

Periodo 04 de octubre al 17 de octubre 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 20 DE SETIEMBRE AL 03 DE OCTUBRE

En la figura 1 se puede observar, a partir de datos preliminares de 111 estaciones meteorológicas, el acumulado quincenal de lluvias sobre el territorio nacional.

Los acumulados diarios de lluvia superiores a 20 mm se registraron en la región azucarera Guanacaste Este durante el 23 de setiembre; mientras Guanacaste Oeste muestra más de 40 mm los días 23 y 30 de setiembre; Norte registra más de 15 mm el 24-25 y 27 de setiembre; Puntarenas identificó más de 95 mm el 23 de setiembre y más de 60 mm el 30 de setiembre; Sur durante el 30 de setiembre presentó más de 36 mm; Turrialba superó los 15 mm durante el 23 y 26 de setiembre; Valle Central sobrepasó los 25 mm el 23 de setiembre.

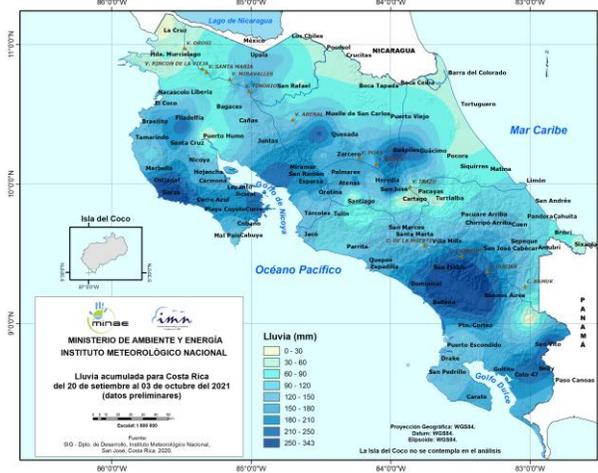


Figura 1. Valores acumulados de la precipitación (mm) durante la quincena del 20 de setiembre al 03 de octubre del 2021.

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 hasta el viernes, seguido de viento variable; mostrando humedad media-alta con su máximo hacia el fin de semana y temperaturas medias variable. Guanacaste (Este y Oeste) presentará viento Este, excepto el fin de semana que será del Oeste, así como contenido de humedad entre bajo-medio con su máximo hacia el fin de semana; así como reducción de la temperatura media durante el fin de semana. Valle Central (Este y Oeste) tendrá viento variable y contenido de humedad medio hasta el jueves seguido de humedad alta hacia el fin de semana: así como temperatura variable. Para Turrialba (Alta y Baja) se prevé viento variable dominando la dirección Este, humedad de media a alta y temperatura variable. En la región Sur se espera viento variable con dominancia del Este en la primera mitad de la semana y posteriormente dominancia del Oeste; iniciando la semana con contenido de humedad media que aumentara hacia el fin de semana; así como temperatura media variable. Puntarenas inicia la semana con humedad baja cambiando a media-alta a partir del jueves; así como viento del Este hasta el jueves, seguido de viento variable; acompañado de temperatura media hacia el fin de semana.

“La onda tropical #41 transita sobre el país generando lluvias aisladas. Se espera el tránsito de la onda tropical #42 entre jueves y viernes.”

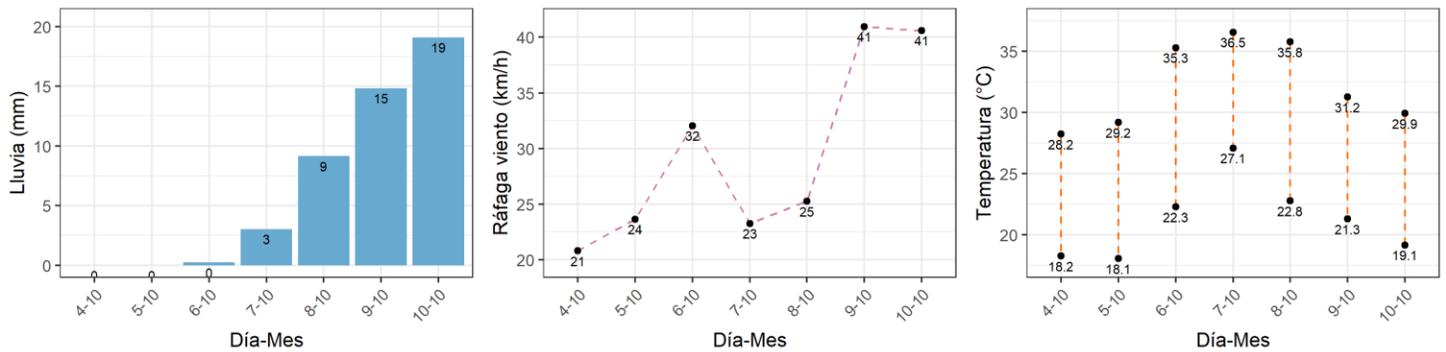


Figura 2. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 04 de octubre al 10 de octubre en la región cañera Guanacaste Este.

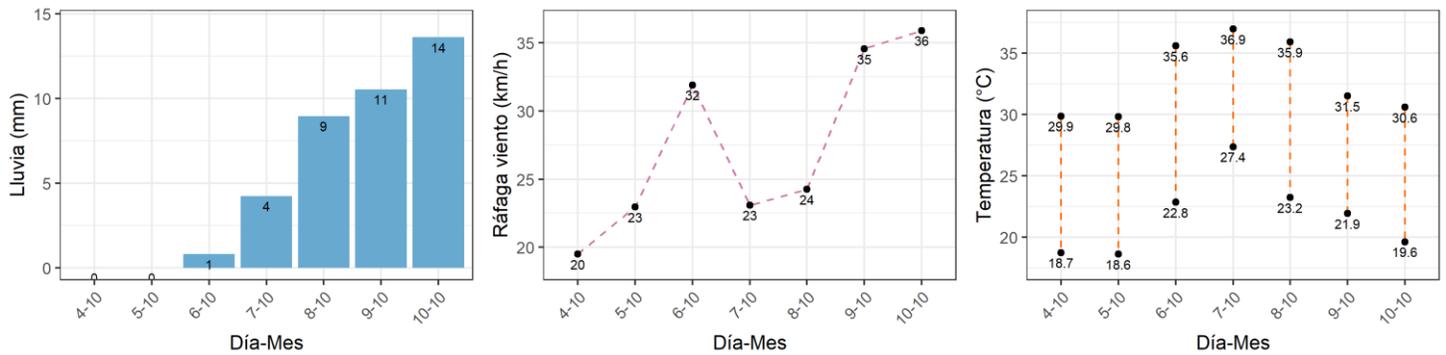


Figura 3 Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 04 de octubre al 10 de octubre en la región cañera Guanacaste Oeste.

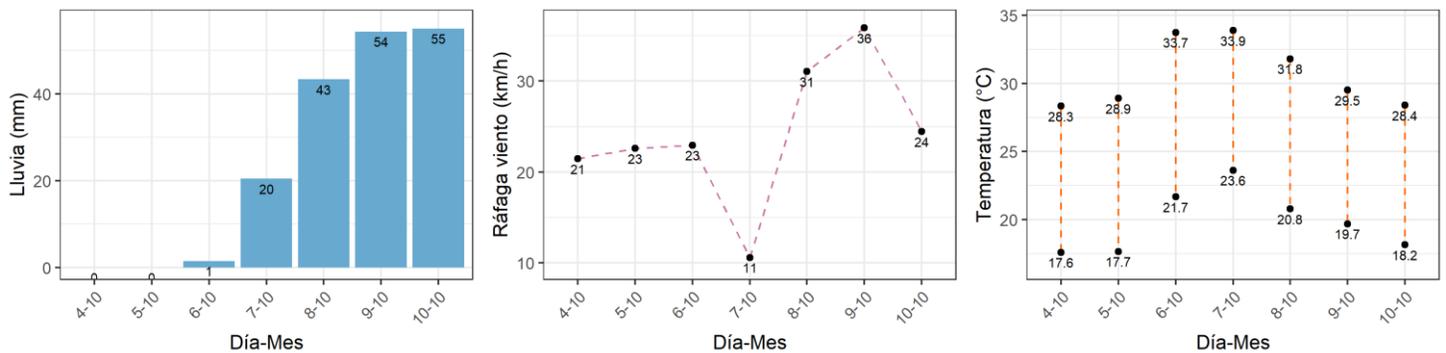


Figura 4. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 04 de octubre al 10 de octubre en la región cañera Puntarenas.

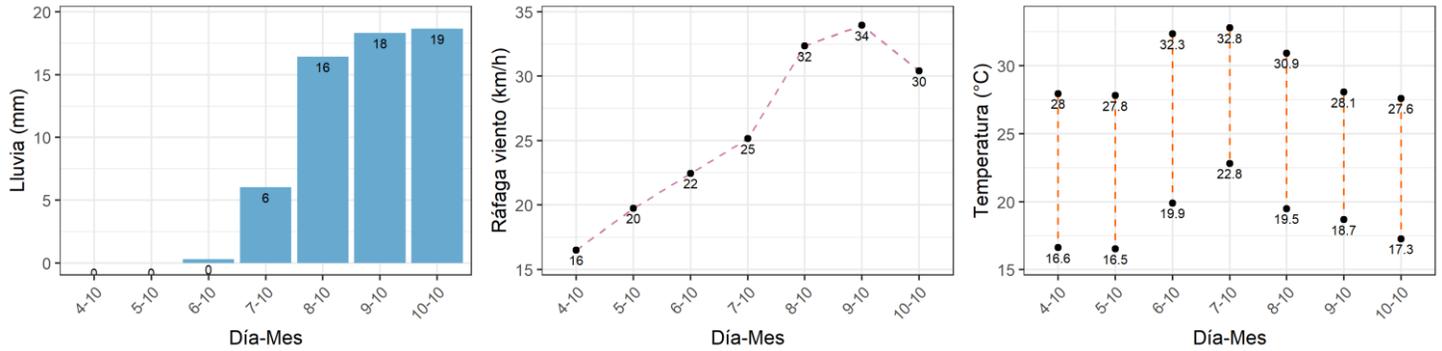


Figura 5. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 04 de octubre al 10 de octubre en la región cañera Zona Norte.

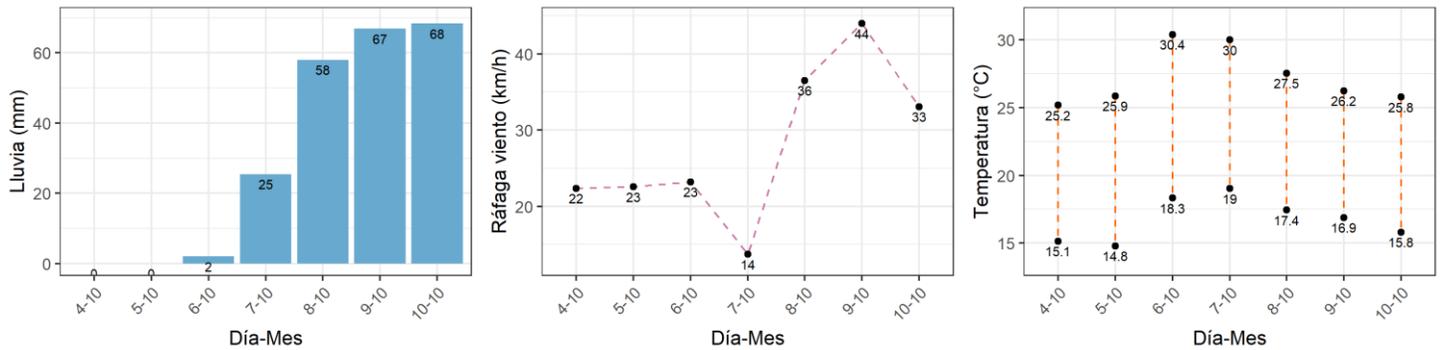


Figura 6. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 04 de octubre al 10 de octubre en la región cañera Valle Central Este.

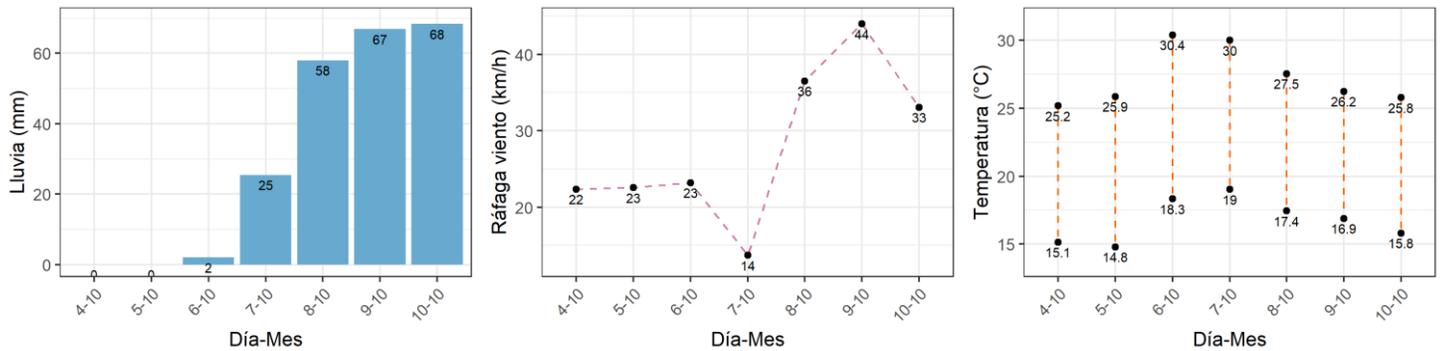


Figura 7. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 04 de octubre al 10 de octubre en la región cañera Valle Central Oeste.

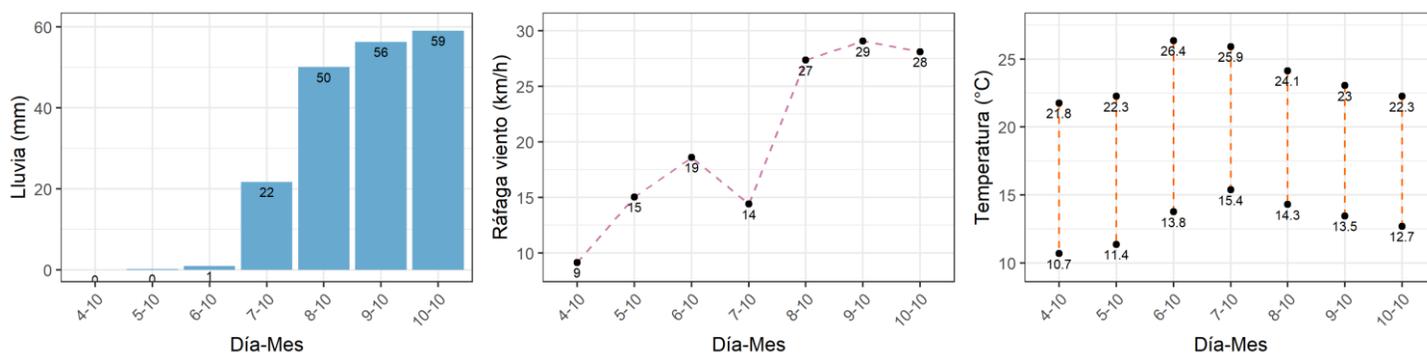


Figura 8. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 04 de octubre al 10 de octubre en la región cañera Turrialba.

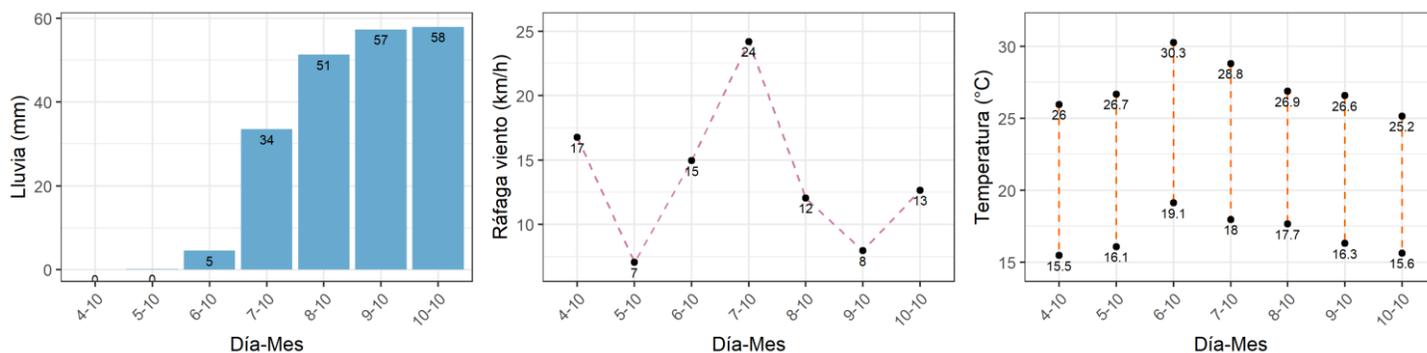


Figura 9. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 04 de octubre al 10 de octubre en la región cañera Zona Sur.

TENDENCIA PARA EL PERIODO DEL 11 DE OCTUBRE AL 17 DE OCTUBRE

Se prevé una semana más lluviosa que la actual, debido al paso de ondas tropicales, sin incursión de polvo del Sahara.

La Región Norte iniciará la semana con humedad media-alta, viento variable del Este y Oeste, así como temperatura variable; de forma que la semana mostrará 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 Este, además de contenido de humedad de bajo-medio y temperatura variable con sus mínimos hacia el fin de semana; en tanto la semana completa evidenciará condiciones levemente más lluviosas de lo normal y viento del Este más acelerado de lo normal. Valle Central (Este y Oeste) iniciará la semana con viento variable, humedad media y temperatura media variable; de forma que la semana sea levemente 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, humedad media-alta 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-alta y temperatura variable; donde se espera que la semana sea más lluviosas de lo normal y acompañada de viento normal para la época. Puntarenas iniciará la semana con humedad baja-media, así como viento variable del Este y Oeste, además de temperatura media variable; esperándose que la semana mantenga condiciones más lluviosas de lo normal y viento 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, la semana del 27 de setiembre al 03 de octubre de 2021 inició con alta saturación en los suelos de las regiones Guanacaste Oeste, Región Norte y Región Sur; a partir del martes la humedad disminuyó en la Región de Guanacaste Oeste pero luego del viernes ésta aumentó en ciertos puntos de la zona. La saturación en la Región Norte aunque se redujo, se mantuvo relativamente alta con respecto a otras regiones cañeras. En la Región Sur la humedad varió durante la semana.

Las demás regiones cañeras, Puntarenas, Turrialba Baja y Turrialba Alta tuvieron bajos porcentajes durante todo el periodo.

Como se observa en la figura 11, la Región Guanacaste Oeste presenta entre 15% y 75% de saturación en el suelo, las regiones Guanacaste Este y Puntarenas están entre 30% y 60%, la Región Valle Central Oeste tiene entre 45% y 60% mientras que la Región Valle Central Este mantiene su humedad entre 30% y 45%.

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

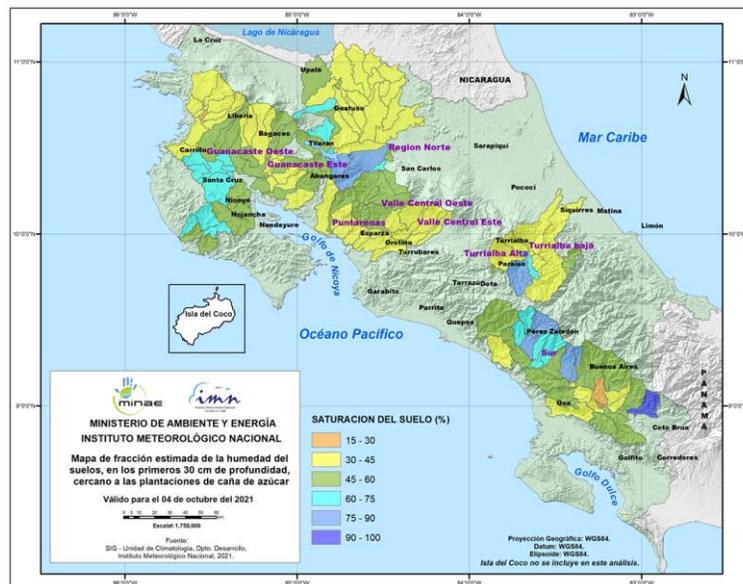


Figura 11. Mapa de fracción estimada de la humedad en porcentaje (%), en los primeros 30 cm de profundidad, cercano a las plantaciones de caña de azúcar, válido para el 04 de octubre del 2021.

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

AMONIFICACIÓN Y VOLATILIZACIÓN 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

No hay duda que existen tópicos cuyo contenido, amplitud, complejidad, vínculos y efectos generados en el entorno, originan una enorme cantidad de material técnico-científico y elementos pragmáticos de campo para analizar y comentar. En este sentido, el tema del nitrógeno es uno de ellos virtud de mantener diversas áreas potenciales de acción desde la perspectiva y punto de vista que se le juzgue e interprete. Caben en este sentido valoraciones y apreciaciones temáticas en varios ámbitos, como son los de carácter ambiental, comercial, productivo, tecnológico y hasta de salud pública, que lo convierte ineludiblemente en un factor de cuidado a considerar siempre de manera prioritaria en cualquier emprendimiento donde la fertilización y el N estén presentes.

Mucho se ha comentado sobre los alcances y las diversas relaciones que el nutrimento mantiene y que generan respuestas y productos muy diferentes en magnitud, calidad e impacto, algunos de los cuales son indeseables y por ello poco codiciados por las consecuencias e implicaciones que tienen para los sistemas agroproductivos, el ambiente y la calidad de vida de la población. El alcance de las valoraciones que giran alrededor del nitrógeno a nivel mundial son múltiples por su complejidad, todas proyectadas en procura de conocer y establecer la relación del nutrimento con los factores tecnológicos de la producción, el ambiente y la seguridad alimentaria. En este particular, el vínculo que existe con el cultivo de la caña de azúcar es muy amplio y diverso en el país, como lo demuestran las publicaciones de Chaves (1999ab, 2001, 2012, 2016bc, 2021bd) cuyo abordaje es amplio y muy específico en temáticas.

Uno de los asuntos que merece especial atención en cualquier materia vinculada con el nutrimento es el concerniente al de las transformaciones y pérdidas que sufre el N en el suelo, y que provocan afectaciones en varios ordenes, como son las implicadas con la productividad agroindustrial (Chaves 2016bc, 2021abd), las ambientales por causa del impacto atmosférico

que los Gases de Efecto Invernadero (GEI) inducen en favor del cambio climático, la contaminación del recurso hídrico y la calidad de los alimentos (Chaves 2021ef); además del fuerte impacto que sobre los costos relacionados genera el hecho de incorporar un insumo con baja tasa de retorno y valor agregado (Chaves 2021bd), entre otros.

Con fundamento en lo anterior, se busca dar continuidad con el presente documento, al abordaje con alguna profundidad y detalle, al tema de las transformaciones y pérdidas de nitrógeno por volatilización generadas en este caso por el proceso de amonificación acontecido en el suelo y sus implicaciones para la agroindustria de la caña de azúcar y el ambiente.

Amoníaco y Amonio

El amoníaco y el amonio son dos formas químicas diferentes de nitrógeno que siempre aparecen citadas en las relaciones asociadas con la nutrición de las plantas. Es relevante considerar al respecto, que el NH_3 no ionizado puede tener efectos ambientales y de salud inconvenientes, pudiendo ser perjudicial para los microorganismos acuáticos; mientras que el amonio ionizado es por el contrario inocuo. El catión amonio resultante es un ácido conjugado comparativamente fuerte, que reacciona con cualquier base regenerando la molécula de amoníaco neutra.

El amoníaco es un compuesto químico que se produce de forma natural y se le puede por ello encontrar en el ambiente, tanto en el suelo, el aire, como también en el agua. Es una sustancia que también se renueva de manera natural al formar parte del ciclo del nitrógeno que se activa, complementa, fortalece y dinamiza con la fertilización de los cultivos (Chaves 1999b).

El **amoníaco, azano (denominación de la IUPAC), espíritu de Hartshorn, trihidruro de nitrógeno, hidróxido de amonio o gas de amonio**, como también se le conoce, es un compuesto químico compuesto por tres átomos de hidrógeno (H) y uno de nitrógeno (N), nombrado y reconocido

con la fórmula NH_3 (Figura 1). Su contacto y exposición directa puede ocasionar irritación y quemaduras en la piel, los ojos, la nariz, la garganta y los pulmones. A temperatura ambiente es un gas incoloro dotado de un olor fuerte, penetrante, repulsivo y nauseabundo muy característico. Es peligroso para los organismos acuáticos, los ecosistemas y el ambiente. Opera como un elemento químico creado en procesos industriales que son fundamentales en la fabricación de muchos productos de uso médico y doméstico empleados principalmente en la limpieza. Como características físico-químicas posee una masa molar de 17,031 g/mol, una densidad de 0,723 kg/m³, 0,000723 g/cm³, un punto de ebullición de 239,81 K (-33 °C), un grado de solubilidad en agua de 89,9 g/100 ml (0 °C), una temperatura crítica de 405,5 K (132 °C). Al ser disuelto en agua adquiere su forma líquida.

La síntesis del amoníaco consiste en una reacción exotérmica surgida entre el hidrógeno y el nitrógeno, bajo condiciones de presión elevada para aumentar el rendimiento, y a temperaturas moderadamente altas en presencia de catalizadores; los cuales son formados por una mezcla de óxido de hierro auxiliado por agentes sinérgicos como óxidos de Al, K, Mg y Ca (Malavolta 1981). La reacción es en este caso la siguiente:



Su origen es natural y biótico pues lo producen las bacterias, las plantas y/o los animales que se encuentran en fase de descomposición y degradación por causa de la mineralización de componentes orgánicos, como se expondrá más adelante; motivo por el cual es factible encontrarlo en el agua, el suelo y el aire, donde no permanece sin embargo estable por mucho tiempo. Como hecho destacable sucede que el cuerpo humano también elabora amoníaco de manera natural cuando las proteínas entran en fase de descomposición (Wikipedia. 2021).

Entre sus usos más comunes y habituales, se tiene que el amoníaco puede emplearse en:

- ❖ Fertilizar las plantaciones e incorporar nitrógeno al suelo.
- ❖ Emplearse industrialmente (en forma de amoníaco anhidro) en la formulación de diferentes fertilizantes químicos.
- ❖ Empleado en la producción de ácido nítrico, compuesto utilizado en la fabricación de fármacos, resinas, plásticos y explosivos.
- ❖ Eliminar suciedad y manchas.
- ❖ Desengrasar y desinfectar estructuras.
- ❖ Limpiar textiles y calzados.

- ❖ Tratar con fines médicos por su efecto antiséptico picaduras de animales (su pH básico neutraliza el ácido de la picadura).
- ❖ Eliminar olores fuertes y desagradables (humedad o moho) presentes en el medio.
- ❖ Modificar (oscurecer) los colores de la madera al reaccionar con los taninos (roble).
- ❖ Crear gases refrigerantes en equipos de aire acondicionado para mantener el frío y disipar el calor.
- ❖ Purificar aguas residuales.
- ❖ Destruir bacterias en alimentos y controlar procesos de fermentación.
- ❖ Fabricar plásticos, telas, tinturas, entre otros productos químicos.
- ❖ Elaborar fármacos.
- ❖ Como combustible para usos industriales.

Como se infiere de todo lo anterior, el empleo del amoníaco es muy amplio y diverso, lo que lo sitúa en la mayoría de actividades domésticas y agroindustriales desarrolladas por el hombre en su vida diaria. Importante dejar constancia que el amoníaco no puede emplearse para regar las plantas domésticas, pues diluido en agua forma una sustancia que es tóxica para los vegetales que, llegará con el tiempo a secar los suelos provocando su muerte.

En lo específico, el **amonio** es por su parte un catión poliatómico cargado positivamente, de fórmula química NH_4^+ . Tiene un peso molecular de 18,04 y se forma mediante la protonación del amoníaco (NH_3) (Figura 1). El amonio se acumula en sangre si no se consigue eliminar del organismo de una manera adecuada. Dependiendo del grado de sustitución del hidrógeno (H) por grupos alquílicos, el grupo se puede llamar catión de amonio primario, secundario, terciario o cuaternario. Existen en equilibrio con su respectiva amina sustituida, dependiendo del valor de pH. El amonio cuaternario (llamadas aminas cuaternarias) es actualmente muy utilizado para la desinfección, elaboración de agentes tensoactivos, suavizantes de telas y también como agentes para evitar la estática (por ejemplo, en champús); también algunos espermicidas lo contienen. A diferencia de los otros, solo los cationes cuaternarios están cargados permanentemente, independientemente del pH de la solución (Wikipedia. 2021).

Como se comentará más adelante con mayor detalle, los iones amonio son un producto que se genera por la actividad de los microorganismos en el suelo; y también por los productos de desecho del metabolismo en los animales. En el caso de los peces e invertebrados acuáticos, se excreta directamente en el agua. El

amonio presente en altas concentraciones es tóxico para los seres humanos, pudiendo ocasionar serios daños en la mucosa que recubre los pulmones, o también quemaduras alcalinas, lo que obliga un empleo muy cuidadoso.

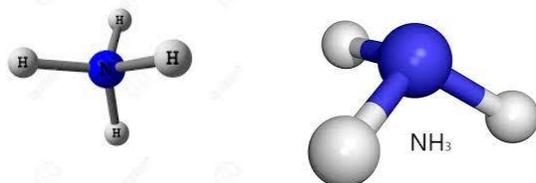


Figura 1. Catión de Amonio (NH₄⁺) y Amoníaco (NH₃) (Wikipedia. 2021)

Como se anotó anteriormente, el amoníaco y el amonio son dos formas químicas de nitrógeno dotadas de propiedades diferentes, en las cuales el grado de acidez del medio (pH) se convierte en el factor principal que regula y determina la proporción de una u otra en el agua. La actividad del amoníaco también se ve influenciada por la fuerza iónica y la temperatura.

La ecuación química que describe la relación que surge entre el amoníaco y el amonio es la siguiente:



Acontece que cuando el índice de pH del medio es ácido (bajo), la reacción química se desplaza hacia la derecha; ocurriendo lo contrario cuando el valor del pH es alto (básico) pues el desplazamiento gira entonces hacia la izquierda. Se tiene que un estado calórico cercano a la temperatura ambiente y en una condición ácida (pH <6,0), la proporción de amonio-N + amoníaco-N en forma de NH₃ es significativamente baja y la de NH₄⁺ es extremadamente alta. Se reporta que con un pH próximo a 8,0 la proporción de N en forma de NH₃ es del 10% o menos, y con un pH ligeramente superior a 9,0, la proporción sube al 50%. La actividad del amoníaco acuoso también es muy inferior con temperaturas bajas y superior con temperaturas tibias. Lo anterior implica que en situaciones de bajas temperaturas y de pH bajo, la actividad del NH₃ es aún menor, y en forma de NH₄⁺ es mayor. Cuando el valor de pH es >11, todos los iones de amonio-N en la solución se convertirán a amoníaco-N.

Por sus propiedades particulares, el amoníaco es una base débil que puede reaccionar con los denominados ácidos de Bronsted que actúan como donantes de protones, lo que permite producir el ion amonio. Cuando el amoníaco es disuelto en agua, una

cantidad pequeña de él reacciona en el agua con los iones hidronio (H⁺) para producir iones amonio. El ion amonio resultante es un ácido conjugado comparativamente fuerte, y reacciona con cualquier base, regenerando la molécula de amoníaco neutra. En solución acuosa, el grado en que el amoníaco forma ion amonio depende del pH de la solución y de la concentración de amoníaco.

Fuentes nitrogenadas amoniacales

El tema de la fabricación de formulaciones químicas de fertilizantes apropiados para uso comercial en la agricultura, siempre despierta mucho interés y mantiene gran importancia y actualidad, en consideración de las múltiples implicaciones que tiene para la reproducción de opciones comerciales apropiadas para uso en el campo, lo que interviene también el costo implicado. Como se aprecia en las Figuras 2 y 3, independientemente del esquema y ruta de fabricación seguida a nivel industrial, el amoníaco es siempre el punto de partida y la “lave” que abre el proceso para la producción de la materia prima requerida y utilizada. Es por tanto y sin lugar a dudas, el compuesto más importante en la fabricación de fertilizantes nitrogenados, pudiendo ser al mismo tiempo producto final para uso directo en el campo, o en su caso actuar como un intermediario para la producción de otras formulaciones. El amoníaco (NH₃) se compone de N y de hidrógeno (H), donde el N proviene del aire atmosférico, reservorio inagotable, y el H es obtenido del gas natural de los derivados del petróleo o en su caso de la misma agua (Malavolta 1979, 1981).

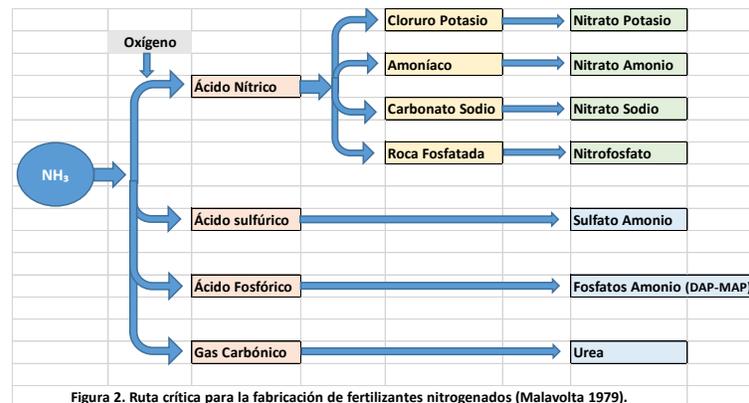


Figura 2. Ruta crítica para la fabricación de fertilizantes nitrogenados (Malavolta 1979).

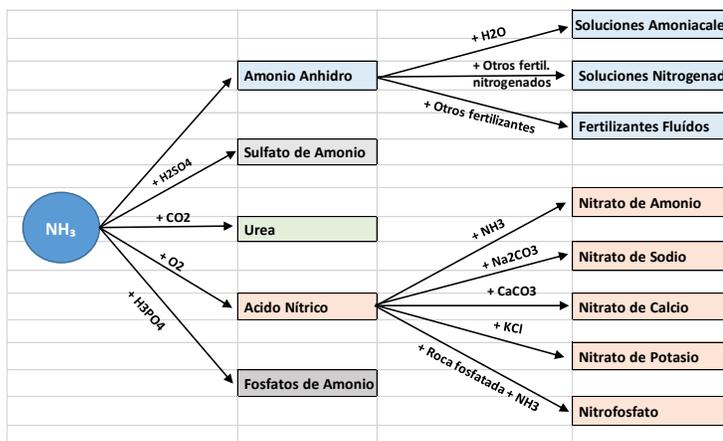


Figura 3. Formulación de fertilizantes nitrogenados a partir de Amoníaco (Malavolta 1981).

Cuadro 1. Fertilizantes nitrogenados (24) formulados conteniendo Amonio.				
Producto	Fórmula	Contenido total N (%)	Contenido % NH ₄	Equivalente a Acidez *
Amonio Anhidro	NH ₃	82,2		-1.341
Solucion Amoniacal		16 - 25		-360 -540
Nitrato de Amonio	NH ₄ NO ₃	33,5	16,7	-535 -590
Nitrosulfato de Amonio	NH ₄ NO ₃ , (NH ₄) ₂ SO ₄	26 - 30		
Nitrato Amonio Calcáreo**	NH ₄ NO ₃ (*CaCO ₃)	20 - 22	10 - 11	0
Nitrato de Calcio	CaNO ₃	15,5	1,1	
Nitrosulfcalcio	NH ₄ NO ₃ CaSO ₄	27		-353
Urea-Nitrato de Amonio	CO(NH ₂) ₂ , NH ₄ NO ₃	28 - 32		
Sulfato de Amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	20 - 21	20 - 21	-996 -1.100
Nitrofosfatos		14 - 22		-150 -250
Cloruro de Amonio	NH ₄ Cl	26 - 28		-1.394
Sulfonitrato de Amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄ , NH ₄ NO ₃	26	19,5	-770 -850
Urea	CO(NH ₂) ₂	45 - 46	45 - 46	-840
Urea - Nitrato de Amonio		28 - 32		
Urea - Fosfato		28 - 29		
Urea Fostato - Amonio		21 - 38		
Urea - Azufre		40		
Fosfato Monoamónico (MAP)	NH ₄ H ₂ PO ₄	10 - 12	10 - 12	-589 -650
Fosfato Diamónico (DAP)	(NH ₄) ₂ HPO ₄	16 - 21	16 - 21	-625 -775
Fosfato Diamónico Saturado		21	21	
Fosfato de Amonio-Sulfato		16	16	
Polifosfato de Amonio		10 - 11	10 - 11	
Tiosulfato de Amonio		12	12	
Molibdato de Amonio	(NH ₄) ₂ MoO ₇ ·4H ₂ O			

Fuente: Elaborado por el autor con base en información de Bertsch (1998); Meléndez y Molina (2003); Malavolta (1979, 1980, 1981).

* kg CaCO₃/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.

El Cuadro 1 expone complementariamente con fines informativos y de orientación, un detalle de las formulaciones comerciales (24) más comunes que contienen nitrógeno en diferentes proporciones en su forma amoniacal, y que representan por ello, opciones viables para uso por parte de los agricultores en el campo; la mayoría de las mismas son granulares, pero hay también líquidas como el amonio anhidro que es un gas a temperatura ambiente pero que se licuifica cuando es comprimido. Se anota también una opción comercial alternativa para incorporar Molibdeno (Mo) vía foliar, como es el molibdato de amonio. Es definitivo que la cantidad y variedad de opciones que existen en el comercio para incorporar N-NH₄⁺ es mayor respecto a la de N-NO₃⁻ (Chaves 2021f).

En los fertilizantes nitrogenados tanto orgánicos como minerales destaca el hecho que el contenido del elemento en la fórmula comercial se expresa en su forma elemental como N; motivo por el cual cuando se dice que el nitrato de amonio contiene un 33,5% de nitrógeno, lo que se indica es que en cada 100 kg de abono están contenidos 33,5 kg de N. Más aún, esa misma formulación mantiene un sano equilibrio y balance entre las formas nítrica y amoniacal con un 16,75% de cada una. 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 NH₄⁺ y NO₃⁻, 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 fuentes nitrogenadas de mayor uso nacional en el cultivo de la caña de azúcar.

Aseguran Epstein y Bloom (2006) en torno a fuentes, que “Amonio es la fuente preferida de nitrógeno inorgánico de muchas plantas []. La disponibilidad de NH₄⁺ en los suelos, generalmente muestra variación mucho menor, tanto estacionalmente como espacialmente, que la de otras formas nitrogenadas, particularmente NO₃⁻. Consecuentemente, NH₄⁺ puede ser la principal forma de nitrógeno disponible en ciertas épocas y lugares.”

¿Qué es y en que consiste la Amonificación?

El nitrógeno puede ser encontrado en el suelo en forma orgánica o mineral, siendo las orgánicas más comunes el nitrato (NO₃⁻) y el amonio (NH₄⁺), que representan a su vez las formas en que las plantas adquieren el N que requieren para acompañar sus actividades vitales. Este importante proceso forma parte de la dinámica natural y de lenta transformación que sufren los compuestos orgánicos contenidos en el suelo, desde sus formas complejas hasta llegar a convertirse en los iones amonio y nitrato. El proceso de mineralización está conformado por tres etapas básicas y fundamentales de acción sistemática, como son: a) **aminización**: que corresponde a la transformación de las proteínas y compuestos complejos en aminas, b) **amonificación**: mediante el paso de las aminas a amonio y c)

nitrificación: conversión y transformación del amonio en nitrato con un paso intermedio, corto y rápido de formación de nitritos. Los procesos a) y b) están por lo general integrados y son conocidos como amonificación.

En la Figura 4 se expone un resumen genérico que expone de manera integrada y sinóptica la conversión de las estructuras y formas orgánicas hasta llegar a formas minerales disponibles y utilizadas por las plantas, lo cual opera en dos etapas (amonificación y nitrificación) intervenidas por microorganismos (Chaves 2010), como se indica seguidamente:

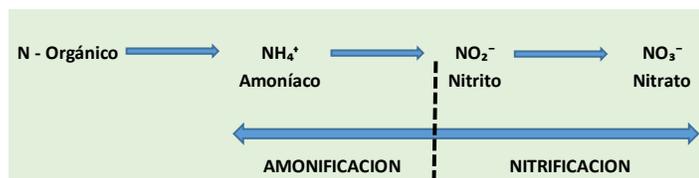


Figura 4. Conversión de formas orgánicas a minerales disponibles para las plantas.

De acuerdo con Fassbender y Bornemizsa (1994) al referirse con detalle a los procesos vinculados con el ciclo del nitrógeno, “La amonificación comprende los primeros procesos de transformación, hasta que las sustancias orgánicas llegan a presentarse como NH_4^+ .” Agregan los mismos autores en ampliación y referencia al mismo proceso, que “A través de la amonificación, las macromoléculas de las proteínas, los ácidos nucleicos y otros, en primer lugar, son despolimerizados por la acción de las enzimas proteolíticas, en peptonas y polipéptidos; estos últimos a su tiempo, se descomponen en aminoácidos. Entre los aminoácidos alifáticos resultantes de esta hidrólisis se encuentran: la glicocola, la leucina, la arginina, la valina, la lisina, la alanina y el ácido aspártico, y entre los aromáticos: la tirosina, la histidina, la prolina, el triptófano y la fenilalanina. Entre las bacterias aeróbicas que participan en esta primera fase de la amonificación se encuentran: *Bacillus subtilis*, *B. cereus*, *B. mesentericus*, *B. megaterium* y *Pseudomonas sp.*, y entre las anaeróbicas: *Clostridium putrificum*, *C. sporogenes*, y *C. tetani*. Entre los hongos participan: *Cephalothecium roseum*, *Trichoderma kőningi*, *Aspergillus sp.*, y *Penicillium sp.*”

Como es conocido, por medio de la mineralización de los compuestos orgánicos (residuos vegetales, animales, humus) recién incorporados al suelo, las macromoléculas estructuradas por proteínas, ácidos nucleicos y otros compuestos de carácter nitrogenado son bioquímicamente depolimerizados (reacción contraria a la polimerización como un mecanismo alterno de reversión) por la acción de las enzimas proteolíticas (catalizan la

hidrólisis de los enlaces peptídicos de las proteínas, resultando la producción de péptidos o aminoácidos libres), lo que implica la conversión, rompimiento o reducción de la cadena principal de los polímeros hasta convertirse en aminoácidos básicos.

Dichos aminoácidos pueden tomar varias vías, pudiendo ser metabolizados e inmovilizados por los microorganismos del suelo, adsorbidos por las arcillas dando lugar a complejos organominerales, incorporados en la fracción del humus, absorbidos y metabolizados por las plantas, o en su caso, mineralizados hasta convertirse en amonio por la acción de los microorganismos (Fassbender y Bornemizsa 1994; Chaves 2010). La dinámica de este proceso es lenta. Asegura Bertsch (1998) al respecto, que “La amonificación de los aminoácidos se produce bioquímicamente a través de procesos de desaminación y descarboxilación, y conduce a la formación de amonio, que ya dentro de la solución del suelo pasa a comportarse como un catión corriente. Este NH_4^+ puede ser: absorbido por las plantas, inmovilizado por microorganismos, adsorbido por el complejo coloidal inorgánico y orgánico, fijado por minerales 2:1 expandibles y oxidado hasta el nivel de nitratos (nitrificación).”

Como se infiere de lo señalado, todo el proceso inicia con la animación de los compuestos orgánicos por medio de la cual los aminoácidos y las aminas son liberados al medio, donde son atacados y rápidamente descompuestos por microorganismos heterotróficos (hongos, bacterias, actinomicetos), a partir de lo cual por procesos de desaminación y descarboxilación se genera el $N-NH_4^+$, como se anota seguidamente en la Figura 5.

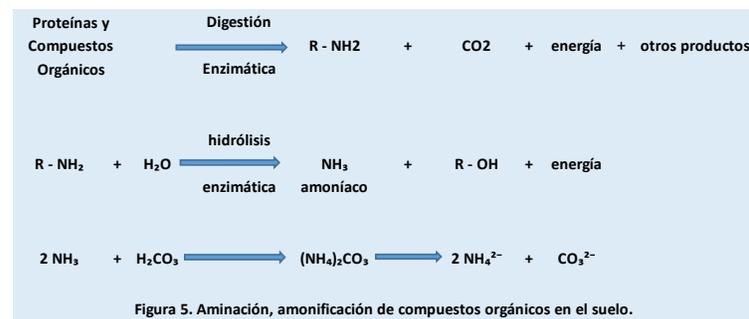


Figura 5. Aminación, amonificación de compuestos orgánicos en el suelo.

Los microorganismos involucrados en estos procesos son por naturaleza muy variados participando bacterias de los géneros *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Serratia* y *Micrococcus*; además de *Aspergillus*, *Penicillium*, *Streptomyces*, *Corynebacterium* y *Achromobacter* en el caso de la descomposición de los ácidos nucleicos (ribonucleasas y

desoxirribonucleasas extracelulares). En esa degradación y descomposición de la materia orgánica también participan hongos de diversos géneros y actinomicetos (bacterias filamentosas del suelo). Como se infiere la actividad biótica es amplia y muy profusa (Fassbender y Bornemiza 1994; Bertsch 1998; Epstein y Bloom 2006; Chaves 1999b, 2010, 2020a; Núñez 2013).

Para atender las necesidades energéticas implicadas en el dinámico y complejo proceso de mineralización de los compuestos orgánicos, los microorganismos emplean varios mecanismos, para lo cual hacen uso del N presente en el medio, consumiéndolo. La relación C/N es un indicador fundamental y muy revelador en este caso, la cual si es mayor a 30 (ej, residuos de arroz y maíz) provoca una disminución temporal en los contenidos de N mineral presentes en el suelo, pues el N existente es en este caso utilizado e inmovilizado por los propios microorganismos en sus procesos vitales volviéndolo no disponible para las plantas. Índices C/N menores de 20 (ej, leguminosas) favorecen por el contrario una descomposición rápida promoviendo el acúmulo de N mineral en el suelo y la liberación de CO₂, lo que habilita la absorción vegetal. En la Figura 6 se expone la relación prevaleciente en este caso con el índice C/N:

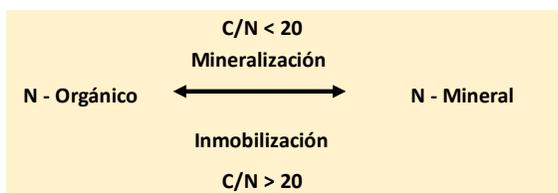


Figura 6. Mineralización de la Materia Orgánica del suelo.

La Figura 7 expone a su vez con detalle la reacción específica involucrada con la formación y pérdida de N por transformación y volatilización de amoníaco (NH₃) en el suelo; la misma se da en condiciones naturalmente alcalinas y también con el NH₄⁺ proveniente de la mineralización de la materia orgánica o de los fertilizantes amoniacales adicionados durante el manejo de la plantación:



Figura 7. Pérdida de N por volatilización.

Señala Núñez (2013) al respecto, que la fracción orgánica de los suelos posee la capacidad de fijar cantidades importantes de amoníaco (NH₃) formando compuestos caracterizados por

poseer una resistencia extraordinaria a la descomposición; en los cuales, pareciera que los grupos hidroxifenólicos están involucrados. Por ello, asegura el autor, que “En los suelos ricos en materia orgánica, los materiales nitrogenados como la urea, el amoníaco, la formamida y la cianamida cálcica pueden reaccionar con el humus, fijándose en formas estables poco aprovechables para las plantas.” Esta consideración debe ser tomada en cuenta al fertilizar plantaciones en el caso particular de los suelos sembrados con caña en el país, donde por su origen pedogenético o ubicación geográfica los contenidos de materia orgánica pueden ser elevados, como acontece con los ordenes taxonómicos de Histosol y Mollisol encontrados en la Zona Norte y Guanacaste; como también en las zonas altas de Turrialba-Juan Viñas y el Valle Central (Chaves 2017, 2019b; Chaves y Chavarría 2017, 2021).

Es interesante hacer notar que cuando se adiciona N en su forma amoniacal, el exceso de carga positiva absorbida por la planta es compensada externamente por la extrusión de iones H⁺, conduciendo con ello a la acidificación de la rizósfera circundante e internamente por la acumulación de aniones inorgánicos (P, S, Cl). La extrusión de H⁺ disminuye la disociación de los radicales carboxílicos de la pared celular, reduciendo con ello su densidad de carga negativa, lo cual incrementa la velocidad de difusión de los aniones a través de los microporos de la pared celular, y su concentración en los locales de absorción activa a nivel de plasmalema (Epstein y Bloom 2006; Núñez 2013).

En su esencia tanto el proceso de mineralización como el de amonificación están intervenidos y son afectados por varios factores del medio, como son entre otros la mineralogía de arcillas y el grado de acidez (pH) presente en el suelo, la temperatura que en regiones tropicales como la nuestra es menos limitante y va más hacia las temperaturas altas, el contenido de humedad, la oxigenación (aireación) del medio, la cantidad y naturaleza de los materiales orgánicos presentes envolviendo su contenido en taninos (compuestos fenólicos).

Se han reportado algunos efectos negativos provocados por la forma amoniacal en las plantas, como mencionaran Fernández y Rossiello (1986), al señalar en referencia a esa forma, que “Por otro lado, NH₄⁺ es tóxico para las plantas, aún en concentraciones relativamente pequeñas (2mM). El NH₄⁺ causa disrupción de las membranas biológicas, interfiriendo con sistemas metabólicos que dependen de la generación y de la manutención de gradientes de potencial oxi-reducción. La absorción excesiva de NH₄⁺ también interfiere marcadamente con las relaciones hídricas de las plantas, causando restricciones al flujo de agua de la raíz a la parte aérea y severo

marchitamiento en especies susceptibles []. La fotosíntesis, por consecuencia, es severamente afectada por niveles tóxicos de NH_4^+ en la planta. El acúmulo y la circulación de NH_4^+ libre en los tejidos vegetales son evitados por la rápida asimilación del $N-NH_4^+$ en forma orgánica. La enzima deshidrogenasa del glutamato (GDH) catalisa la aminación reductora del ácido α -cetoglutárico a glutamato. La enzima sintetasa de la glutamina (GS) catalisa la asimilación de NH_4^+ al grupo amida de la glutamina. La enzima sintetasa del glutamato (COGAT) catalisa la transferencia del NH_4^+ de la glutamina para el ácido α -cetoglutárico, dando origen a dos moléculas de glutamato.”

Asimismo, virtud de sus características y actividad particular, se ha encontrado que el NH_4^+ ejerce un fuerte efecto competitivo sobre los cationes básicos encontrados en el suelo, como es el caso específico del K, Ca y Mg, entre otros; de tal manera que la presencia y absorción de esos nutrimentos por la planta, son más dependientes de las concentraciones de $N-NH_4^+$ que las de $N-NO_3^-$. Las variaciones de pH inducidas por la fuente de N empleada ejerce también un efecto directo sobre los contenidos de micronutrimentos presentes en las plantas, como acontece particularmente con el Zn, B, Fe, Mn, Cu y el Mo. Esta comprobado que el efecto acidificante de los diferentes productos fertilizantes de base amoniacal, esta condicionada a las dosis incorporadas, el nivel de granulación de los mismos, el grado de acidificación (pH) y la capacidad “tampón” del suelo.

Es relevante anotar en este punto, que en su metabolismo natural, las células vegetales poseen la capacidad de convertir rápidamente en su interior el amonio generado por la asimilación del nitrato o la fotorrespiración, en aminoácidos, evitando y obviando con ello la toxicidad del amonio. Denota asimismo la literatura, que la información vinculada con el control de la asimilación radicular de NH_4^+ es muy escasa (Epstein y Bloom 2006).

Pérdidas de nitrógeno por amonificación y volatilización

La **volatilización** se refiere a las pérdidas de N inorgánico que por mecanismos de carácter químico se dan en el suelo en forma de amonio, y que por ser gaseosas, se pierden hacia la atmósfera. El efecto surgido se da al pasar el NH_4^+ a NH_3 volátil. La volatilización resulta de las reacciones químicas que ocurren entre diferentes compuestos nitrogenados inorgánicos presentes en el suelo; como también a los adicionados con los fertilizantes. Se argumenta que esta reacción y pérdida de N ha adquirido mucha importancia y relevancia en los últimos años, debido a razones, como: a) el notorio incremento en el uso de N

en la agricultura, b) el significativo aumento observado en las cantidades (kg/ha) del elemento incorporadas, c) el uso creciente de fuentes amoniales como opción comercial y d) el posicionamiento de la urea como fuente importante para incorporar N, entre otras.

En referencia a pérdidas de N por causa de la volatilización por el uso de fertilizantes agrícolas hay en la literatura mundial muy pocos estudios realizados en condiciones tropicales, que permitan ubicar y contextualizar de alguna manera nuestra realidad nacional; sin embargo, datos como los expuestos por Acquaye y Cunningham (1965) en referencia a pérdidas en 11 formulaciones evaluadas en suelos de Ghana, al aplicar 200 mg de N en 100 g de suelo, contribuyen al conocimiento del tema y permiten concluir con mucha certeza, que en definitiva hay diferencias de fondo en las pérdidas de N por volatilización entre las diferentes formas de nitrógeno.

Cuadro 2.	
Porcentaje de pérdida de N por volatilización del amonio en 11 formulaciones químicas.	
Fuente	N Perdido (%)
KNO_3	0,42
$NH_4H_2PO_4$	0,48
NH_4VO_3	0,5
NH_4NO_3	0,84
NH_4Cl	1,25
$(NH_4)_2SO_4$	1,29
$(NH_4)_2HPO_4$	2,39
NH_4F	6,28
$(NH_4)_2CO_3$	12,04
$(NH_4)_2CO$	16,37
NH_4OH	37,58

Fuente: Acquaye y Cunningham (1965).
Nota: valoración durante los primeros 7 días después de la aplicación

Se encontró adicionalmente en dicho estudio, que las mayores pérdidas ocurrieron en fuentes formuladas a base de amonio, urea y carbonato de amonio; a la vez que hubo factores del medio que intervinieron en dicho comportamiento, como fueron el pH, la CIC y la humedad del suelo, la temperatura, la ubicación del fertilizante y el tiempo transcurrido.

De acuerdo con Fassbender y Bornemizsa (1994) existen diferentes reacciones o mecanismos que favorecen la volatilización del N en el suelo en su forma amoniacal, como son entre otras las siguientes:

- 1) **Suelos con un pH > 7:** opera especialmente en condiciones secas, aunque las mismas sean ocasionales y temporales. La misma puede ser estrictamente inorgánica sobre el amonio generado por la mineralización de la materia orgánica o el incorporado con los fertilizantes. Se dice que las pérdidas pueden ser en este caso de hasta el 25% del N aplicado. La reacción es: $\text{NH}_4\text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3$.
- 2) **Suelos con pH entre 4 y 5:** en los cuales el ácido nitroso (HNO_2) es descompuesto en un medio ácido como sigue: $2 \text{HNO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.
- 3) **Por descomposición de nitritos:** $\text{NH}_4\text{NO}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$.
- 4) **Reacción entre amonio y óxido nitroso:** $\text{NH}_3 + \text{HNO}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$.
- 5) **Reacción de la urea:** $(\text{NH}_2)_2\text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 + 2\text{HNO}_2 \rightarrow 2\text{NH}_4\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{N}_2$.

Asegura Chaves (1999b) al respecto, que “El NH_4^+ formado en el suelo esta sujeto a tomar diferentes destinos:

- a) Convertido por oxidación a NO_2^- y NO_3^- a través de la nitrificación.
- b) Ser absorbido por las plantas.
- c) Ser utilizado (inmovilizado) por organismos heterotróficos en la fase de descomposición de otros residuos orgánicos.
- d) Ser adsorbido en la superficie de las arcillas (1:1 y 2:1) o fijado por algunos tipos de arcilla (2:1) como complejos organominerales.
- e) Incorporarse en la fracción del humus.
- f) Perderse por lixiviación (lavado).”

Como se comentó con anterioridad, acontece que cuando la acidez del medio, suelo en este caso, presenta valores de pH superiores a 7, los iones NH_4^+ pueden si las condiciones lo favorecen transformarse rápidamente al gas amoníaco NH_3 y perderse en esa forma hacia la atmósfera. En condiciones alcalinas con pH naturalmente altos ($\text{pH} > 7$) esas pérdidas son efectivas. Los cambios pueden ser temporales y provocados por el manejo de plantaciones, como acontece con la incorporación de cal durante la corrección de los suelos ácidos. El contenido de humedad prevaleciente en el suelo resulta determinante en la reacción, siendo favorecido por la presencia de condiciones secas (ocasionales, temporales o permanentes).

La literatura indica que los suelos ácidos pierden mucho más N cuando se emplea urea respecto a sulfato de amonio (NH_4SO_4);

lo cual sin embargo se revierte en los suelos calcáreos donde ocurre lo contrario pues en la urea es menor, verificando que las menores pérdidas se dan con el empleo del NH_4NO_3 como lo reporta Núñez (2013). Agrega además el mismo autor, que “Las sales de amonio que reaccionan con el CaCO_3 formando productos de baja solubilidad, son las que pierden más NH_3 ; así mismo el porcentaje de NH_3 perdido es mayor mientras mayor es la dosis de sulfato de amonio aplicado.” Experimentando al respecto, Fenn (1975) encontró al mezclar sulfato de amonio con fosfato monoamónico que el pH del suelo se mantenía en valores bajos y las pérdidas de N por volatilización como amoníaco se reducían en el caso de los suelos calcáreos.

Como se ha comprobado experimentalmente y señalara Bertsch (1998) “La volatilización se eleva con el pH del suelo y con la temperatura. Altas temperaturas incrementan la tasa de hidrólisis de la urea, incrementan la relación $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ al decrecer la solubilidad del NH_3 en el agua, e incrementan las tasas de difusión de gases. La pérdida es máxima a una humedad equivalente al 25% de la capacidad de retención de agua del suelo, y es mayor cuando la CIC es baja. También la presencia de CaCO_3 aumenta las pérdidas.

Se pueden dar pérdidas por volatilización de hasta 50% del fertilizante aplicado, pero lo más común son valores entre 5 y 20%.”

En torno al tema de las pérdidas, indica Chaves (1999b) al respecto, que “Se demostró por parte de Terman (1979), que el porcentaje de pérdida del NH_3 a partir de la urea varió del 10% cuando el pH del suelo era de 5, 0, a 50% cuando este se elevó a 7,5. Esta pérdida será particularmente acentuada si el fertilizante es aplicado superficialmente en suelos secos y con presencia de temperaturas elevadas.

La pérdida de NH_3 en ese mismo experimento fue del 16% cuando la urea se aplicó superficialmente, respecto al 6% al localizarse a 3,8 cm de profundidad. En lo referente a temperatura del suelo, la pérdida amoniacal pasó de 6% a 25% cuando la temperatura varió de 7 a 32 °C.”

Se reporta que bajo condiciones de campo, las pérdidas de N pueden alcanzar valores de 3 a 10% cuando se usa NH_4NO_3 , del 31 al 45% cuando se aplica NH_4SO_4 peletizado (material en pellets o gránulos) y del 25 al 55% cuando el sulfato de amonio se adiciona en solución, incorporados en un suelo con 25% de CaCO_3 libre (Hargrove et al 1977).

Es definitivo que las pérdidas potenciales de $N-NH_4^+$ que pueden ocurrir por este mecanismo en el caso de los fertilizantes amoniacales y la urea, es muy específica y circunstancial para algunas condiciones de campo muy particulares, como son entre otras:

- Temperaturas altas
- Condiciones secas (baja humedad)
- Grados de evapotranspiración elevados
- Suelos naturalmente alcalinos o neutros
- Suelos con baja Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)
- Plantaciones cuya acidez se ha corregido recientemente mediante encalado
- Aplicación superficial del fertilizante
- Adsorción y fijación por arcillas (1:1, 2:1)

La adsorción y fijación del amonio en el suelo como también la incapacidad del sistema radical para poder tomarlo y absorberlo, tienen alguna similitud con lo que ocurre con el ion K^+ , pues ambos nutrientes son retenidos entre las estructuras expandibles de las arcillas 2:1 como las presentes en buena parte de los suelos pesados del orden Vertisol (sonzocuitles), muy comunes en la región cañera de Guanacaste (Chaves 2017, 2019b; Chaves y Chavarría 2017).

Afectación ambiental

Por naturaleza, el amoníaco es un contaminante del aire y un importante precursor para la formación de partículas secundarias. El compuesto posee la capacidad y disposición de poder combinarse con relativa facilidad con otros compuestos de la atmósfera, como sucede particularmente con los ácidos nítrico y las moléculas de sulfato, lo que da lugar a la formación de sales de amonio, una forma muy nociva de partículas finas que en altas concentraciones afectan el ambiente y su entorno.

La forma en que los productos amoniacales afectan e impactan el ambiente son claros y están documentados. En el caso particular del amoníaco se tiene que, al ser una sustancia acidificante, su presencia provoca daños severos en los ecosistemas manifestados en alteraciones ecológicas y pérdida significativa de biodiversidad, incluidos los de naturaleza acuática. La afectación ocurre cuando se produce un exceso de nutrientes de nitrógeno que se filtra a las aguas dulces, como fue oportunamente mencionado y comentado por Chaves (2021f).

A nivel ambiental el amonio induce la acidificación sistemática de los suelos con las graves consecuencias que la alteración del complejo de cambio provoca sobre la disponibilidad de

nutrimentos y la actividad biológica microbial del suelo (Chaves 2021c). Además, el óxido de nitrógeno (N_2O) generado contribuye significativamente al calentamiento global y a la destrucción de la capa de ozono; pudiendo también, las emisiones de amoníaco llegar a perjudicar la biodiversidad (Chaves 2021e).

Experiencias nacionales

La decisión técnico-administrativa de aplicar fertilizantes amoniacales puede traer algunas consecuencias importantes que deben tenerse y tomarse en cuenta al adoptar una decisión. Cuando el empleo de las mismas se realiza en localidades que posean altas temperaturas, los suelos sean alcalinos con índices de pH mayores a 7 (aún neutros) y con prevalencia de condiciones secas, sean permanentes, temporales u ocasionales; conduce a la volatilización directa del amonio (NH_4^+) al convertirlo en amoníaco (NH_3). Es también conocido y referenciado el efecto de incremento que sobre la acidez del suelo (pH bajos) provoca el empleo de esa fuente de N, lo que afecta el complejo de intercambio iónico coloidal. Es un hecho que parte del NH_4^+ incorporado no queda necesariamente disponible para las plantas, lo cual depende entre otros factores de la concentración contenida en el medio y de la actividad microbológica existente; asimismo, de la retención (adsorbido) por los coloides del suelo, lo que depende del tipo de arcillas presente. Sobre este tópico, Blasco y Cornfield (1966) encontraron al estudiar la capacidad de fijación de 8 suelos colombianos, entre 2 y 8 meq de $NH_4^+/100$ g de suelo, siendo los contenidos más bajos los pertenecientes a suelos con presencia de arcillas caoliníticas (1:1) y los mayores las montmorilloníticas (2:1).

El estudio de fuentes nitrogenadas diferentes como opciones comerciales para uso en el campo cañero por parte del sector productor primario nacional, es un tema que ha sido ampliamente abordado en el país tanto a nivel experimental como pragmático, evaluando tanto formulaciones químicas, condiciones agroambientales específicas, manejo agronómico diferencial y variedades cultivadas, entre otra cantidad de variables involucradas, que influyen y en muchos casos determinan las respuestas agroindustriales obtenidas. Seguidamente se exponen algunos de esos resultados considerados representativos, con el objeto de ilustrar y orientar en torno al tema.

Consecuentes con los antecedentes mundiales favorables en los cuales el uso del N en formulaciones y presentaciones anhidras y líquidas ha sido reportado con buen suceso, Subirós y Bertsch

(1996) establecieron una prueba experimental en Filadelfia, Guanacaste (12 msnm), donde se comparó la formulación líquida 31-0-0 (11,5% N-ureico, 9,7% N-nítrico y 9,7 N-amoniaco) y el agua amoniacal (18-0-0) constituida solo por N amoniaco, comparadas contra la urea granulada (46% N-ureico) como referente testigo; todos aplicados en una dosis de 140 kg de N/ha. Luego de transcurridas tres cosechas se encontró que la formulación líquida produjo más caña (10,6 t/ha), mayor concentración de sacarosa en los tallos (11,1 kg/t) y más azúcar (1,2 t/ha) cuando se comparó con la urea granular. Los costos por unidad de N con el uso de la fórmula 31-0-0 fue además un 10% más bajo en relación con la urea. Indican los autores luego de verificar una mejor absorción y contenido de N foliar con el uso del N líquido, que *“En congruencia con la literatura, la combinación de nitratos y amonios parece mantener un mejor balance entre cationes y aniones tanto en la planta como en la rizosfera.”* Como puede concluirse de esa prueba experimental, los resultados ratifican el potencial de uso de las fuentes líquidas en la caña, con lo cual se podrían reducir además las pérdidas de N por volatilización, nitrificación y desnitrificación.

El Cuadro 3 expone por su parte, el resultado final obtenido en un estudio experimental de campo realizado por Barrantes y Chaves (2003) en el distrito de San Pedro, Zona Sur (560 msnm); donde se evaluaron comparativamente luego de cuatro cosechas seis fuentes nitrogenadas de uso comercial. Se empleó la connotada variedad SP 71-5574. Todas las fuentes de N estudiadas superaron al testigo sin N en más de un 11%, lo que ratifica la importancia y alta respuesta del nutriente. Los resultados demuestran que el sulfato de amonio (21% N y 23,7% S) logró la mejor respuesta tanto en producción de caña como de azúcar (t/ha), superando al testigo sin N en un 35,8% y 31,0%, respectivamente; seguida por el nutrasul (27% N y 8,33% S). Es evidente y notoria la buena respuesta de la caña al catión acompañante, en este caso azufre, lo que resulta contundente en el resultado productivo. El nitrato de amonio (33,5% N), el nitramón (20% N y 8% MgO) y la urea (46% N) mostraron diferencia estadística (5%) en producción de caña y las dos últimas en azúcar respecto a la mejor fuente; lo que evidencia que las condiciones ácidas de los suelos del lugar no ofrecen las mejores condiciones para la actividad de esas fuentes. Otra buena cantidad de resultados nutricionales empleando N en la misma región son expuestas por Chaves y Barrantes (2007).

Cuadro 3. Evaluación de 6 fuentes nitrogenadas en un Ultisol de San Pedro, Zona Sur. Promedio 4 cosechas. Variedad SP 71-5574.

Fuente	% N	Cosecha 1		Cosecha 2		Cosecha 3		Cosecha 4		Promedio (t/ha)		PRT *
		Caña	Azúcar	Caña	Azúcar	Caña	Azúcar	Caña	Azúcar	Caña	Azúcar	
Sulfato Amonio	21	114,53	17,47 a	135,64	17,77 a	143,87 a	19,85	145,01 a	20,15 a	134,76 a	18,81 a	131
Nutrasul	27	99,37	14,43 ab	132,28	16,70 ab	137,95 abc	20,77	127,64 abc	19,12 ab	124,31 ab	17,76 ab	124
Nitrato Calcio	15,5	89,74	13,46 b	133,08	17,30 a	140,06 ab	20,36	133,90 ab	19,69 ab	124,20 abc	17,70 abc	123
Nitrato Amonio	33,5	104,79	15,44 ab	130,77	16,87 ab	124,83 abc	17,82	123,76 abc	18,06 ab	121,04 bc	17,05 abc	119
Nitramón	20	96,64	14,83 ab	129,29	16,18 ab	124,62 abc	18,43	122,05 abc	17,15 ab	118,15 bc	16,65 bc	116
Urea	46	96,64	13,82 ab	118,60	14,88 b	119,60 bc	17,61	120,63 bc	17,38 ab	113,87 bc	15,92 bc	111
Testigo (-N)	-	86,84	13,37 b	99,32	13,34 b	109,37 c	15,55	101,42 c	15,16 b	99,24 c	14,36 c	100
Promedio		98,36	14,69	125,57	16,15	128,61	18,63	124,92	18,1	119,37	16,89	
CV (%)		11,63	9,47	9,98	9,85	4,1	8,1	4,83	6,93	7,64	8,7	

Fuente: Barrantes y Chaves (2003).

* PRT: Diferencia respecto al Testigo dada en t/ha.

Fertilización: Planta: 150 kg de N, P₂O₅ y K₂O.

Soca: 150 kg/ha de N y K₂O.

Encalado: 1,0 tonelada de CaCO₃/ha 25 días antes de siembra.

Valores con igual letra en una misma columna no difieren estadísticamente entre sí, según Tuckey 5%.

Buscando comprobar las diferencias que puedan existir en la respuesta agroindustrial cañero-azucarera a partir del uso de diferentes formulaciones de N disponibles en el comercio, Calderón y Chaves (2006) establecieron un estudio en un suelo del orden Ultisol de la localidad de Florencia de Turrialba (788

msnm), donde se evaluaron siete fuentes nitrogenadas empleando la variedad B 77-95. En el Cuadro 4 se exponen los resultados promedio de dos cosechas, en los cuales se infiere que todas las fuentes, excepto la urea granular (46%) fueron mejores que el testigo sin N; por el contrario, la urea + azufre (40% N y

5,6% S) fue la mejor fuente superando al testigo en un 5,3% en producción de caña y un 5,1% en azúcar, respectivamente. No hubo diferencias estadísticas entre las fuentes evaluadas. La

concentración de sacarosa en los tallos medida en kg/t fue afectada negativamente de manera importante cuando se aplicó urea granular y nitrato de amonio.

Cuadro 4. Prueba comparativa de 7 fuentes de nitrógeno en un Ultisol de Florencia, Turrialba. Promedio de dos cosechas. Variedad B 77-95.

Fuente	% N	% Caña			Rendimiento Industrial kg/t	Producción (t/ha)		Relación Sacarosa *	PRT (%) **
		Sacarosa	Pureza	Fibra		Caña	Azúcar		
Urea - S	40	16,27	87,53	11,80	117,62	101,54	12,34	8,75	105,1
Nitrato Potasio	13,5	16,28	87,79	12,21	116,32	102,36	12,33	8,85	105,0
Magnesamón	22	16,47	88,23	11,95	118,47	100,60	12,30	8,61	104,8
Nitrato Amonio	33,5	15,95	87,02	12,10	113,78	101,81	12,05	9,04	102,6
Nitrato Calcio	15,5	16,30	87,92	12,20	116,36	99,82	12,02	8,78	102,4
Sulfato Amonio	21	16,23	87,77	11,73	117,31	99,55	12,01	8,74	102,3
Urea Granular	46	15,79	86,75	12,38	111,38	98,34	11,34	9,25	96,6
Testigo (-N)		16,69	88,37	12,52	118,45	96,46	11,74	8,63	100
Promedio		16,25	87,67	12,11	116,21	100,06	12,02	8,83	
CV (%)		2,89	1,40	4,04	4,14	4,40	6,43		

Fuente: Calderón y Chaves (2006).

* Toneladas de caña necesarias moler para fabricar una tonelada de azúcar.

** PRT: Diferencia (%) respecto al Testigo (T) sin N dada en toneladas de azúcar/ha.

Fertilización: **Planta:** 150, 120 y 150 kg de N, P₂O₅ y K₂O.
Soca: 130 kg de N y K₂O.

Edad de cosecha: **Planta:** 10 meses; **Soca** 12 meses.

En adición y complemento a los datos experimentales anteriores, es de gran valor consultar y revisar con minuciosidad los resultados reportados por Chaves (2016a), en los cuales se evaluó comparativamente la respuesta de 9 fuentes nitrogenadas granulares diferentes en cuanto a forma química, contenido de N y modo de acción en el suelo. El informe expone con gran detalle el resultado específico e integral de los estudios efectuados en las seis regiones productoras de caña en Costa Rica, concluyendo y demostrando la significativa variabilidad que se da en términos geográficos en las respuestas agro productivas de caña (t/ha), azúcar (t/ha), concentración de sacarosa (kg/t) y calidad de los jugos; ratificando la imperiosa necesidad de considerar siempre las particularidades edafoclimáticas y de manejo de cada localidad productora en particular, como reiteradamente lo han señalado y demostrado Chaves (2017, 2019bc, 2020d) y Chaves y Chavarría (2017, 2021).

Conociendo el efecto que las condiciones del entorno imponen sobre la actividad y respuesta de un determinado nutrimento en el suelo, Angulo *et al* (1996) establecieron en un suelo del orden

taxonómico Inceptisol de Cañas, Guanacaste (9 msnm), un estudio en donde se evaluó la forma de aplicación de tres fuentes nitrogenadas; para lo cual el fertilizante se aplicó en dos modalidades: superficial adicionado manualmente e incorporado al suelo (≈ 5 cm) mediante desaporca y aporca mecánica. Las fuentes de N fueron urea (46% N), nitrato de amonio (33,5% N) y sulfato de amonio (21% N y 23,7% S), comparadas contra un testigo sin N. Los tratamientos tuvieron riego durante todo el ciclo vegetativo. Se buscaba en principio conocer el efecto de la temperatura y la humedad tendrían sobre las formas químicas de N aplicado. La respuesta agroindustrial de la variedad Q 96 luego de cuatro cosechas se presenta en el Cuadro 5.

Como se nota en los resultados obtenidos y mostrados hay efectos que alcanzaron diferencia estadística (1%) para la producción de caña y azúcar (t/ha), no mostrando sin embargo las fuentes y la interacción modalidad x fuente alguna significancia probabilística. Hubo efecto negativo del N sobre la calidad y la concentración de sacarosa en los jugos, la cual fue

menos impactante cuando se empleó nitrato de amonio y el fertilizante se incorporó al suelo; asimismo, la producción de caña y azúcar se aumentó al adicionar N, lo que se maximizó con la incorporación y tapado del mismo en el suelo. El nitrato de amonio fue siempre la mejor fuente de N en ambas modalidades, seguida por la urea y el sulfato de amonio. No queda duda que la incorporación del insumo es una buena práctica de manejo que evita las posibles pérdidas del N por volatilización, efecto que

podría verse eventualmente favorecido por el grado de acidez (\approx pH 6,5) y la temperatura del lugar, cuya máxima en los meses secos (enero-abril) es próxima a los 33,7°C con un promedio anual de 33 °C; lo que afectaría en mayor proporción al sulfato de amonio, como pareciera haber sucedido. En términos económicos la aplicación superficial resultó ser sin embargo más rentable por no implicar el uso de maquinaria para efectuar la labor.

Cuadro 5. Efecto de la forma de colocación de tres fuentes nitrogenadas en Cañas, Guanacaste. Promedio de 4 cosechas. Variedad Q 96.

Tratamiento	% en caña			Rendimiento Industrial (kg azuc/t)	Producción (t/ha)		PRT *
	Sacarosa	Pureza	Fibra		Caña	Azúcar	
INCORPORADO							
Urea	16,67	89,26	17,59	128,23	132,46	16,97	131,4
Nitrato Amonio	16,58	88,64	16,67	127,54	136,04	17,28	133,8
Sulfato Amonio	15,95	87,83	17,25	128,02	136,64	16,79	130,1
Promedio	16,40	88,57	17,17	128,02	135,04	17,01	131,8
SUPERFICIAL							
Urea	15,98	89,35	16,95	123,11	136,10	16,73	129,6
Nitrato Amonio	16,63	89,85	16,36	129,83	131,61	17,08	132,3
Sulfato Amonio	15,96	87,96	16,34	122,67	116,96	14,33	111,0
Promedio	16,19	89,05	16,61	125,20	128,22	16,04	124,2
TESTIGO (-N)	16,98	89,27	16,77	131,53	99,45	12,91	100
Promedio General	16,29	88,81	16,89	126,61	131,53	16,52	128,0
CV (%)	5,51	3,49	8,54	7,29	9,58	11,93	
Fuente: Angulo <i>et al</i> (1996).							
Fertilización: Planta: 150, 120, 150 kg/ha de N, P ₂ O ₅ y K ₂ O.							
Soca: 150 y 100 kg/ha de N y K ₂ O							
Edad de cosecha: Planta (9 meses), Soca (12 meses).							
* PRT: Diferencia (%) respecto al Testigo (T) sin N dada en toneladas de azúcar/ha.							

Queda demostrado que las pérdidas de N son mayores y la respuesta productiva menor en suelos próximos a la alcalinidad y con efecto aditivo de la temperatura, en el caso del sulfato de amonio, respecto a la urea, sobre todo cuando la misma se incorpora; en los ácidos ocurre lo contrario.

Sugerencias y recomendaciones para evitar pérdidas de N

Como acontece con cualquier insumo de uso agropecuario, existen medidas y acciones que podrían calificar como protocolarias, que de ser respetadas y sobre todo aplicadas como

procede en estos casos, podrían eventualmente llegar a evitar y/o reducir las posibles y eventuales pérdidas de nitrógeno generadas en este particular por los fertilizantes formulados a base de amonio. Con tal objeto, se proponen y sugieren a continuación algunas recomendaciones técnico-administrativas de ejecución práctica, por medio de las cuales se busca favorecer el uso óptimo, eficiente, rentable, sostenible y ecoeficiente de los fertilizantes amoniacaes en el cultivo de la caña de azúcar. Las acciones que se indican a continuación se considera minimizan y mitigan en algún grado las pérdidas y la contaminación

provocada por amonio y amoniaco, entre las cuales están las siguientes:

- 1) Las condiciones del clima tienen una incuestionable y significativa influencia directa sobre las pérdidas de N, las cuales en el caso de la volatilización vienen asociadas a las altas temperaturas, bajos contenidos de humedad en el suelo y elevada evapotranspiración. Deben por ello, buscarse e implementarse medidas remediales o al menos atenuantes que permitan mitigar en algún grado las mismas.
- 2) Es inconveniente que las plantaciones mantengan el suelo desprotegido sin ninguna cobertura vegetal, sobre todo si no se cuenta con medidas orientadas a su conservación y control de erosión.
- 3) Lo anterior adquiere máxima prioridad si el grado de pendiente del terreno resulta limitante (>8%), lo que obliga adoptar medidas preventivas de contención que reduzcan y minimicen las pérdidas potenciales por escorrentía y erosión.
- 4) El empleo de materia orgánica y la siembra e incorporación de abonos verdes es una práctica de campo muy apropiada para refrescar ambientes, aportar N y elevar la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), lo cual reduce la volatilización (Chaves 2020ab, 2021c).
- 5) Siempre es muy conveniente reducir el laboreo de la tierra y ejecutarlo apenas a lo básico y estrictamente necesario, con el objeto de evitar la oxidación de la materia orgánica y con ello la pérdida de N (Chaves 2020a, 2021b).
- 6) No puede hablarse de nutrición si no se tiene absorción radical, lo que implica necesariamente favorecer y promover labores que contribuyan con la formación, extensión y profundización de las raíces en el suelo.
- 7) Al igual que se recomendó en el caso de los nitratos, la exclusión del amonio en la enunciación del programa de fertilización comercial por aplicar, no representa una medida técnicamente razonable y necesaria, considerando la necesidad y alta respuesta que la caña de azúcar y otros cultivos tienen a esa fuente nitrogenada en particular. Lo prudente y sensato es combinar, complementar y balancear las tres fuentes habituales: urea, nitratos y amonio; buscando siempre su optimización y buen uso, nunca su eliminación.
- 8) Se debe tener claro que la emisión de NH_4^+ y NH_3 al medio tienen como origen las fuentes orgánicas y también mineral generadas a través de los fertilizantes comerciales; lo cual amplía las regulaciones y medidas de control por implantar. Las pérdidas de N por volatilización se generan a partir de la mineralización de compuestos orgánicos, fertilizantes amoniacales y uso de la urea.
- 9) Virtud de su incuestionable relación, es imperativo y obligado conocer con detalle las condiciones climáticas

y edáficas (textura) del terreno de la plantación; esto por cuanto niveles de precipitación altos o en su caso bajos, favorecen la lixiviación, la volatilización, la desnitrificación y la formación de condiciones favorables para dinamizar la pérdida de N en grados importantes (Chaves 2021b).

- 10) El uso del nitrógeno debe coincidir y combinar por función y funcionalidad con las necesidades nutricionales y fisiológicas del cultivo en cada una de las etapas fenológicas de su ciclo vegetativo, lo que implica conciliar las condiciones y características particulares del entorno agroproductivo con las fuentes, dosis, forma y momento más oportuno para aplicar los nutrimentos al suelo, en especial el N. Resulta reiterativo recordar que la mayor absorción de N coincide con los períodos de más rápido crecimiento del cultivo (Chaves 1999ab, 2019a, 2021b).
- 11) La aplicación dosificada y fraccionada del fertilizante nitrogenado, incorporada en la forma adecuada y en el momento fenológico justo y oportuno, es definitivo que mejora su eficiencia y minimiza las pérdidas en este caso por volatilización; lo que permite reducir la dosis necesaria incorporar con alcance y efecto sobre el costo asociado. En localidades con suelos de textura arenosa y regímenes de alta precipitación, es casi obligado fraccionar la adición del fertilizante, como acontece en la Región Norte y Turrialba-Juan Viñas. Lo mismo puede aplicar en condiciones extremas de zonas secas sin o con riego.
- 12) Es imprescindible e inexcusable contar con un análisis (semi o detallado) físico-químico del suelo, que evidencie y determine la fertilización necesaria incorporar de acuerdo con la condición nutricional específica de la plantación; ojalá bajo criterios estrictos apegados a la agricultura de precisión o sitio. Las clásicas, tradicionales e inconvenientes aplicaciones generalizadas en toda la plantación deben quedar en el recuerdo por razones económicas, productivas y ambientales suficientemente demostradas.
- 13) No es secreto para nadie que el uso predominante y continuo de fuentes amónicas, igual que nítricas, puede interferir y condicionar la acidez y modificar el complejo de intercambio del suelo, afectando la solubilidad y disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas. Esta realidad obliga mantener un sano balance y, sobre todo, controlar la acidez intercambiable, el pH y proceder con su corrección y acondicionamiento (hacia arriba y abajo), cuando la situación lo amerite y justifique, empleando para ello enmiendas de calidad de acuerdo con los criterios técnicos aplicados para ese fin y condición específica (Chaves 1999b, 2017, 2020c, 2021ab).
- 14) No puede olvidarse que la volatilización del N se incrementa cuando la acidez del suelo expresada por su valor de pH es alto, superior a pH de 7 y aún en la

neutralidad. Esto obliga a procurar de alguna manera reducir ese índice cuando es pertinente y necesario mediante el uso de materiales apropiados, que incluyen las conocidas y tradicionales fuentes de uso comercial (Chaves 1999c); como también el yeso agrícola (sulfato de calcio) y los sulfatos en general (Chaves 1988, 1991), lo cual aplica para el caso particular de la región productora de caña de Guanacaste y Pacífico Central. Está demostrado que en suelos ácidos se pierde más N a partir de la urea que del sulfato de amonio (NH_4SO_4); aunque en suelos calcáreos ocurre lo contrario, como lo anota Núñez (2013); las menores pérdidas se dan con el empleo del NH_4NO_3 .

- 15) En esta importante materia es imperativo si existe viabilidad técnica y factibilidad económica comprobada, emplear fertilizantes modernos de última generación que incrementen la eficiencia; entre los cuales están los fertilizantes nitrogenados de liberación lenta que ayudan a la dosificación y liberación pausada del N de manera que las pérdidas se reducen y minimizan. Complementariamente 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 acción de la forma amoniacal por más tiempo que es retenida por las arcillas del suelo, no siendo por ello el N susceptible de ser volatilizado como NH_3 o lixiviado y perdido como NO_3^- .
- 16) Buscando satisfacer y consumir los principios básicos y fundamentales que rigen la actividad agropecuaria en la actualidad, como son la productividad, la rentabilidad y la competitividad; cobra incuestionable relevancia la incorporación de la agricultura de precisión en los sistemas agro productivos de caña de azúcar.
- 17) El agua y la humedad edáfica es en definitiva un factor determinante en el caso de las pérdidas por volatilización, sobre todo cuando las condiciones del lugar son secas, sea de forma permanente, temporal u ocasional. Por ello, las aplicaciones de N-NH_4^+ deben ajustarse en lo posible a periodos con precipitación o donde se pueda hacer uso de riego regulado (lámina de agua), especialmente en condiciones de texturas gruesas donde la infiltración es muy amplia por espacio poroso. Es definitivo que la humedad del suelo debe mantenerse en niveles convenientes para evitar la volatilización del N.
- 18) La quema de los restos y residuos biomásicos de cosecha (RAC) no constituye una práctica recomendable desde la perspectiva nutricional, pues limita la liberación y el aporte de N amoniacal al suelo. Se recomienda, por el contrario, reducirlos en tamaño por trituración mediante el empleo de “picadoras” e

incorporarlos al suelo con arado, preferiblemente complementados con materiales orgánicos y abonos verdes (Chaves 2020b).

- 19) Se debe 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. Como se anotó en ocasión anterior por Chaves (2021ef), *“En estos tópicos tan técnicos y complejos no cabe la improvisación ni tampoco vale la experiencia sin conocimiento especializado.”*

Conclusión

El tema abordado en esta ocasión ratifica lo complejo y sensible que resulta el manejo óptimo y deseable del nitrógeno como nutriente esencial y como insumo necesario en cualquier emprendimiento o iniciativa agro empresarial seria y responsable; lo cual debe conducir necesaria e inexorablemente a maximizar y extremar los cuidados y medidas implicadas con su empleo en el campo. Cualquier gestión y esfuerzo técnico-administrativo que se haga en esa orientación, redundará indudablemente en beneficios productivos al lograr una mayor eficiencia del elemento, una mayor rentabilidad al incurrir en menores pérdidas y, también, se alcanzará un importante beneficio ambiental.

No cabe la menor duda que el nitrógeno es un insumo necesario y casi de uso obligado en actividades productivas como la caña de azúcar, que demandan un enorme esfuerzo energético de la planta para ubicarse y mantenerse en niveles agroindustriales competitivos. Lo anterior se torna preocupante cuando valoramos y comprobamos las condiciones limitantes del entorno en que se encuentran las plantaciones comerciales, donde el clima tropical y sus elementos son cambiantes y hasta agrestes, los suelos sufren de una dinámico, progresivo e indeseable proceso de deterioro por degradación (Chaves 2020d), induciendo y provocando que los costos vinculados sean muy elevados, lo que, cotejado con los precios pagados por los productos y derivados comerciales finales, cuestionan y limitan seriamente la posibilidad de poder invertir en tecnología y mejora productiva.

Esta difícil realidad motiva y obliga al agricultor a ser muy consecuente, prudente, juicioso y cuidadoso con la forma de conducir y operar los sistemas de producción de caña de azúcar bajo su responsabilidad, pues caso contrario, difícilmente podrá ubicarse en una situación productiva favorable que satisfaga los condicionamientos que impone el exigente comercio mundial en la actualidad.

Las pérdidas de nitrógeno provocadas en este caso por volatilización como amoníaco son una realidad y deben estar

sucedido en el país en niveles aún no estimados, aunque no se hayan medido y cuantificado en la actividad cañera nacional; lo que debe conducir sin embargo, a establecer los protocolos y las medidas pertinentes necesarias que conduzcan a mitigarlas, evitando pérdidas económicas innecesarias e inconvenientes por impacto agroindustrial, pago por insumos sin valor agregado y afectación del ambiente y los ecosistemas que luego paradójicamente impactarán el sistema productivo.

En materia de nutrición de caña de azúcar se debe tener siempre presente que no debe haber mayor desgaste en buscar la mejor fuente nitrogenada para la localidad productora, pues son las características y propiedades edáficas, climáticas y de manejo de la localidad y unidad productiva particular, las que en definitiva determinan las formulaciones con mayor potencial de éxito productivo y económico puedan tener, expresado esto en una mayor concentración de sacarosa (kg/t), mejor calidad (%) de jugos y más alta productividad de caña y azúcar (t/ha).

Literatura citada

- 1) Acquaye, D.K.; Cunningham, R.K. 1965. **Losses of nitrogen by ammonia volatilization from Surface-fertilized tropical forest soils.** Tropical Agriculture (Trinidad) 42: 281-292.
- 2) Angulo, A.; Chaves, M.; Guzmán, G. 1996. **Efecto de la forma de colocación de tres fuentes de fertilizante nitrogenado sobre los rendimientos agroindustriales de la caña de azúcar, promedio de cuatro cosechas, en un Inceptisol de Cañas, Guanacaste.** En: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, Congreso Nacional de Fitopatología, 3, Congreso Nacional de Suelos, 2, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: *Suelos*. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA, julio. Volumen III. p: 154. *También en:* Congreso de ATACORI "Cámara de Productores de Caña del Pacífico", 10, Hotel Sol Playa Hermosa, Guanacaste, Costa Rica, 1996. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica, setiembre. p: 30.
- 3) Barrantes, J.C.; Chaves S., M. 2003. **Efecto de seis fuentes nitrogenadas sobre la producción agroindustrial de caña de azúcar (*Saccharum spp*), en un Ultisol de Pérez Zeledón, Costa Rica. Promedio de 4 cosechas.** En: Congreso de ATACORI "Ing. Agr. José Luis Corrales Rodríguez", 15, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 2003. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), setiembre. p: 299-304.
- 4) Blasco, L.M.; Cornfield, A.H. 1966. **Fixation of added ammonium and nitrification of fixed ammonium in soil clays.** Journal of the Science of Food and Agriculture 17: 481-484.
- 5) 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.
- 6) Calderón Araya, G.; Chaves S., M. 2006. **Evaluación de siete fuentes de Nitrógeno sobre la producción agroindustrial de la caña de azúcar, variedad B 77-95, en un Ultisol de Florencia, Turrialba. Promedio de dos cosechas.** En: Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 16, Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 16. Heredia, Costa Rica, 2006. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), agosto. Tomo II. p: 782-785.
- 7) Chaves Solera, M.A. 1988. **Efeito de Relações Ca:Mg, utilizando Carbonatos e Sulfatos, sobre o crescimento e a nutrição mineral da cana-de-açúcar.** Tesis Magister Scientiae. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 186 p. Chaves Solera, M.A. 1990. Características de calidad de los correctivos de acidez del suelo. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, octubre. 12 p.
- 8) Chaves Solera, M.A. 1991. **Características y uso potencial del yeso en la agricultura costarricense.** Revista del Colegio de Ingenieros Agrónomos (Costa Rica) 4(7):18-20.
- 9) Chaves, M. 1999a. **Nutrición y fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica.** En: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: *Recursos Naturales y Producción Animal*. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED, julio. Volumen III. p: 193-214. También en: Participación de DIECA en el XI Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, julio 1999. p: 46-67.
- 10) Chaves Solera, M. 1999b. **El Nitrógeno, Fósforo y Potasio en la caña de azúcar.** San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, setiembre. 130 p.
- 11) Chaves, M. 1999c. **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.
- 12) Chaves Solera, M. 2001. **Fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica: experiencias de los Últimos 20 Años (Periodo 1980-2000).** En: Congreso Latinoamericano, 15 y Congreso Cubano, 5, de la Ciencia del Suelo, Varadero, Cuba, 2001. Programas y Resúmenes. Varadero, Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. 2001. Nov. 11-16. Boletín N° 4. p: 114. *También en:* En: Congreso de ATACORI "Ing. Agr. José Luis Corrales Rodríguez", 15, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 2003. Memoria. San José,

- Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), setiembre. p: 49-54.
- 13) Chaves Solera, M.; Barrantes Mora, J.C. 2007. **Nutrición de la caña de azúcar en la zona sur de Costa Rica: experiencias continuadas durante el periodo 1986-2006.** San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, setiembre. 30 p.
 - 14) Chaves Solera, M. 2010. **Dinámica del Nitrógeno en el suelo y la planta de caña de azúcar.** San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, noviembre. Presentación Electrónica en Power Point. 57 Láminas.
 - 15) Chaves Solera, M. 2012. **Comparativo de la fertilización aplicada a las plantaciones comerciales de caña de azúcar en Costa Rica.** En: Congreso Tecnológico DIECA 2012, 5, Coopvectoria, Grecia, Alajuela, Costa Rica. Memoria. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), 5, 6 y 7 de setiembre del 2012. 30 p.
 - 16) Chaves Solera, M.A. 2016a. **Estudio de 9 fuentes de Nitrógeno realizados en 6 regiones productoras de caña de azúcar de Costa Rica: compendio de resultados.** Liberia, Guanacaste, Costa Rica, abril. Presentación Electrónica en Power Point. 107 Láminas.
 - 17) Chaves Solera, M.A. 2016b. **Resultados de investigación con el uso del Nitrógeno en la caña de azúcar en Costa Rica.** En: Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Latinoamérica y El Caribe (ATALAC), 10, y Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de México (ATAM), 38. Memoria Digital y Resúmenes. Setiembre 2016, Veracruz, México. 26 p.
 - 18) Chaves Solera, M.A. 2016c. **El Nitrógeno como factor de productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica.** En: Congreso Nacional Agropecuario, Forestal y Ambiental, 14, Centro de Conferencias del Hotel Wyndham Herradura, Heredia, Costa Rica, 2016. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Colegio de Ingenieros Agrónomos de Costa Rica, octubre 27 al 29. 9 p.
 - 19) Chaves Solera, M.A. 2017. **Suelos, nutrición y fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica.** En: Seminario Internacional Producción y Optimización de la Sacarosa en el Proceso Agroindustrial, 1, Puntarenas, Costa Rica, 2017. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), octubre 10 al 12, Hotel Double Tree Resort by Hilton. 38 p.
 - 20) 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.
 - 21) Chaves Solera, M.A. 2019a. **Clima y ciclo vegetativo de la caña de azúcar.** Boletín Agroclimático 1(7): 5-6, julio.
 - 22) Chaves Solera, M.A. 2019b. **Entornos y condiciones edafoclimáticas potenciales para la producción de caña de azúcar orgánica en Costa Rica.** En: Seminario Internacional: Técnicas y normativas para producción, elaboración, certificación y comercialización de azúcar orgánica. Hotel Condovac La Costa, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 2019. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 15, 16 y 17 de octubre, 2019. 114 p.
 - 23) Chaves Solera, M.A. 2019c. **Ambiente agro climático y producción de caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(18): 5-10, noviembre-diciembre.
 - 24) Chaves Solera, M.A. 2020a. **Materia orgánica y disponibilidad de nitrógeno para la caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(21): 6-16, octubre.
 - 25) Chaves Solera, M.A. 2020b. **Abono verde, consociación y rotación de cultivos en caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(22): 5-19, octubre.
 - 26) Chaves Solera, M.A. 2020c. **Clima, acidez del suelo y productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(18): 8-17, agosto.
 - 27) Chaves Solera, M.A. 2020d. **Clima, degradación del suelo y productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(15): 5-13, julio.
 - 28) Chaves Solera, M.A. 2021a. **Estrés mineral y caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(11): 5-21, mayo.
 - 29) 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.
 - 30) Chaves Solera, M.A. 2021c. **Fijación biológica de nitrógeno atmosférico (N₂) por la caña de azúcar: un importante potencial por aprovechar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(15): 7-24, julio.
 - 31) 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.

- 32) Chaves Solera, M.A. 2021e. **Óxido nitroso (N₂O) y uso del nitrógeno en la caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(19): 5-29, setiembre.
- 33) Chaves Solera, M.A. 2021f. **Nitrificación y pérdidas potenciales de nitrógeno en suelos cañeros.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(20): 6-24, setiembre.
- 34) 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.
- 35) Epstein, E.; Bloom, A. 2006. **Nutrição Mineral de Plantas: Principios e Perspectivas.** 2 edic. Trad. Maria Edna Tenório Nunes. Londrina, Brasil. Editora Planta. 403 p.
- 36) Fassbender, H.W.; Bornemisza, E. 1994. **Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina.** Hans W. Fassbender y Elemer Bornemisza. 2ª. Ed. Rev. San José, CR: IICA. 420 p.
- 37) Fenn, L.B. 1975. **Ammonia volatilization from Surface applications of ammonium compounds on calcareous soils: III. Effects of mixing low and high loss ammonium compounds.**
- 38) Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 39(2): 366-368.
- 39) Fernandes, M.S.; Rossiello, R.O.P. 1986. **Aspectos do metabolismo e utilização do nitrogênio em gramíneas tropicais.** Em: Simpósio sobre Calagem e Adubação de Pastagens. Editado por Herbert Barbosa de Mattos e outros. Nova Odessa, São Paulo: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato (POTAFOS). p: 93-123.
- 40) Hargrove, W.L.; Kissel, D.E.; Fenn, L.B. 1977. **Field measurements of ammonia volatilization from surface applications of ammonium salts to a calcareous soil.** Agron. J. 69: 473-476.
- 41) Malavolta, E. 1979. **ABC da Adubação.** 4a ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda. p: 25-39.
- 42) Malavolta, E. 1980. **Elementos de Nutrição Mineral de Plantas.** São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda. 254 p.
- 43) Malavolta, E. 1981. **Manual de Química Agrícola: Adubos e Adubação.** 3ª edic. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda. p: 31-96.
- 44) Meléndez, G.; Molina, E. 2003. **Fertilizantes: características y manejo.** CIA/UCR/ACCS/COSTACAN. San José, Costa Rica, 18-19 julio. 139 p.
- 45) Núñez Escobar, R. 2013. **El suelo como medio natural en la nutrición de los cultivos.** En: Nutrición de Cultivos. 1ª edición. Gabriel Alcántar González y Libia Trejo Tellez, coordinadores. Colegio de Postgraduados. Mexico. p: 93-157.
- 46) Subirós, J.F.; Bertsch, F. 1996. **Utilización de nitrógeno líquido en caña de azúcar en un Inceptisol de Filadelfia, Guanacaste.** En: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, Congreso Nacional de Fitopatología, 3, Congreso Nacional de Suelos, 2, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: *Suelos*. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA, julio. Volumen III. p: 152.
- 47) Terman, G.L. 1979. **Volatilization Losses of Nitrogen as ammonia from Surface-Applied Fertilizers, organic Amendments and Crop Residues.** Advances agronomy 31: 189-223.
- 48) Wikipedia. 2021. **Amonificación.** Consultado el 01 de octubre 2021. Disponible en: <https://www.google.com/search?q=Amonificacion+en+suelos&oq=Amonificacion+en+suelos&aqs=chrome..69i57j1423o1j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

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