrito que causen efectos adversos, sobre todo en Costa Rica, donde los controles son muy buenos y rigurosos.

La inhalación de nitrato o nitrito es improbable y no es materia de preocupación para la población general, aunque en algunas ocasiones se inhalan nitratos para aliviar el dolor de ataques de angina.

La preocupación que recae sobre la salud humana por causa de la ingestión de nitratos es debida, de acuerdo con la literatura, entre otras razones a que:

- Las plantas adquieren naturalmente nitratos y nitritos de la tierra en la que crecen; donde los nitratos forman parte de los depósitos minerales (rocas ígneas y volcánicas) naturales del suelo, mientras que los nitritos surgen de los microorganismos que descomponen los compuestos orgánicos y nitrogenados. La mayor preocupación se concentra, sin embargo, en el uso y mal uso de los fertilizantes sintéticos comerciales.
- La exposición a nitrato y nitrito ocurre principalmente a través de la ingestión de agua y alimentos que contienen esas sustancias químicas. El problema estriba en la presencia de concentraciones elevadas.
- Los nitritos contenidos en el agua que ingerimos y se alojan en el organismo, llegan a la sangre y pueden causar una alteración de la hemoglobina, reduciendo y dificultando la capacidad de fijación del oxígeno y su transporte por los tejidos.
- Efectos sobre la salud de los infantes y niños pequeños, debido a que el biberón preparado con agua cuya concentración sea mayor a 50 mg de  $\text{NO}_3^-$ /l, podría entrañar, eventualmente, un serio riesgo a su salud por

inducción de ataques de metahemoglobinemia infantil aguda; enfermedad conocida como “bebés azules”. Acontece que el nitrito transforma la oxihemoglobina portadora del oxígeno en la sangre a una forma de metahemoglobina inactiva, generando una coloración gris o azul en la piel. Este mal pareciera ser mayor cuando se utiliza “agua de pozo” rica en nitratos ( $> 100$  mg de  $\text{NO}_3^-/\text{l}$ ).

- e) La posibilidad de que el nitrito pueda reaccionar con algunos componentes alimenticios en el estómago y generar compuestos carcinógenos tales como las nitrosaminas (compuestos químicos cuya estructura química es  $\text{R}_1\text{N}-\text{N}=\text{O}$ ), provocando con ello cáncer, especialmente en ese órgano, aunque también en el hígado y el esófago.
- f) La preocupación de que el nitrato pueda incidir y provocar otras patologías como bocio al interferir la absorción de yodo; así como serias malformaciones durante el nacimiento y enfermedades cardíacas, lo cual no está tampoco del todo comprobado.
- g) La afección por nitratos presenta síntomas tales como caída de la presión sanguínea, aumento del ritmo cardíaco, dolores de cabeza, calambres abdominales y vómitos, entre otros.

Pese a todo lo anterior, debe mencionarse en contrapartida, que esas sales son utilizadas en muchos países con fines benéficos, considerándolas vitales para el control y prevención del botulismo. Es importante reconocer, que en un individuo sano los nitratos y nitritos son rápidamente absorbidos por el tracto gastrointestinal anulando y eliminando su potencial efecto perjudicial.

#### Afectación ambiental

No cabe la menor duda en reconocer que una de las mayores preocupaciones actuales de la humanidad con proyección futura basada en tendencias reales, se fundamenta además del problema alimentario y de salud pública, en los peligros de contaminación que se ciernen sobre los acuíferos y el recurso hídrico en general por causa de la contaminación con nitratos; la cual se ha constituido con tendencia creciente, en un serio problema generado principalmente por el uso masivo, excesivo e imprudente de fertilizantes nitrogenados y la explotación pecuaria operada sin una adecuada gestión administrativa, de regulación y de control técnico. El exceso de nitratos en el agua

genera problemas para el entorno y la biodiversidad afectada por esa contaminación.

El nitrato es muy soluble en agua y débilmente retenido por las partículas del suelo por afinidad aniónica de cargas (negativas); motivo por el cual mantiene una alta movilidad en el perfil, donde se desplaza con el flujo de agua y también por difusión. La evapotranspiración tiene igualmente una participación muy relevante en esa movilización por ascenso capilar.

Ante la insoslayable necesidad de producir los alimentos que el fuerte y desproporcionado crecimiento poblacional viene mostrando a nivel global, el empleo de los fertilizantes se ha constituido en una herramienta promotora de productividad, en particular los fertilizantes nitrogenados, los cuales constituyen la mejor fuente nutricional empleada en la producción agrícola. Como se ha reiteradamente señalado, las formas químicas más importantes en que se encuentra el N en la naturaleza son diversas en su forma química, sus propiedades y sus efectos, lo que incrementa la posibilidad de poder perderse por gasificación y lixiviación por diferentes mecanismos y formas químicas, como son: nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), óxido nítrico ( $\text{NO}$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y nitrógeno elemental ( $\text{N}_2$ ).

La situación se torna grave debido a la alta solubilidad y por ende facilidad de movilización y transporte de las sales de nitrato y nitrito, las cuales tienen la capacidad de disociarse completamente en el agua. Es así como las actividades agrarias desarrolladas sin planificación ni control pueden alterar el equilibrio del denominado “ciclo del nitrógeno”, mediante el uso desmedido de fertilizantes, causando, por un lado, la contaminación y eutrofización de las aguas debido a la carga excesiva de nutrientes, y, por otro, la acidificación y la formación de gases con efecto invernadero (GEI), debido a las emisiones gaseosas. Acontece que las bacterias presentes en el suelo y las plantas usan oxígeno para convertir el nitrito a un nitrato químicamente más estable, el que puede ser reconvertido nuevamente en nitrito por otras bacterias cuando hay escasez de oxígeno (Chaves, 2021e).

En la eutrofización favorecida y promovida por el aporte desproporcionado de nutrimentos (N y P) participan e intervienen diferentes procesos fisicoquímicos y microbiológicos, que promueven una rápida proliferación y

crecimiento de plantas y algas en el medio, provocando que el oxígeno presente en la masa de agua se torne limitante y agote rápidamente, sobre todo a nivel superficial. En el proceso se generan además sólidos sedimentables y restos orgánicos residuales que precipitan en el fondo, los cuales tienden a oxidarse rápidamente, contribuyendo y sumando también al agotamiento del oxígeno presente en la masa de agua. La escasez e insuficiencia de oxígeno favorece la fermentación anaeróbica de los compuestos orgánicos en los puntos de mayor acumulación de sedimentos. Esta actividad provoca la disminución del oxígeno disuelto provocando la muerte y desaparición de la vida acuática, el incremento de la turbidez del agua, el aumento del grado de sedimentación; como también afecta las características organolépticas del agua (olor, color, sabor).

En lo pragmático vinculado a la práctica del campo, es necesario conocer y tener presente para la adecuada manipulación y aplicación del N, que las plantas lo absorben en forma de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ , en donde por lo general el  $\text{NO}_3^-$  se encuentra contenido en mayores concentraciones en su movilización hacia las raíces; favoreciendo virtud de su elevada solubilidad su pérdida por lixiviación del agua, pudiendo con ello, llegar a contaminar las aguas subterráneas y/o superficiales.

#### Sugerencias y recomendaciones para evitar problemas con nitratos

A continuación, se proponen y sugieren algunas recomendaciones técnico-administrativas de corte pragmático, por medio de las cuales se procura favorecer el uso óptimo, eficiente, rentable, sostenible y ecoeficiente de los fertilizantes nitrogenados en la caña de azúcar. Las medidas que se anotan a continuación se consideran minimizan y mitigan las pérdidas y la contaminación provocada por nitratos, entre las cuales están las siguientes:

- 1) Los terrenos deben mantenerse siempre con alguna cobertura vegetal, evitando mantener largos periodos de "barbecho" (tierra de cultivo sin sembrar durante uno o varios ciclos vegetativos).
- 2) El laboreo de la tierra de cultivo debe reducirse al mínimo.
- 3) Terrenos con algún grado de pendiente importante (>8%) deben contar con medidas preventivas de contención que

reduzcan y minimicen las pérdidas por escorrentía y erosión.

- 4) Deben favorecerse y promoverse prácticas que vayan en favor de la formación, extensión y profundización de las raíces.
- 5) La exclusión de nitratos en la formulación del programa de fertilización comercial por aplicar no resulta una medida sensata y técnicamente razonable, considerando la avidéz y alta respuesta que la caña de azúcar y otros cultivos tienen a esa fuente nitrogenada. Es bueno buscar y complementar opciones que incorporen las tres fuentes habituales: urea, nitratos y amonio. La gestión debe estratégicamente orientarse a procurar su optimización y buen uso, nunca su eliminación.
- 6) Debido a que la producción de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  surge a partir de los fertilizantes minerales y también orgánicos, los cuales no están exentos de sufrir pérdidas, es de suma importancia conocer con detalle las condiciones climáticas y edáficas (textura) del lugar donde se encuentre ubicada la plantación. Los índices de precipitación cuando son elevados favorecen la lixiviación de esas formas químicas debido a su alta solubilidad.
- 7) Deben conocerse con detalle de previo las necesidades nutricionales y fisiológicas del cultivo en cada una de las etapas fenológicas de su ciclo vegetativo, lo cual obliga actuar y concertar las condiciones y características particulares del entorno agroproductivo con las fuentes, dosis y momentos más oportunos para realizar la adición de los nutrimentos al suelo, en este particular el N. La mayor absorción de N coincide con los periodos de más rápido crecimiento del cultivo (Chaves, 1999ab, 2019a).
- 8) La aplicación del fertilizante, en este caso nitrogenado, en el momento fenológico justo mediante un correcto reparto y distribución del insumo mejora su eficiencia y minimiza las pérdidas por lavado; en consecuencia, reduce la dosis necesaria incorporar incluyendo su costo. Por esta razón resulta muy prudente en localidades con suelos de textura arenosa y momentos de alta precipitación, fraccionar la adición del fertilizante. En Costa Rica zonas cañeras como la Región Norte y Turrialba-Juan Viñas merecen especial atención en este sentido.
- 9) Se debe contar inexcusablemente con un análisis (semi o detallado) fisicoquímico del suelo que permita determinar

e incorporar el fertilizante de acuerdo con la condición específica de necesidad nutricional de la plantación, bajo un criterio estricto de agricultura de precisión o de sitio. Esto implica evitar y acabar las clásicas y tradicionales aplicaciones generalizadas en toda la plantación.

- 10) Considerando que el uso dominante y continuo de fuentes nítricas (nitrato de amonio) puede intervenir la condición de acidez del suelo, resulta necesario mantener su control y proceder, cuando la situación lo amerite y justifique, con su corrección y adecuación mediante la aplicación de enmiendas apropiadas de calidad de acuerdo con los criterios técnicos establecidos y conocidos para ese fin (Chaves, 1999b, 2017, 2020d).
- 11) Se debe considerar seriamente la posibilidad, de existir viabilidad técnica y factibilidad económica, utilizar fertilizantes modernos de última generación que eleven la eficiencia.; entre los cuales están los fertilizantes nitrogenados de liberación lenta que favorecen la dosificación y liberación pausada del N de manera que las pérdidas se reducen y minimizan. Adicionalmente están los fertilizantes estabilizados, donde el N se acompaña de moléculas inhibitoras de procesos de transformación en el suelo; como es el caso de la molécula inhibitora de la nitrificación que retarda la conversión de amonio a nitrato, favoreciendo la forma amoniacal por más tiempo que es retenida por las arcillas del suelo, no siendo por ello el N susceptible de ser lixiviado y perdido como nitrato. En casos calificados pueden emplearse para reducir la nitrificación y, con ello, la emisión de óxido nitroso en los fertilizantes orgánicos, inhibidores de la nitrificación a los fertilizantes; como acontece con los ácidos húmicos.
- 12) No cabe la menor duda que implementar y ejecutar un programa de fertilización siguiendo los principios que rigen la agricultura de precisión, ofrece la posibilidad de racionalizar y optimizar la aplicación, mitigar las pérdidas y lograr ahorros significativos en el rubro de los fertilizantes minerales, particularmente N.
- 13) El agua es en definitiva un factor determinante, sea en incrementar o por el contrario reducir las pérdidas de nitratos, por ello, las aplicaciones deben ajustarse en lo posible a su necesidad, sea por aplicación en periodos de baja precipitación o mediante el uso de riego regulado (lámina de agua), especialmente en texturas gruesas

donde la infiltración es muy amplia por razones de espacio poroso.

- 14) La pérdida de N valioso ocurre tanto en fuentes orgánicas como minerales, lo que obliga adoptar e implementar medidas preventivas y correctivas que aseguren su uso óptimo. El origen orgánico no exime, como erróneamente se cree, las pérdidas de N generadas a partir de la mineralización.
- 15) Debe evitarse quemar los restos y residuos biomásicos de cosecha (RAC), procurando, por el contrario, incorporarlos con arado al suelo; preferiblemente complementados con materiales orgánicos.
- 16) Se recomienda incorporar los restos orgánicos de cosecha de las plantaciones con el objeto de mejorar la condición física y de fertilidad del suelo; para lo cual se pueden utilizar complementaria o suplementariamente abonos verdes (Chaves 2020c). Es importante reducir el tamaño del material orgánico mediante “picadoras” para aumentar la superficie específica y favorecer su mineralización.
- 17) Resulta reiterativo pero inevitable reiterar e insistir en la necesidad de aprovechar y hacer uso de los servicios de asesoramiento técnico especializado existentes y ofrecidos por el Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), el MAG y la academia en esta materia; asociados a programas de asistencia técnica y transferencia de tecnología. En estos tópicos tan técnicos y complejos no cabe la improvisación ni tampoco vale la experiencia sin conocimiento especializado.

Como puede inferirse de lo anotado anteriormente, algunas de las acciones recomendadas para tratar de reducir y minimizar las pérdidas de N de nitratos por lixiviación, podrían eventualmente crear y agudizar otros problemas con implicaciones técnicas, de manejo y hasta de alcance económico importante.

De igual manera, algunas de las medidas que pueden adoptarse para reducir la concentración y presencia de nitritos, son:

- La acción más prudente, sencilla y sensata para eliminar los nitritos en el agua y en los vegetales comestibles, es aplicar un estricto control preventivo en la selección de la fuente y el uso correcto de los fertilizantes nitrogenados, evitando

que se genere un exceso de este compuesto en el suelo y en la planta.

- Para reducir en todo lo posible los nitritos en el agua y en los alimentos consumidos es importante eliminar las hojas externas más verdes, que son las que concentran más cantidad de esa sustancia.
- Lavar cuidadosamente los vegetales y frutas que se van a consumir.
- Escoger vegetales de temporada y preferiblemente sin hojas.
- Optar por productos producidos bajo principios ecológicos y consecuentes con la agricultura orgánica, en los que la concentración de nitratos es presumiblemente menor.
- No reutilizar el agua de cocción de verduras ricas en nitratos para preparar otros platos.
- Evitar consumir verduras envasadas en plásticos, ya que los nitritos se desarrollan principalmente durante el almacenamiento en lugares húmedos poco aireados.

### Conclusión

A pesar de la reconocida, demostrada e incuestionable importancia que la nutrición como concepto, la fertilización como práctica agrícola y los fertilizantes como insumos inapelables requeridos para satisfacer las necesidades vitales que las plantas tienen; provoca que la revisión, ajuste y adecuación permanente de todos los principios y vínculos coligados con el tópico, constituya una obligación primaria y estratégica de todo sistema productivo para justificar y validar su empleo. El hecho de representar el nitrógeno una de las mayores limitantes, pero a la vez un importante factor de estímulo potencial para incrementar la productividad y con ello la producción de alimentos, compromete asegurar su uso óptimo, sostenible y ambientalmente satisfactorio y ecoeficiente. Por lo anterior, la exigencia de satisfacer las necesidades alimentarias de los pueblos y las familias, no debe ser nunca un argumento ni razón legítima que excuse de manera irresponsable, violentar los principios y regulaciones técnicas y protocolarias que procuran evitar la contaminación, la toxicidad y la afectación de la salud que su mal uso puede provocar.

A pesar de todos los ingentes esfuerzos que responsablemente puedan realizarse en procura de eliminar los efectos negativos y contraproducentes que el uso de los fertilizantes, en

particular el N puedan provocar, siempre hay un componente importante que escapa a esas iniciativas y controles virtud de que corresponden a procesos naturales y no necesariamente antropogénicos. En el caso del N las pérdidas por gasificación y lixiviación resultan en muchas situaciones difíciles, al menos muy onerosas de reducir y casi imposibles de eliminar; lo que favorece los GEI, la contaminación y la toxicidad, en afectación directa de la atmósfera, el recurso edáfico e hídrico, la calidad de los alimentos que consumimos y la salud misma.

Como expresara Chaves (2020b) con gran sentido pragmático y perspectiva de futuro en torno al nitrógeno, *“El abordaje del tema resulta siempre corto e insuficiente en consideración a la gran cantidad de asuntos que deben atenderse y cubrirse para comprender mejor su naturaleza y actividad, como son entre otros los relativos a: a) el N en la materia orgánica; b) mineralización y disponibilidad de N en el suelo; c) características del elemento; d) formas absorbibles; e) pérdidas en el suelo; f) absorción por la raíz; g) transporte, movilización y asimilación en la planta; h) fijación simbiótica; i) fertilizantes comerciales nitrogenados orgánicos e inorgánicos; j) requerimientos por las plantas (kg/ha); k) N y calidad nutricional; l) N y ambiente y m) respuesta agroindustrial de la planta a la adición del nutrimento. Como se infiere, por su naturaleza, propiedades y características particulares el manejo del N es amplio, sensible y muy complejo.”*

Es en este sentido, es entendible y aceptable la válida preocupación que existe actualmente por el uso excesivo, desproporcionado y poco técnico del N en muchos sistemas y actividades productivas agropecuarias; lo cual es motivo de fuerte crítica por unos y búsqueda de soluciones por otros. Lo cierto es que el tema y el problema es difícil y complejo por los elementos, mecanismos e interacciones involucradas, lo que amerita un tratamiento especializado desagregado en tópicos específicos implicados, como acontece en el presente caso con la nitrificación del elemento.

Uno de los mayores problemas de la contaminación de las aguas por causa de los nitratos y nitritos, ocurre con las subterráneas por la dificultad que existe para su oportuna detección y, sobre todo, la gran dificultad para tratarlas, ya que cuando la afectación es verificada y comprobada, el problema y sus consecuencias ya están entronizados. Se trata en muchas ocasiones de una contaminación difusa y dispersa, aunque en

otras es sin embargo puntual y focalizada. Lo más grave del problema, es que la posible recuperación de la calidad de esas aguas afectadas por contaminación de nitratos y fosfatos requiere de periodos muy prolongados de tiempo y onerosos recursos para poder solventarse. La situación con las aguas superficiales es un tanto diferente.

En torno a la posibilidad de padecer y favorecer la creación de posibles problemas de contaminación y toxicidad con nitratos y nitritos, puede asegurarse con buen criterio técnico, que en el caso particular de la caña de azúcar la situación es muy diferente a la que sucede en otros cultivos, lo cual se sustenta en razones como:

- a) La planta de caña dispone de un sistema radical poderoso y excepcional (Chaves, 2020a), caracterizado por su volumen y amplia capacidad exploratoria (horizontal-vertical).
- b) La planta puede por lo anterior extraer nutrimentos, incluyendo nitratos, en profundidades donde otros no llegan, lo que evita la deposición y el acúmulo de estos.
- c) La cantidad de  $N-NO_3$  que se aplica es relativamente baja en proporción a la cantidad (kg) de biomasa generada, lo que asegura una alta extracción y asimilación.
- d) La planta de caña como está científicamente demostrado tiene especial afinidad y sensibilidad por la absorción de N en forma de  $NO_3$ .
- e) La práctica comercial del cultivo en el caso de Costa Rica emplea varias fuentes de N (urea, amonio, nitratos) que evitan concentrar las aplicaciones al suelo en una sola opción.
- f) El área sembrada (ha) con caña de azúcar en el país no involucra secciones importantes con presencia de suelos de textura arenosa ni similar, lo que evita la contaminación facilitada (Chaves, 2017; Chaves y Chavarría, 2021).

No cabe duda ni cuestionamiento alguno en reconocer y aceptar que el agua limpia, de alta calidad y pureza es indispensable para la salud humana y los ecosistemas naturales, de modo que la calidad en todos sus alcances debe ser uno de los elementos más importantes de la política medioambiental de cualquier actividad, sector y país; lo cual obliga actuar en varias vías trascendentes, como son entre otras: a) reducir la contaminación causada o provocada por los nitratos de origen agropecuario, b) actuar preventivamente contra nuevas y potenciales contaminaciones, c) optimizar el uso de los

fertilizantes, particularmente los nitrogenados, d) desarrollar programas amplios de información y capacitación, e) establecer y operar la legislación y regulación protocolaria pertinente y f) operar un sistema de fiscalización riguroso, oportuno y efectivo.

En la actual coyuntura y circunstancia mediática de exigencia que recae sobre la agricultura moderna y competitiva, resulta incuestionable e imperativo atender y abocarse con carácter prioritario y visionario al estudio de los factores y elementos que intervienen en la relación e interacción suelo-planta-atmósfera; con el propósito de establecer estrategias efectivas de manejo sobre los campos sembrados combinando acciones de fiscalización, control preventivo, mitigación y eficiencia. Dicha acción debe operar en prácticas y sobre procesos básicos de la actividad agroproductiva que permitan regular y optimizar el flujo de agua generado, el transporte de solutos implícito, el crecimiento de la vegetación, los efectos inducidos por la labranza, la interacción con el clima, la adición de nutrientes esenciales especialmente N y los procesos químicos propios del suelo, entre otros. Una gestión efectiva en esa orientación permitirá satisfacer las restricciones y exigencias que en materia de calidad, ecoeficiencia y competitividad operan actualmente.

#### Literatura citada

- 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.
- Chaves Solera, M. 1999a. *El Nitrógeno, Fósforo y Potasio en la caña de azúcar*. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, setiembre. 130 p.
- Chaves, M. 1999b. *La práctica del encalado de los suelos cañeros en Costa Rica*. 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: 216-223.
- 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, 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.
- Chaves Solera, M.A.; Chavarría Soto, E. 2017. *Tipos de suelo y producción de caña de azúcar en Costa Rica: Primera aproximación taxonómica*. 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. 6 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. *Materia orgánica y disponibilidad de nitrógeno para la caña de azúcar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(21): 6-16, octubre.
- Chaves Solera, M.A. 2020c. *Abono verde, consociación y rotación de cultivos en caña de azúcar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(22): 5-19, octubre.
- 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. 2021a. *Estrés mineral y caña de azúcar en Costa Rica*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(11): 5-21, mayo.
- Chaves Solera, M.A. 2021b. *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. 2021c. *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. 2021d. *¿Cuánto Nitrógeno se aplica en las plantaciones comerciales de caña de azúcar en Costa Rica?* Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(17): 5-26, agosto.
- Chaves Solera, M.A. 2021e. *Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y uso del nitrógeno en la caña de azúcar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(19): 5-29, setiembre.
- Chaves Solera, M.A.; Chavarría Soto, E. 2021. *Distribución geográfica de las plantaciones comerciales de caña de azúcar en Costa Rica según altitud y localidad*. Revista Entre Cañeros N° 20. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica. p: 5-35, julio.
- Epstein, E.; Bloom, A. 2006. *Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas*. 2 edic. Trad. María Edna Tenório Nunes. Londrina, Brasil. Editora Planta. 403 p.
- Malavolta, E. 1979. *ABC da Adubação*. 4a ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda. p: 25-39.
- Malavolta, E. 1981. *Manual de Química Agrícola: Adubos e Adubação*. 3<sup>era</sup> edic. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda. p: 31-96.
- Meléndez, G.; Molina, E. 2003. *Fertilizantes: características y manejo*. CIA/UCR/ACCS/ COSTACAN. San José, Costa Rica, 18-19 julio. 139 p.
- Mengel, K.; Kirkby, E. A. 2001. *Principles of plant nutrition*. 5<sup>th</sup> ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 849 p.
- Núñez Escobar, R. 2013. *El suelo como medio natural en la nutrición de los cultivos*. En: Nutrición de Cultivos. 1<sup>a</sup> edición. Gabriel Alcántar González y Libia Trejo Tellez, coordinadores. Colegio de Postgraduados. México. p: 93-157.
- Wikipedia. 2021. *Eutrofización*. Consultado el 16 de setiembre 2021. Disponible en: [https://www.google.com/search?q=eutrofizaci%C3%B3n&ei=ENA\\_Yby0LdGXwbkP15CDmAl&oq=eutrofizaci%C3%B3n&gs\\_lcp=Cgdnd3Mtd2l6EAEYADIECAAQQzIECAAQQzIFCAAQgAQyBQgAEIAEMgUIABCABDIFCAAQgAQyBQgAEIAEMgUIABCABDIECAAQQzIFCAAQgARKBAhBGABQpNVmWKTVMDE6WZoAHAcACAAaABiAGgAZIBazAuMZgBAKABAqABAcABAQ&scient=gws-wiz](https://www.google.com/search?q=eutrofizaci%C3%B3n&ei=ENA_Yby0LdGXwbkP15CDmAl&oq=eutrofizaci%C3%B3n&gs_lcp=Cgdnd3Mtd2l6EAEYADIECAAQQzIECAAQQzIFCAAQgAQyBQgAEIAEMgUIABCABDIFCAAQgAQyBQgAEIAEMgUIABCABDIECAAQQzIFCAAQgARKBAhBGABQpNVmWKTVMDE6WZoAHAcACAAaABiAGgAZIBazAuMZgBAKABAqABAcABAQ&scient=gws-wiz)