

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 23 DE AGOSTO AL 05 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.

La región azucarera Guanacaste Este registró lluvia superior a 30mm durante el 23 y 25 de agosto, además del 3 de setiembre; mientras Guanacaste Oeste durante el 23, 25 y 26 de agosto; Norte el 31 de agosto; Puntarenas el 23, 26, 27 y 31 de agosto; Valle Central para el 23 y 31 de agosto; Sur durante 23 y 30 de agosto, además del 5 de setiembre; Turrialba solamente el 24 de agosto.

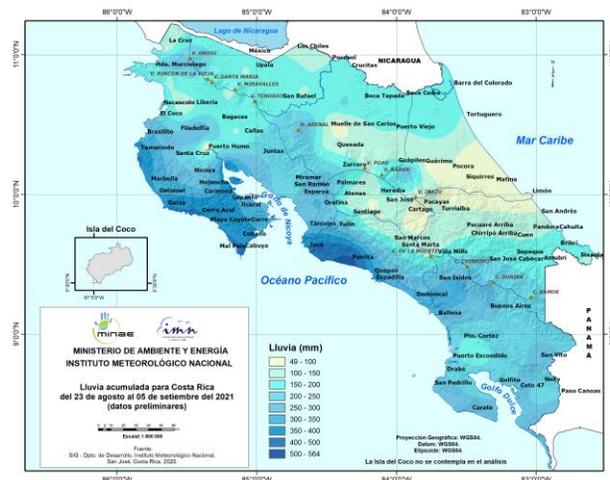


Figura 1. Valores acumulados de la precipitación (mm) durante la quincena del 23 de agosto al 05 de setiembre del 2021.

## PRONÓSTICO PARA LAS REGIONES CAÑERAS DEL 06 DE SETIEMBRE AL 12 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 inicia la semana con viento del Este, cambiando a Oeste el martes; mostrando más humedad de miércoles a sábado y temperaturas medias más elevada en la segunda mitad de semana. Guanacaste (Este y Oeste) presentará viento Este hasta el miércoles, seguido de oestes; con contenido de humedad variable y máximos entre viernes y sábado; así como reducción paulatina de la temperatura media. Valle Central (Este y Oeste) inicia la semana con viento del Oeste, seguido de viento variable; contenido de humedad alto a partir del martes y temperatura media más alta en la primera mitad de semana. Para Turrialba (Alta y Baja) se prevé viento dominante del Oeste hasta el miércoles, seguido de viento del Este; humedad media en la primera mitad de semana y alta en la segunda; con temperatura media más baja lunes y martes. En la región Sur se espera viento del Oeste hasta el miércoles y luego variable; contenido de humedad variable de medio a alto, con máximos viernes y sábado; y temperatura media variable. Puntarenas inicia la semana con humedad media, seguida de humedad alta; así como viento y temperatura media variable.

*“No se prevén ondas tropicales esta semana afectando el país.  
El huracán Larry **no tendrá** influencia indirecta ni directa sobre Costa Rica.”*

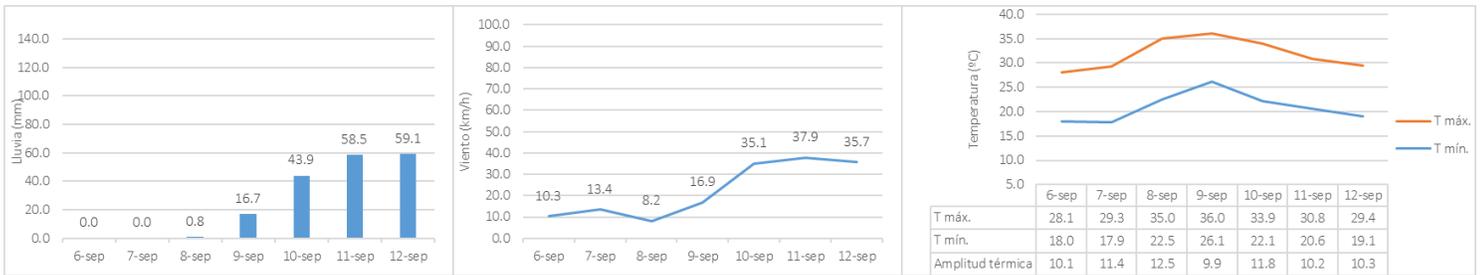


Figura 2. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 06 de setiembre al 12 de setiembre en la región cañera Guanacaste Este.

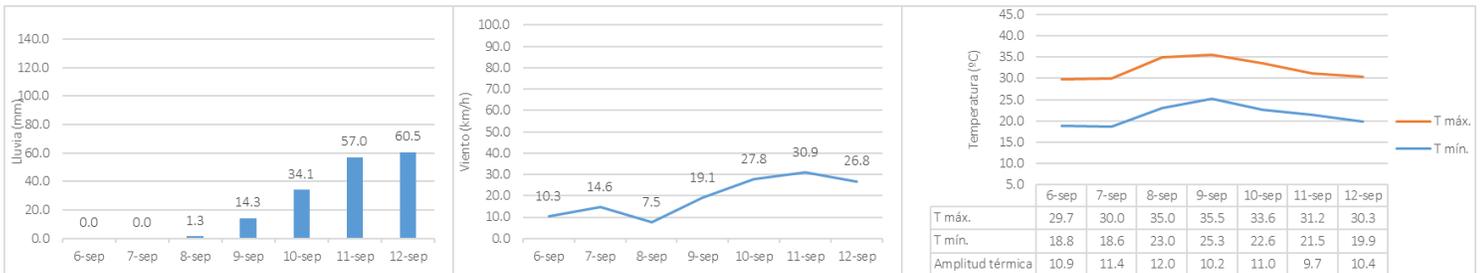


Figura 3. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 06 de setiembre al 12 de setiembre en la región cañera Guanacaste Oeste.

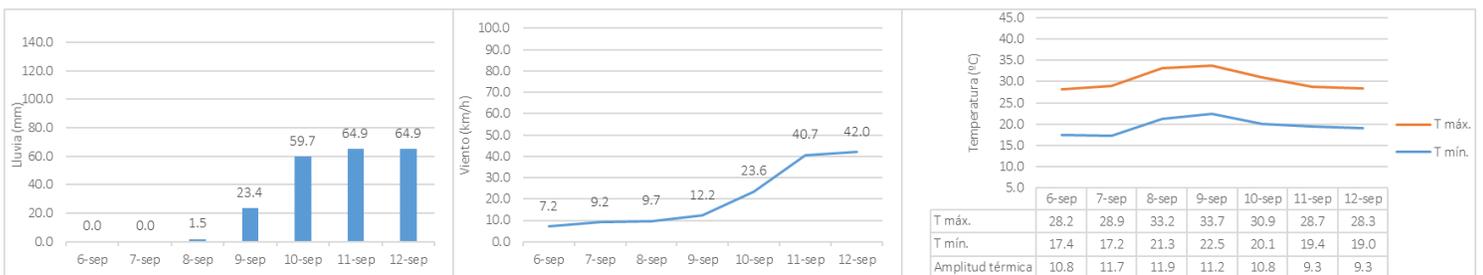


Figura 4. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 06 de setiembre al 12 de setiembre en la región cañera Puntarenas.

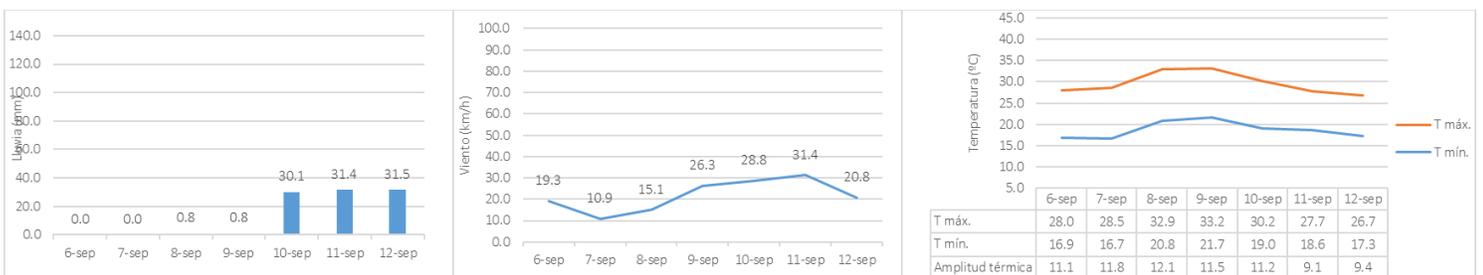


Figura 5. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 06 de setiembre al 12 de setiembre en la región cañera Zona Norte.

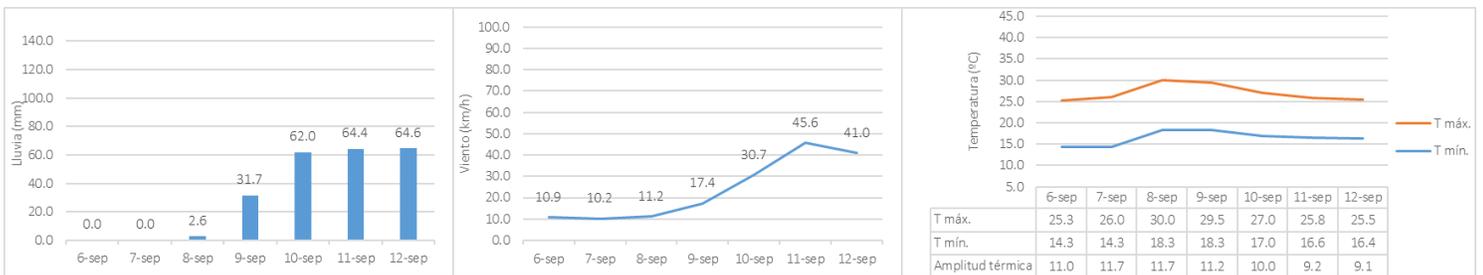


Figura 6. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 06 de setiembre al 12 de setiembre en la región cañera Valle Central Este.

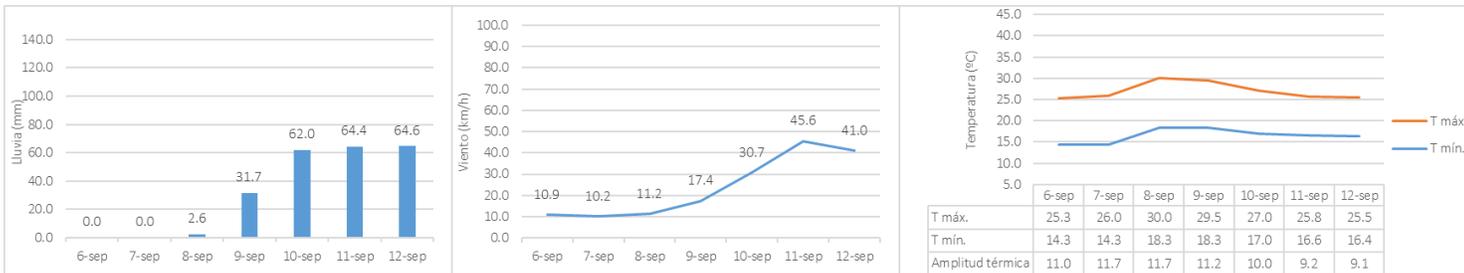


Figura 7. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 06 de setiembre al 12 de setiembre en la región cañera Valle Central Oeste.

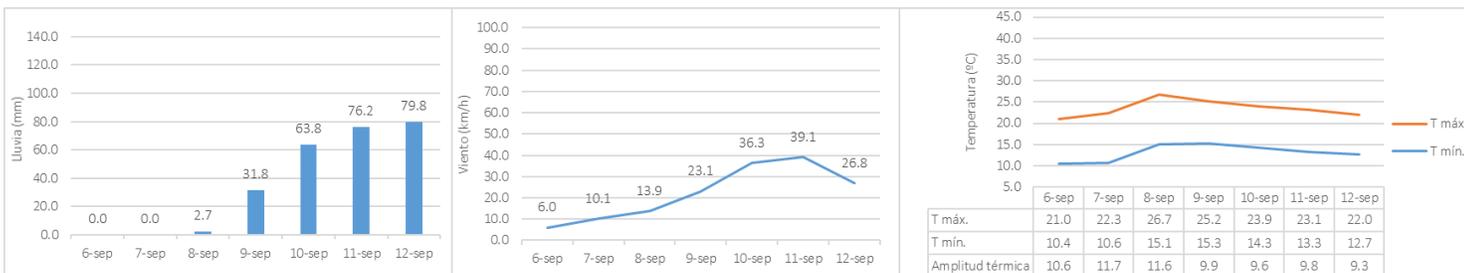


Figura 8. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 06 de setiembre al 12 de setiembre en la región cañera Turrialba.

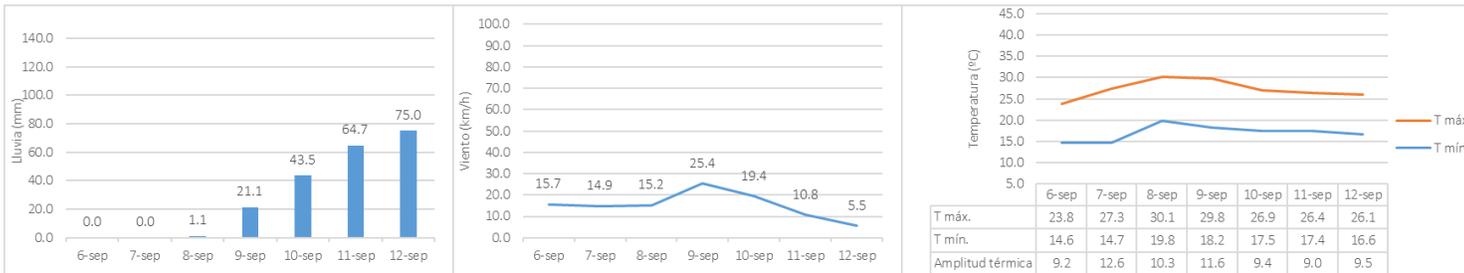


Figura 9. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 06 de setiembre al 12 de setiembre en la región cañera Zona Sur.

## TENDENCIA PARA EL PERIODO DEL 13 DE SETIEMBRE AL 19 DE SETIEMBRE

Se prevé una semana típica de estación lluviosa. De momento no es posible definir si tendremos el paso de la onda tropical #34 en esta semana, ya que cualquier disturbio, como el que podría convertirse en la onda tropical #34, puede interactuar con el huracán Larry y de esta forma desaparecer, por tanto, no afectaría el país.

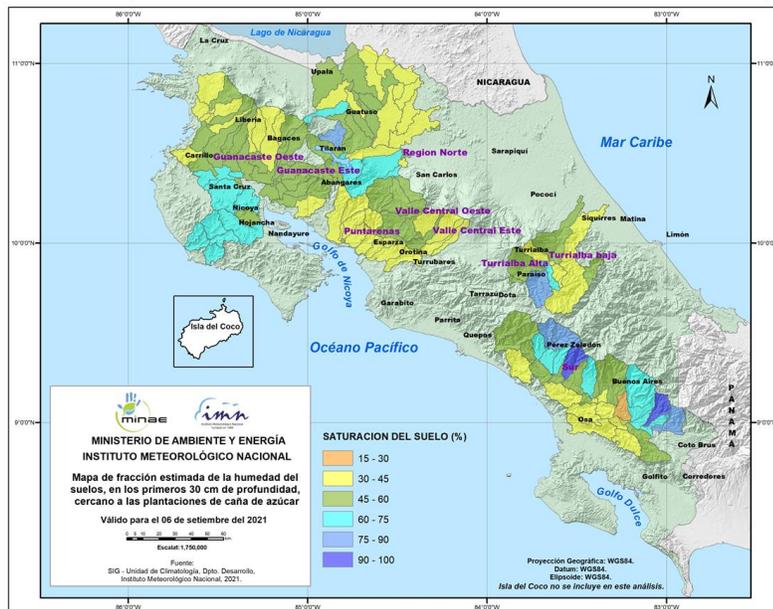
Durante el inicio de semana la Región Norte mantendrá viento variable durante la primera mitad de la semana, acompañado de alto contenido de humedad y temperatura variable. Guanacaste (Este y Oeste) presentará viento dominante del Oeste, además de contenido de humedad medio y temperatura variable en los primeros días de la semana. Valle Central (Este y Oeste) mostrará viento dominante del Oeste; así como alto contenido de humedad y temperatura media variable. Para Turrialba (Alta y Baja) se prevé que la semana de inicio con viento variable, con alta humedad y temperatura media fluctuante. En la Región Sur se espera un inicio de semana con viento variable, condiciones de alta humedad y temperatura variable. Puntarenas inicia la semana con humedad variable entre media y alta, así como viento y temperatura media variable.

## 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 30 de agosto al 05 de setiembre de 2021 se presentó alta saturación en los suelos de la Región Norte, Región Sur, en las regiones de Turrialba Alta y Turrialba Baja y en Guanacaste Oeste; las demás regiones cañeras tuvieron menor porcentaje de humedad.

Como se observa en la figura 11, la Región Guanacaste Oeste presenta entre 30% y 75%, mientras que la Región Guanacaste Este tienen entre 30% y 60%. La Región Puntarenas está entre 30% y 45%; las regiones Valle Central Oeste y Valle Central Este están entre 30% y 60%.

El porcentaje de humedad de la Región Norte está entre 30% y 90%; la Región Turrialba Alta (> 1000 m.s.n.m.) tiene entre 30% y 90% y la Región Turrialba Baja (600-900 m.s.n.m.) presenta entre 30% y 60%. 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 06 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](http://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

Óxido nitroso ( $N_2O$ ) y uso del nitrógeno en la caña de azúcar

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

chavessolera@gmail.com

Especialista en el Cultivo de la Caña de Azúcar

El cambio climático y el calentamiento global mantienen un enorme protagonismo y relevancia mundial en la actualidad, la cual se torna cada vez más incidente, significativa y globalizante virtud de que sus efectos e impactos negativos, manifestados como sequías, inundaciones, altas y bajas temperaturas, huracanes, tormentas y cambios meteorológicos, son cada vez más frecuentes e intensos, lo que ya no es ninguna excepción ni hecho casual o fortuito, sino una realidad con la que debemos convivir. Por cambio climático se identifica el cambio sufrido por el factor clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que interviene y modifica la composición de la atmósfera a nivel global, la que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. No cabe la menor duda, que el fenómeno global que viene sufriendo e impactando a nuestro planeta por esta causa exige del esfuerzo de todos los sectores para poder abordarlo con capacidad, pero, sobre todo, poder mitigarlo, contornarlo y resolverlo con efectividad en el menor tiempo posible. Los cambios que se observan en nuestro país son en la actualidad de características realmente alarmantes, con perspectivas futuras muy preocupantes caso no se actúe pronto con la decisión y determinación requeridas.

El tema ambiental visualizado desde las diferentes perspectivas y manifestaciones que presenta, valoradas e interpretadas como cambio climático, emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), calidad del aire, calentamiento de la atmósfera, pérdida de biodiversidad, contaminación y otras expresiones fácilmente perceptibles que van en definitiva en detrimento de la calidad de vida, merecen toda la atención y prioridad en busca de su mitigación y de ser viable su solución definitiva. En el tema atmosférico es conocido que las concentraciones de los gases que naturalmente lo componen, se mantuvieron históricamente relativamente estables hasta hace cerca de 300 años, cuando sustancias de procedencia tanto natural y sintética han elevado de manera sistemática y preocupante sus contenidos en la tropósfera, principalmente inducidas por causa de acciones antropogénicas de origen humano o derivado de la actividad del hombre.

Benavides y León (2007) hacen un excelente planteamiento y desarrollo del tema, indicando que algunos GEI surgen de manera natural, pero están influenciados directa o indirectamente por las

actividades humanas, mientras que otros son totalmente de origen antropogénico. Los principales gases que surgen naturalmente son: vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), ozono ( $O_3$ ), metano ( $CH_4$ ) y óxido nitroso ( $N_2O$ ). Los principales grupos de GEI completamente antropogénicos son: clorofluorocarbonos (CFC), hidrofluorocarbonos (HFC) e hidroclorofluorocarbonos (HCFC) (a los que se denomina colectivamente halocarbonos), y las especies totalmente fluorinadas, como el hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ ). Es un hecho comprobado que la humanidad está alterando de manera rápida la concentración de los GEI y los aerosoles, que influyen en el clima y a la vez, son influidos por éste.

El origen de los cambios en la composición gaseosa principalmente en las concentraciones de  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $NO_x$  y otros elementos es atribuido a fuentes biogénicas y antropogénicas, siendo las primeras naturales provocadas por seres vivos, erupciones volcánicas, incendios forestales, emisiones marinas, procesos digestivos animales, entre otras; las segundas, por causa de procesos industriales, uso de combustibles fósiles en vehículos de combustión, climatización de espacios físicos, hábitos culturales y alimenticios, laboreo de tierras y uso de fertilizantes en la agricultura, entre otras fuentes varias. Es importante manifestar que el efecto GEI siempre ha existido y es por ello un proceso natural; lo grave, sin embargo, es que las emisiones antropogénicas en activo y desproporcionado crecimiento superan de manera ostensible a las de origen natural provocando el significativo desbalance observado hoy día. La desproporción y el impacto es tan fuerte que algunas fuentes aseguran de manera figurada, que, serían necesarias 3.500 erupciones del Monte Santa Elena (ubicado en el condado de Skamania, estado de Washington, región del Pacífico Noroccidental de los Estados Unidos) para igualar las emisiones de  $CO_2$  que provoca el ser humano en un año.

En lo particular está comprobado que la mayoría de las actividades desarrolladas por el ser humano presentan una tendencia al crecimiento en cuanto al consumo de energía en sus diferentes formas, de lo cual el sector de la agricultura no está para nada exento, con sus consecuentes efectos negativos sobre la competitividad de los productos (costos asociados) y particularmente sobre los sistemas de producción, el ambiente y los ecosistemas.

Es indudable y no cabe la menor duda en aceptar y reconocer en materia agrícola, que los fertilizantes son en la actualidad incuestionablemente necesarios y determinantes para nuestra sociedad altamente consumidora, ya que gracias a ellos se puede mejorar la productividad de los cultivos, considerándolos después del agua, la luz y la temperatura como el factor (nutricional) en importancia, ya que aportan trascendentales beneficios en la producción de alimentos básicos y biocarburantes en muchos lugares donde son utilizados. Pero, al igual que sucede con otros factores y elementos, tales como la energía o el agua, estos insumos son bienes limitados y escasos que hay que saber maniobrar de manera muy eficiente, tanto en su producción como en su aplicación, procurando optimizar los rendimientos de los cultivos en el marco y estricto apego de las políticas y estrategias del desarrollo sostenible, el respeto al ambiente y la ecoeficiencia.

Resta comentar en torno a que los cultivos necesitan de varios nutrimentos para poder crecer y desarrollarse en óptimas condiciones para completar su ciclo vegetativo natural y poder alcanzar producciones satisfactorias. En este particular la fertilización comercial tradicional se basa principalmente en la adición de tres elementos básicos nombrados primarios: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K); entre los cuales el nitrógeno es el nutrimento del suelo más absorbido por las plantas en condiciones normales de cultivo. Esto no implica ni significa de manera alguna que las plantas no requieran de otros elementos, pues la nutrición es un concepto amplio y complejo de contenidos, interacciones, sinergismos y antagonismos entre nutrimentos, donde todos cumplen una función y ejercen una funcionalidad muy particular y específica, como lo han expuesto con profundidad Malavolta (1981), Fassbender y Bornemisza (1994), Chaves (1999ab, 2021a), Mengel y Kirkby (2001), Epstein y Bloom (2006), entre muchos otros.

La fertilización nitrogenada tiene como fin y objetivo fundamental e inmediato, satisfacer las necesidades nutricionales del cultivo, en este caso la caña de azúcar, mediante los aportes orgánicos y/o minerales necesarios incorporar para complementar lo que el suelo por su condición no es capaz de suministrar en consideración a su grado de fertilidad natural o actual.

El empleo de grandes cantidades de fertilizantes comerciales formulados a base de fuentes nitrogenadas para satisfacer las crecientes necesidades de la agricultura industrial actual ha incrementado consecuente y adicionalmente de manera muy significativa las emisiones de óxido nitroso ( $N_2O$ ), constituyéndose por ello en la principal actividad emisora de este contaminante atmosférico generador del inconveniente calentamiento por causa de los Gases Efecto Invernadero (GEI). A lo anterior debe agregarse la contaminación de fuentes hídricas por causa de los nitratos generados. Adicionalmente, debido a la gran cantidad de energía implicada en su

fabricación, los fertilizantes constituyen el insumo con mayor componente energético de la producción agrícola, lo que también suma al problema ambiental. Se estima con buen criterio, que, si excluimos y omitimos las emisiones derivadas a partir de los cambios promovidos en el uso del suelo, la fuente de emisión más importante y significativa de la agricultura la representan los fertilizantes nitrogenados, lo que es determinante.

Consecuentes con esta circunstancia tan actual y preocupante, se expone y desarrolla en el presente documento el tema de la fertilización nitrogenada y la producción de óxido nitroso ( $N_2O$ ), con lo cual se busca un abordaje de la práctica desde la perspectiva ambiental, considerando la cantidad de gas que pudiera estar siendo emitido por la adición de nitrógeno en las plantaciones comerciales de caña de azúcar del país. Se espera con el abordaje y desarrollo del tema, conocer con más especificidad y detalle sobre las consecuencias que genera el uso del nitrógeno incorporado con la fertilización y su contribución al calentamiento de la atmósfera y al cambio climático, mediante la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI); de manera que contribuya a formular planes, programas y estrategias técnicas que conduzcan a operar con un uso racional y óptimo del N para fines productivos y ambientales.

#### Preocupación por el ambiente

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.

La situación actual proyectada al futuro inmediato motiva y justifica la honda preocupación que existe sobre el porvenir del ambiente y el planeta. El crecimiento extraordinario y desproporcionado que viene experimentando la población mundial en pocos años, el consecuente aumento del consumo alimentario per cápita, la carencia y pérdida incremental y continua de recursos y valiosos ecosistemas naturales, constituyen indicios de la grave afectación provocada por la acción del hombre (Bermejo, 2010/11).

En este particular, la agricultura moderna es considerada por varios sectores con argumentos válidos, como uno de los factores que incuestionablemente contribuye a la solución del imperioso problema alimentario mundial, pero a la vez, en una relación paradójica e incongruente, representa una de las fuentes principales de origen de los males que aquejan los ecosistemas por causa de la deforestación, la contaminación por eutrofización de las aguas, el uso de agroquímicos tóxicos, la sobreexplotación y degradación de los suelos, el empleo de prácticas de manejo inconvenientes, los desequilibrios ecológicos, fito y zoo sanitarios, la pérdida de recursos naturales valiosos e insustituibles, entre muchos otros males que día a día se revelan. Resulta cierto reconocer, que los tópicos relacionados con la agricultura, la producción sostenida de suficientes alimentos de calidad y el ambiente son muy complejos y profundos en su naturaleza y dinámica, lo que ha dado lugar al debate público y la crítica severa y hasta excesiva de algunos sectores, principalmente ambientalistas.

Es verificable como durante los años 60 y 70 y como resultado de la gran demanda mundial por alimentos que surgió a nivel mundial, el incremento que se dio en el uso de los fertilizantes nitrogenados sintéticos fue espectacular, tanto en regiones en donde la agricultura estaba ya desarrollada como en zonas agrícolas en vías de desarrollo, como es el caso nacional. Este notable, desbordado y desproporcionado incremento en el uso de fertilizantes en estas décadas, se relaciona principalmente con el bajo costo de estos en comparación con los incuestionables beneficios económicos obtenidos con su empleo. Sólo las crecientes y cada vez más rígidas restricciones ambientales, debido a la contaminación de las aguas con nitratos y el efecto atmosférico por GEI, vendrían en la última década del siglo XX a limitar y reprimir el uso indiscriminado de los abonos nitrogenados. En el siglo XXI son el cambio climático y las políticas de ahorro y eficiencia energética derivadas, las que motivan un uso eficiente de este importante recurso, por otra parte, imprescindible en la agricultura moderna.

Puede asegurarse por todo esto, que la valoración y juzgamiento de las prácticas y procedimientos agronómicos empleados actualmente en producir alimentos, entre los que se incluyen el azúcar y sus derivados, ya no es un campo exclusivo de la comunidad agrícola y pertenece, por el contrario, a la comunidad mundial. Es por este motivo, imperativo, de máxima prioridad y necesidad buscar y aplicar en el menor tiempo posible nuevos conocimientos en las áreas donde sea necesario ampliar la base tecnológica, que haga posible cumplir a cabalidad y bajo principios de ecoeficiencia la tarea y objetivo primordial de la agricultura: alimentar a la población mundial.

#### Problemas ambientales y de salud relacionados con fertilizantes

Como acontece con cualquier actividad productiva empresarial de índole agropecuaria, industrial, comercial, artesanal y hasta cultural donde participe el ser humano, la búsqueda y generación de beneficios en sus diferentes dimensiones, sean de alcance social, grupal o personal, constituyen la meta y motivación del esfuerzo realizado, lo cual, como toda acción, trae también consecuencias controlables e incontrolables muchas veces poco deseables. En este particular, debemos reconocer que la agricultura está integrada y articulada con intensidad variable a toda la economía nacional y mundial, razón por la cual sus beneficios y también sus perjuicios forman parte consustancial de la ecuación comercial implícita.

Como se anotó, cada día es mayor el número de personas, organizaciones y países que se sienten alarmados y manifiestan de diferentes maneras y por diferentes medios su honda preocupación ante las amenazas que se ciernen sobre la naturaleza, el clima, los recursos naturales, y por ende, sobre la calidad de vida futura; como resultado de los sistemas y prácticas de impacto en que se sustentan la producción, el desarrollo y el crecimiento de muchas de las actividades y agrupaciones agrícolas, industriales y sociales actualmente en boga. En este particular, resulta realista y obligado reconocer que la agricultura, como el resto de la sociedad, no han sido todo lo ambientalmente conscientes y responsables para actuar con la agilidad y rigurosidad necesaria en informar, contener y modificar la forma de producir. No es tampoco válido generalizar, porque otros en contrario, actúan de manera muy seria y responsable.

La base de conocimientos científicos y tecnológicos que se tiene actualmente sobre el empleo de fertilizantes en la agricultura es muy amplia, la cual como demuestra la historia, se ha ido acrecentando, acumulando y mejorando durante muchos años. Sin embargo, algunos intereses particulares de manera tendenciosa, calculada y hasta malintencionada, atribuyen y sobredimensionan muchos de los males que padecen los ecosistemas con relación al uso de los fertilizantes; lo cual no significa tampoco que no existan, pues los impactos y afectación están comprobados y demostrados. Existen áreas, acciones y labores específicas de gestión en el empleo de los fertilizantes que

merecen ser revisadas, fiscalizadas y controladas antes, durante y luego de su operación, como son entre otras las siguientes:

- Fuentes seleccionadas y utilizadas (química, física, completa, especial, foliar, líquida, granular).
- Dosis aplicadas (kg/ha) según necesidad natural del cultivo y condiciones del entorno, principalmente en lo concerniente al grado de fertilidad del suelo.
- Momento de aplicación de acuerdo con el ciclo vegetativo, la fisiología y fenología de la planta y el momento en relación con la cosecha.
- Condiciones para la aplicación asociadas al clima, el suelo, el relieve y la planta.
- Forma de aplicación referida a si es manual, mecánica, fraccionada, completa.

Como toda práctica y actividad agrícola, la fertilización tiene efectos y consecuencias indeseables provocadas por su mal uso (Chaves, 2015); de las cuales se han identificado entre otras, las siguientes:

- 1) Toxicidades generadas por excesos y sobre aplicación.
- 2) Desequilibrios y desbalances nutricionales en el suelo y los seres vivos.
- 3) Alteración del estado físico, químico y microbiológico del suelo
- 4) Afectación de la actividad biológica y microbial.
- 5) Fomento del calentamiento global inducido por la emisión de Gases con Efecto Invernadero (GEI) como óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) muy reactivos, como es el caso del óxido nítrico (NO), el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y particularmente el potente y activo óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ); además del  $\text{CO}_2$  y el  $\text{CH}_4$  que dañan la capa de ozono (Chaves, 2021c).
- 6) Emisiones indeseables de amoníaco, óxido nitroso (efecto global), óxido nítrico causante de la lluvia ácida (efecto local).
- 7) Contaminación de fuentes acuíferas por lixiviación de nitratos, fosfatos, sulfatos y otros elementos.
- 8) Eutrofización de las aguas por causa del aumento en la concentración de nutrientes en un ecosistema acuático que provocan pérdida de su calidad, así como condiciones anóxicas.
- 9) Aumenta el crecimiento de organismos acuáticos, al punto que afectan la calidad del agua y disminuyen los niveles de oxígeno presentes. Esto afecta el metabolismo y crecimiento de otras especies, lo que afecta el metabolismo y crecimiento de especies que requieren oxígeno, causando una condición conocida como hipoxia (menos de 2 mg/l de N disuelto) (Díaz, 2001).
- 10) Aporte y acúmulo de elementos pesados en el ecosistema, entre los cuales pueden mencionarse arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb), mercurio

(Hg), níquel (Ni), selenio (Se), talio (Tl) y zinc (Zn), como mencionara Chaves (2021a).

- 11) Los fosfatos pueden favorecer la proliferación de cianobacterias (organismos microscópicos procariontes con células muy simples que realizan fotosíntesis y contribuyen muy positivamente a generar oxígeno, reciclar nutrientes y captar carbono y nitrógeno atmosférico al agua; se les identifica como algas verde-azules), las que pueden producir toxinas (cianotoxinas) de alto riesgo para la salud por provocar daños hepáticos y neuronales.
- 12) Deterioro en la calidad de los alimentos comestibles.
- 13) Afectación sobre la salud de las personas por ej. “bebés azules” por ataque de metahemoglobinemia infantil aguda que afecta la respiración, efectos carcinógenos en estómago, hígado y esófago por causa de las nitrosaminas; también se atribuyen bocio, malformaciones y enfermedades cardíacas a los nitratos, entre otras.

Como puede concluirse a partir de los elementos anteriormente citados, los efectos y las consecuencias que los fertilizantes y sus componentes pueden generar e inducir sobre el ecosistema y la salud humana son diversos en su magnitud, secuelas e impacto, los cuales son para nada despreciables por lo que merecen ser maniobrados con la mayor técnica y responsabilidad posible. Es definitivo que en la actualidad es necesario e imperativo sistematizar y conjugar las necesidades de una agricultura productiva, competitiva y de calidad con la protección y mejora de los suelos, el agua y la atmósfera.

### Ciclo del nitrógeno

De acuerdo con Wikipedia (2021a) *“El ciclo del nitrógeno es el ciclo biogeoquímico mediante el cual el nitrógeno se convierte en múltiples formas químicas a medida que circula entre la atmósfera, los ecosistemas terrestres y marinos. La conversión de nitrógeno se puede llevar a cabo mediante procesos tanto biológicos como físicos. El ciclo es fundamental para la vida de todos los habitantes del planeta, lo que incluye sus ecosistemas. Influye directamente en la corteza terrestre, pero también en la vida marina. Sus etapas son fijación, amonificación, nitrificación, desnitrificación y asimilación.”*

Según Fassbender y Bornemisza (1994) *“El ciclo del nitrógeno en el suelo es parte del ciclo integral del nitrógeno en la naturaleza.”*; agregando adicionalmente, que *“... el ciclo del N no solo se limita al ecosistema, sino que implica las interacciones con los animales, el hombre y la atmósfera e hidrosfera.”* Llamamos la atención a los mismos investigadores al *“...enfatar que en los procesos químicos y bioquímicos del ciclo del N en la naturaleza participan todas las formas*

(moleculares, inorgánicas y orgánicas), resultando así un ciclo muy complejo y sui géneris.”

Mengel y Kirkby (2001) expresan por su parte en torno al mismo evento, que “El suelo contiene solo una fracción minúscula del N de la litosfera, y de este N del suelo sólo una proporción muy pequeña está disponible directamente para las plantas. Esta se da principalmente en forma de iones  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ . El nitrógeno es un elemento muy móvil que circula entre la atmósfera, el suelo y los organismos vivos. Muchos procesos y factores están implicados en este ciclo del N. Algunos son fisicoquímicos y otros biológicos.”

Es ampliamente reconocido y está debidamente constatado que el ciclo del nitrógeno es uno de los procesos biogeoquímicos más importantes, complejos y determinantes para mantener el equilibrio de la biósfera terrestre. Cabe resaltar y reiterar que el nitrógeno es el elemento químico de mayor abundancia en la atmósfera ( $\approx 78\%$ ) y un constituyente básico para los seres vivos, porque permite elaborar aminoácidos, ADN, proteínas y otros compuestos orgánicos vitales. Pese a ello, es sabido que muchos seres vivos no pueden aprovechar y hacer uso pleno del nitrógeno sin satisfacer y completar las etapas y mecanismos que conforman su ciclo, a excepción de algunos microorganismos especializados, como es el caso de algunas algas y bacterias. En consecuencia, para que el nitrógeno pueda ser absorbido y utilizado por los seres vivos, deben intervenir en primera instancia los vegetales y las bacterias que se encargan de tomar y fijar el nitrógeno para incorporarlo al suelo y los tejidos, para que así pueda ser aprovechado por los animales y plantas antes de que se convierta en nitrógeno gaseoso ( $\text{N}_2$ ) y regrese de nuevo a la atmósfera.

En el Cuadro 1 se identifican y describen los procesos que, de acuerdo con Epstein y Bloom (2006), intervienen en el denominado ciclo biogeoquímico del nitrógeno.

Cuadro 1. Procesos principales que conforman parte del ciclo biogeoquímico del nitrógeno.	
Proceso	Definición
Fijación Industrial	Conversión industrial de nitrógeno molecular a amonio
Fijación Atmosférica	Conversión por relámpagos y fotoquímica de nitrógeno molecular a nitrato
Fijación Biológica	Conversión de nitrógeno molecular a amonio, por procariótidos
Remoción por Plantas	Absorción y asimilación de amonio o nitrato por las plantas
Inmovilización	Absorción y asimilación microbiana de amonio o nitrato
Amonificación	Catabolismo de materia orgánica del suelo en amonio, por bacterias o hongos
Nitrificación	Oxidación bacteriana ( <i>Nitrosomonas</i> sp) de amonio a nitrito y subsiguiente oxidación bacteriana ( <i>Nitrobacter</i> sp) de nitrito a nitrato
Mineralización	Catabolismo por bacterias o hongos de materia orgánica del suelo en nitrógeno mineral, por medio de amonificación o nitrificación
Volatilización	Pérdida física de amonio gaseoso para la atmósfera
Fijación de Amonio	Incorporación física de amonio en partículas del suelo
Desnitrificación	Conversión bacteriana de nitrato a óxido nitroso y nitrógeno molecular gaseoso
Lixiviación de Nitrato	Flujo físico de nitrato disuelto en agua subterránea para fuera de la camada superior del suelo y eventualmente, en dirección a los océanos

Fuente: Adaptado de Epstein y Bloom (2006).

Como fue mencionado oportunamente, una de las principales consecuencias resultante de los cambios y alteraciones inducidas por las fuentes antropogénicas sobre el ciclo del nitrógeno, lo representa la modificación en el contenido químico gaseoso de la atmósfera, tanto a nivel local como global, cuantificadas específicamente por el aumento en la concentración de las emisiones de gases nitrogenados, tales como el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), óxido nítrico (NO) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ).

Como se ha comentado con bastante detalle, el nitrógeno posee una dinámica especial y muy particular en el suelo y la planta al compararlo con respecto a otros nutrientes, ya que los compuestos nitrogenados que son asimilables y metabolizables por las plantas, como son el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) son muy susceptibles a sufrir pérdidas por diferentes mecanismos que no solo reducen el aporte, sino que también provocan efectos ambientales indeseables (Chaves y Bermúdez, 1999; Chaves, 1999ab, 2010, 2020c, 2021b). Las plantas son incapaces de almacenar  $\text{NH}_4^+$ , y su acumulación resulta tóxica para el vegetal; lo que obliga a que todo el N absorbido en esta forma deba de ser rápidamente detoxificado por el cuerpo humano, eliminando aquellas sustancias que resultan tóxicas y perjudiciales para el organismo (toxinas).

Es un hecho comprobado que en la mayoría de suelos tropicales entre ellos los costarricenses, la principal limitante nutricional la representa la insuficiencia de nitrógeno; ya que su disponibilidad depende de varios factores como son la eficiencia que las plantas tengan en los procesos fisiológicos implicados, incluida la eficiencia de absorción, conversión y uso, asociada con la acción interactiva que ejerzan otros nutrientes acompañantes (sinergismos-antagonismos), que al final influyen sobre los rendimientos y por ende, sobre la rentabilidad final del emprendimiento productivo desarrollado.

El ciclo del nitrógeno en el caso de los sistemas agrícolas esta intervenido por diversas transformaciones fisicoquímicas y biológicas; en cuyo caso el nitrógeno está presente en distintas formas: nitrógeno orgánico (amínico), que constituye la mayor parte del nitrógeno de un suelo agrícola; nitrógeno en forma mineral (nitrato y amonio), que representa mucho del incorporado con los fertilizantes nitrogenados y el nitrógeno molecular o gaseoso presente en la atmósfera (Chaves, 1999b, 2020a). Por fertilizantes nitrogenados se entiende y refiere a los fertilizantes minerales que contienen en su formulación nitrógeno, tanto en formas simples como complejas (Malavolta, 1981).

De todas estas formas de nitrógeno, únicamente el nitrógeno mineral es susceptible de ser aprovechado de manera directa por los cultivos. La materia orgánica no es estable, está sometida a complejos procesos de mineralización, que posibilitan su transformación hacia sus componentes minerales básicos, entre ellos el nitrógeno. De este modo, un suelo suministra nitrógeno de forma natural a los cultivos, en mayor o menor cantidad, dependiendo de su riqueza en materia

orgánica y la presencia de condiciones favorables, entre otros factores (Chaves, 2020acd, 2021c).

Queda claro, que el ciclo del nitrógeno es en lo particular un proceso complejo y muy dinámico, en el cual se dan una gran cantidad y diversidad de cambios y transformaciones, como se indica en la Figura 1, muchas de las cuales dependen y están supeditadas a procesos físico-químicos y microbiales, que a su vez se ven intervenidos y afectados por diferentes factores como son: temperatura, humedad, aireación, grado de acidez del suelo (pH), textura, contenido químico, componente biológico y tipo (orden taxonómico) de suelo, entre otros. En esa dinámica transformación que parte desde formas orgánicas, amoniacales y nítricas hasta llegar al N molecular ( $N_2$ ), es donde se dan las pérdidas gaseosas a la atmósfera y nítricas en el suelo.

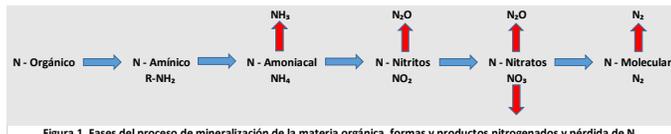


Figura 1. Fases del proceso de mineralización de la materia orgánica, formas y productos nitrogenados y pérdida de N.

### Mecanismos de pérdida del nitrógeno

El nitrógeno es un elemento muy sensible y susceptible de sufrir pérdidas en el suelo y, por lo tanto, no estar disponible para ser absorbido por las plantas; lo cual puede darse de varias maneras por diferentes mecanismos y en diferentes magnitudes. El nitrógeno contenido en el suelo se encuentra en forma orgánica e inorgánica, siendo la orgánica la de mayor presencia, con un estimado del 95% o más del nitrógeno total contenido. Acontece que el nitrógeno inorgánico está disponible para ser absorbido por las plantas, mientras que el orgánico debe ser primero mineralizado (convertido a N inorgánico) antes de que las plantas lo puedan absorber y utilizar. En el caso agrícola el N proviene principalmente de fertilizantes sintéticos inorgánicos, el fijado biológicamente, el proveniente de fuentes orgánicas como son los abonos, los residuos de cosechas, el estiércol de animales, la cachaza de la agroindustria cañera, entre muchos otros, y el que naturalmente se mineraliza en el suelo (Chaves, 1999b, 2010, 2021c). Hoy en día, los fertilizantes nitrogenados constituyen la mayor fuente de nitrógeno empleada en la producción agrícola.

Las formas químicas más importantes en que se encuentra el N en la naturaleza son diversas, lo que incrementa la posibilidad de perderse, como son: nitrato ( $NO_3^-$ ), nitrito ( $NO_2^-$ ), óxido nítrico (NO), óxido nitroso ( $N_2O$ ), amonio ( $NH_4^+$ ), amoniaco ( $NH_3$ ) y nitrógeno elemental ( $N_2$ ), como lo señalara Follett (2001). Como se anotó anteriormente, la forma molecular gaseosa ( $N_2$ ) es inerte y no tiene efectos detrimentales colaterales sobre el ambiente, comprende cerca del 78% de los gases atmosféricos. Para efectos de interés y uso agrícola esta forma nitrogenada no puede ser utilizada directamente por las

plantas, para lo cual deben acontecer varias transformaciones naturales que lo habilitan y ponen disponible.

En la actualidad y con el objeto de satisfacer las grandes necesidades que se tienen de N para uso agrícola y que la naturaleza no está en capacidad de proveer; la industria química mundial ha promovido la formulación y disposición de fertilizantes inorgánicos concentrados y muy variados en forma y contenido para uso comercial, los cuales son fácilmente adquiridos, distribuidos y utilizados para suplir la necesidad de cualquier elemento requerido por los cultivos. Esta realidad ha provocado, sin embargo, que los fertilizantes inorgánicos se han llegado a convertir en un periodo de tiempo relativamente corto, en un serio problema ambiental que debe atenderse con la celeridad, responsabilidad y efectividad necesarias.

En lo práctico es imperativo tener presente para operar un programa adecuado de manejo del nutrimento, que las plantas absorben el nitrógeno en forma de  $NH_4^+$  y  $NO_3^-$ , en donde por lo general el  $NO_3^-$  se encuentra contenido en mayores concentraciones en su movilización hacia las raíces; lo cual provoca que por su alta solubilidad se lixivie o en su caso sea arrastrado fácilmente por el agua de escorrentía, pudiendo, eventualmente, llegar a contaminar aguas subterráneas y/o superficiales. Las cantidades de  $NH_4^+$  y  $NO_3^-$  que estén disponibles para las plantas dependen de la cantidad aplicada como fertilizante y de la cantidad de N mineralizado a partir del N orgánico contenido en el suelo.

Se ha comprobado que las mayores pérdidas de nitrógeno que ocurren en el suelo son debidas a la remoción inducida por las cosechas sucesivas extraídas del campo y también a la lixiviación. En el caso particular de la caña las primeras son cuantiosas y muy significativas, considerando la gran cantidad de biomasa producida, cortada y procesada en la fábrica de azúcar; las segundas son importantes por la extensión del área sembrada y la diversidad edáfica (texturas) donde esta se cultiva, como lo anotaran Chaves (2017, 2019b) y Chaves y Chavarría (2017). Sin embargo, bajo ciertas condiciones particulares del medio, algunas formas inorgánicas de N pueden ser convertidas a gases y perderse hacia la atmósfera, entre las cuales destacan la desnitrificación y la volatilización como las principales rutas de pérdida por esa vía. 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.

En torno al tópico de las pérdidas que sufre el N en su accionar en el suelo, Chaves (1999b, 2010, 2021c) señala al respecto en cuanto a los mecanismos participantes, que *“...algunos procesos promueven y facilitan en grado variable la pérdida de N en el sistema, como acontece en los siguientes procesos:*

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

La volatilización del amoníaco ( $\text{NH}_3^+$ ), es un proceso en el cual el  $\text{NH}_3^+$ -N se pierde a través de emisiones gaseosas hacia la atmósfera en la forma de amoníaco, óxido nítrico, así como nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ), todas las cuales, a excepción de la última, son consideradas como fuentes potenciales de contaminación y deterioro ambiental; el proceso es favorecido por condiciones secas, pH elevados ( $\text{pH}>7$ ) y altas temperaturas. Las pérdidas se dan también por la emisión de productos de la desnitrificación ( $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ) bajo condiciones anaeróbicas, las cuales pueden reducir significativamente el N contenido en el suelo. En caso de tener un exceso de humedad, el nitrógeno mineral (particularmente el  $\text{NO}_3^-$ ) puede lixiviarse (lixiviación, movimiento descendente del  $\text{NO}_3^-$  a través del suelo por infiltración y flujo del agua) y perderse hacia zonas distantes del alcance del sistema radical del cultivo. El N mineral contenido en el suelo puede asimismo agotarse por causa de la extracción y absorción por el cultivo, tornando el suelo infértil. En la inmovilización los residuos del cultivo con bajas concentraciones de N (Relaciones C/N>30) causan la sujeción temporal neta del N a partir de la cual el crecimiento microbiano es limitado. La quema de plantaciones para su cosecha o de residuos vegetales, constituye también una pérdida neta de N del sistema, que de manera contraproducente alimenta adicionalmente los GEI mediante la emisión de  $\text{CO}_2$ . El ciclo del nitrógeno en el suelo es intervenido por la mineralización de la materia orgánica, donde ocurre la transformación del N orgánico en Carbono Orgánico del Suelo (COS) y abono en N inorgánico, lo que finalmente da lugar al amonio, por medio de la actividad.”

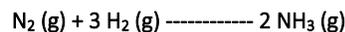
Para el caso específico que nos ocupa en el presente artículo, la desnitrificación representa el mecanismo de pérdida de nuestro interés, en consideración a la formación de óxido nítrico ( $\text{N}_2\text{O}$ ) que genera y es liberado a la atmósfera con los efectos GEI ya apuntados; sobre lo cual se comentara con mayor detalle más adelante.

### Fuentes nitrogenadas comerciales

La industria de los fertilizantes minerales nitrogenados se fundamenta a partir de la síntesis química del amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), proceso que sus características requiere de un elevado consumo energético. Puede asegurarse por ello sin lugar a equivocarse, que el amonio es el compuesto más importante para la formulación de fertilizantes nitrogenados; constituyendo al mismo tiempo un producto final de

uso directo, o en su caso intermediario, para la producción de otras opciones comerciales alternativas.

La producción de amoníaco ( $\text{NH}_3^+$ ) por combinación del N del aire con el  $\text{H}^+$  es un proceso fundamental para la obtención de fertilizantes nitrogenados. Acontece revisando la historia, que la primera instalación para producir amonio en gran escala fue construida en Oppan, Alemania, por Fritz Haber y Carl Bosch, iniciando operaciones en el año 1913 por cuenta de la Badische Anilin und Soda Fabrik A.G. (BASF). Es a partir de ahí donde el amonio, que es la base de los fertilizantes nitrogenados comerciales, se obtiene exclusivamente por el método industrial denominado Haber-Bosh. El proceso consiste en la reacción exotérmica directa entre el nitrógeno y el hidrógeno gaseosos, como sigue:



La velocidad con la que se forma el amoníaco es casi nula cuando la reacción opera a temperatura ambiente. Es una reacción muy lenta, puesto que tiene una energía de activación muy elevada, consecuencia de la estabilidad del  $\text{N}_2$ . La solución que dio Haber al problema fue utilizar un catalizador (óxido de hierro que se reduce a hierro en la atmósfera de  $\text{H}_2$ ) auxiliado por agentes sinérgicos (óxidos de Al, K, Mg y Ca) y aumentar la presión, ya que esto favorece la formación del producto. En la práctica fabril, las plantas de síntesis de amoníaco operan a una presión de 300 atm y a temperaturas entre 400 y 600 °C. Comparativamente, tanto la síntesis de fertilizantes fosforados como de potasio requieren entre cuatro y cinco veces menos energía en relación con la síntesis de nitrógeno, lo que ubica al elemento en una posición especial en relación con este indicador. Es conocido que el valor energético de los fertilizantes químicos incluye el gasto de fabricación sumado al contenido energético del producto.

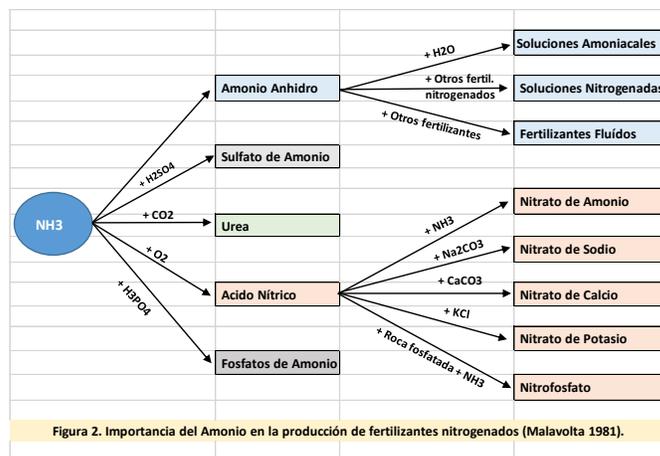


Figura 2. Importancia del Amonio en la producción de fertilizantes nitrogenados (Malavolta 1981).

En la Figura 2 propuesta por Malavolta (1981), se expone un diagrama de flujo mostrando la conversión de amoníaco y amonio en diferentes fertilizantes nitrogenados de amplio uso comercial en el mundo, lo que demuestra la enorme versatilidad y variabilidad que el elemento N posee como prueba fehaciente e indiscutible de su relevancia, figurada casi como dependencia, para la agricultura actual del orbe.

### Calentamiento global y efecto GEI

Mucho se habla, comenta, concluye y hasta juzga en el ámbito público y científico en torno a tópicos ambientales vinculándolos con el uso de los fertilizantes en la agricultura, en particular orientados al empleo del N y la emisión de GEI resultante de su acción química y metabólica en el suelo; pero en realidad muy poco se profundiza en torno al tema, con el objeto de encontrar respuestas técnicas a muchas dudas, omisiones y temores que surgen en todos los campos, aún en los técnico-profesionales, en relación con el asunto. ¿Negocio, ignorancia, cálculo, desinterés? cualquiera que sea la razón, el estado de desconocimiento y desconfianza que prevalece no es bueno ni conveniente para nadie; menos aún para procurar buscar posibles soluciones al problema. Es así, como inquietudes muy válidas y recurrentes vinculadas a ¿Cuáles son los factores de contaminación atmosférica generados por los fertilizantes? ¿Qué es el óxido nitroso? ¿Dónde se forma? ¿Cómo actúa? ¿Qué efectos provoca sobre los ecosistemas? ¿Es viable eliminar o mitigar sus efectos? ¿Cómo actuar? Como se infiere, son muchas las dudas y muy alta la incertidumbre que existe y debe atenderse responsablemente de inmediato para procurar buscar soluciones viables, factibles, efectivas y sostenibles en el tiempo. El sector cañero-azucarero nacional esta inexcusablemente imbuido en esta imperiosa obligación.

Consecuentes con esta válida y legítima preocupación técnica, social, comercial, productiva y ambiental, seguidamente se hace un abordaje particular y específico sobre el óxido nitroso y su relación con los fertilizantes de uso agrícola e impacto sobre la atmósfera.

La literatura es rica y muy amplia en describir como en el desarrollo del complejo y dinámico ciclo del nitrógeno se producen diversos compuestos, que contribuyen de manera importante en originar el efecto invernadero nombrado y reconocido como GEI, siendo una de las más importantes virtudes de sus efectos, el óxido nitroso ( $N_2O$ ). El  $N_2O$  es considerado y calificado como el tercer gas de efecto invernadero en importancia, antecedido por el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y el metano ( $CH_4$ ), con un potencial de calentamiento global estimado en unas 296 veces superior al  $CO_2$  y una vida activa estimada en aproximadamente 120 años, representando según valoraciones internacionales entre el 5 y el 8% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero verificadas en el medio. Por todo esto, el óxido

nitroso es considerado un gas que contribuye significativamente con el efecto de calentamiento global de la atmósfera, siendo una sustancia que agota el ozono estratosférico.

La transparencia natural y facilidad que ofrece la atmósfera al paso de la luz visible no es tan amplio para la radiación infrarroja, la cual encuentra en su travesía algún impedimento que produce un efecto de calentamiento interno en la superficie terrestre, similar al efecto encontrado en un invernadero, ahí su nombre y similitud por el efecto provocado. La luz solar que viaja e incide sin tener grandes obstáculos hasta el suelo, lo calienta, provocando que se emitan rayos infrarrojos (ondas caloríficas), los cuales, a diferencia de los rayos de luz, son absorbidos en buena parte por la atmósfera. Como resultante final, se espera como principio razonable que la cantidad de energía emitida hacia el espacio sea la misma que la absorbida, de manera que la superficie terrestre alcance la temperatura en donde ambos flujos se equilibran; acontece, sin embargo, que la misma es más alta por causa de la atmósfera, debido a que algunos de sus gases absorben la radiación infrarroja impidiendo su retorno y salida al espacio exterior. Los gases que promueven y favorecen ese efecto de calentamiento en la atmósfera, son conocidos y nombrados Gases de Efecto Invernadero o Gases GEI.

Un Gas con Efecto Invernadero es por tanto un gas presente en la atmósfera que absorbe y emite radiación dentro del rango infrarrojo, provocando un efecto de calentamiento similar al existente y prevaleciente en un invernadero. Los principales GEI presentes en la atmósfera terrestre son el vapor de agua ( $H_2O$ ), el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el metano ( $CH_4$ ), el óxido nitroso ( $N_2O$ ) y el ozono ( $O_3$ ). Se asegura y estima con buen criterio científico que, si no existieran los GEI, la temperatura promedio en la superficie terrestre sería de  $-18^\circ C$ , en lugar de la agradable media actual de  $15^\circ C$ , lo que haría la vida casi imposible. Otros gases, como son en este caso los principales constituyentes atmosféricos como nitrógeno ( $N_2$ ), oxígeno ( $O_2$ ) y argón (Ar), no son gases de efecto invernadero porque sus moléculas contienen dos átomos del mismo elemento, como acontece con  $N_2$  y  $O_2$ .

Dicho de otra forma, nuestro planeta absorbe parte de la energía irradiada por el sol en forma de luz y refleja o irradia el resto al espacio exterior en forma de calor. La temperatura global depende del balance y equilibrio que se establezca entre la energía entrante y saliente. Si se modifica este equilibrio energético, la superficie de la Tierra se torna más cálida o en su caso más fría, lo que provoca una variedad de profundos y dinámicos cambios en el clima global. Los gases de efecto invernadero son uno de los mecanismos creados artificialmente por el hombre, que sumados a los de origen natural, pueden intervenir y modificar el equilibrio energético mundial y forzar cambios en el estado del clima del planeta; esto por cuanto dichos gases absorben y emiten parte de la energía saliente que irradia la superficie de la Tierra,

lo que provoca que ese calor no salga y sea por el contrario retenido en la atmósfera inferior o tropósfera.

Es muy importante entonces concebir y entender con base en lo expresado anteriormente, que el efecto invernadero es un fenómeno en principio de ocurrencia natural, motivo por el cual el fenómeno de calentamiento global derivado no es en sí mismo malo, perjudicial o indeseable, como se ha hecho creer. El problema en realidad se ubica en el incremento desmedido y desproporcionado de los valores naturales de la temperatura, promovidos e inducidos por la acción del hombre (antropogénica); esto aunado a la nociva contaminación atmosférica adicional implicada. Resulta cierto y demostrado que la simple existencia del calentamiento de la atmósfera no es mala; aunque paradójicamente la acción creciente, acelerada e irresponsable que vienen mostrando sus índices por causa del modelo de vida desarrollado, si lo son.

Los gases que componen la atmósfera existen mucho antes del surgimiento y aparición de los seres humanos en el planeta, pero se considera que, fue con la Revolución Industrial ocurrida a mediados del siglo XIX (1760-1840), y muy especialmente, debido al uso creciente e intensivo de los combustibles fósiles en el desarrollo de las actividades industriales, el comercio, la agricultura y el transporte, donde se han generado los mayores incrementos observados en las concentraciones de los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) emitidas a la atmósfera. Se tiene por conocido y demostrado que también el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nítrico ( $\text{N}_2\text{O}$ ) vienen peligrosamente elevando su presencia por razones atribuidas a la actividad humana (antropogénicas), propiamente por el desarrollo de la agricultura y la actividad pecuaria. Complementario a este indeseable incremento en esas emisiones, se suman otros factores contributivos, como es el caso de la deforestación que ha afectado la fotosíntesis y disminuido la cantidad de  $\text{CO}_2$  fijada y retenida en la materia orgánica que compone la biomasa forestal y devuelta a la atmósfera en forma de oxígeno, favoreciendo con ello al aumento e impacto del factor antropogénico sobre el efecto invernadero. Se afirma de igual manera, que la acidificación de los océanos y con ello la consecuente reducción del fitoplancton en los mares, ocurren por el incremento desproporcionado de las concentraciones de  $\text{CO}_2$ . Esos dos elementos (bosques y océanos) actúan como reguladores naturales del clima.

El efecto de impacto y su duración valorada y expresada en términos de tiempo son variables muy expresivas aplicadas a cada gas inductor del GEI, como lo muestra el Cuadro 2, en el cual se estima y expone el denominado Potencial de Calentamiento Global (PCG) o GWP (acrónimo del inglés Global-Warming Potential); el mismo de acuerdo con Wikipedia (2021b), “define el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce hoy una liberación instantánea de 1 kg de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por el

$\text{CO}_2$ ”. Representa un indicador muy revelador que mide de manera relativa cuánto calor puede ser atrapado por un determinado gas de efecto invernadero, en comparación con un gas de referencia, para lo cual por lo general se refiere al dióxido de carbono; el cual fue elegido por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), como punto de referencia, pues se considera que su PCG es 1. El GWP o PCG es dependiente tanto de la eficiencia de la molécula, del factor GEI, como de su vida atmosférica. El índice GWP se mide comparativamente con relación a la misma masa de  $\text{CO}_2$  (reconocido como el “dólar ambiental” porque siembre tiene un valor referencial unitario) y se evalúa en una escala de tiempo específica, para lo cual se referencian en el presente caso 20, 100 y 500 años de persistencia del efecto.

**Cuadro 2.**  
Estimación de vida atmosférica y del Potencial de Calentamiento Global (GWP) en relación con el  $\text{CO}_2$  de 16 reconocidos Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Gas	Fórmula química	Años de vida útil	Potencial de Calentamiento Global (PCG) para un tiempo determinado			Valores de GWP para un horizonte temporal de 100 años *		
			20 años	100 años	500 años	Segundo reporte 1995	Cuarto reporte 2007	Quinto reporte 2014
Dióxido de carbono	$\text{CO}_2$	30 - 95	1	1	1	1	1	1
Metano	$\text{CH}_4$	12	62	23	7	21	25	28
Óxido nítrico	$\text{N}_2\text{O}$	114	275	296	156	310	298	265
Diclorodifluorometano	$\text{CCl}_2\text{F}_2$	100	10 200	10 600	5 200	8100	10900	10200
Triclorofluorometano	$\text{CCl}_3\text{F}$	45	6 300	4 600	1 600	3800	4750	4660
Clorodifluorometano	$\text{CHCl}_2\text{F}$	11,9	4.800	1 700	540	1500	1810	1760
1,1-dicloro-1-fluoroetano	$\text{CH}_2\text{CCl}_2\text{F}$	9,3	2 100	700	220	600	725	782
Pentafluoroetano	$\text{CHF}_2\text{CF}_3$	29	5 900	3 400	1100	2800	3500	3170
Fluoroformo	$\text{CHF}_3$	260	9 400	12 000	10 000	11700	14800	12400
Difluorometano	$\text{CHF}_2$	5	1 800	550	170	650	675	677
Fluorometano	$\text{CH}_3\text{F}$	2,6	330	97	30			
Tetrafluorometano	$\text{CF}_4$	50 000	3 900	5 700	8 900	6500	7390	6630
Hexafluorometano	$\text{C}_2\text{F}_6$	10 000	8 000	11 900	18 000	9200	12200	11100
Hexafluoruro de azufre	$\text{SF}_6$	3 200	15 100	22 200	32 400	23900	22800	23500
Trifluoruro de nitrógeno	$\text{NF}_3$	500	12 800	16 100	20 700	—	17200	16100
Tetracloruro de carbono	$\text{CCl}_4$	35	2 700	1 800	580	1400	1400	1730

Fuente: Myhre et al (2013); Wikipedia (2021b). [https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%8Dndice\\_GWP](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%8Dndice_GWP)

El Potencial de Calentamiento Global (GWP) se mide en relación con la misma masa de  $\text{CO}_2$  y se evalúa en una escala de tiempo específica.

El dióxido de carbono se define y opera como referente con un GWP de 1 en los 3 períodos de tiempo estimados.

\* Muestra los cambios surgidos en el tiempo en el valor del indicador cuando valorado para un mismo período de tiempo (100 años). Información adaptada del Quinto Informe de Evaluación del IPCC, 2014 (AR5), cuyos valores AR5 son los más recientes. Se anotan también los correspondientes al Segundo Informe de Evaluación (1995) y el Cuarto Informe de Evaluación (2007).

El dióxido de carbono es el gas de calentamiento global encontrado en mayor cantidad. De acuerdo con el Cuadro 2 algunos gases son tan efectivos para atrapar el calor que puede llegar a ser 1.000, 10.000 o hasta 20.000 o más veces más potentes que el  $\text{CO}_2$ . En el caso del  $\text{N}_2\text{O}$  se reporta una relación de 275 veces más potente para un periodo de 20 años, 296 para 100 años y 156 para 500 años. Por esta razón, si un gas tiene una fuerza radiactiva alta (positiva) pero también una vida corta, tendrá consecuentemente un GWP alto en una escala de 20 años, pero uno pequeño al proyectarlo a 100 años. Por el contrario, si una determinada molécula posee una vida atmosférica más larga que el  $\text{CO}_2$ , su GWP se incrementará cuando se considere la escala de tiempo. Para el caso particular del dióxido de carbono se establece, como se indicó, un GWP de 1 para todos los períodos de tiempo aplicados. Es importante indicar y tener presente que los valores de GWP vienen modificándose y ajustándose sistemáticamente con el avance de la tecnología y la mayor sensibilidad de las mediciones, lo

cual puede corroborarse en el Cuadro 2 para un horizonte temporal de 100 años, en cuyo caso los mismos valores para  $N_2O$  han pasado de 310 (1995), 298 (2007) y 265 (2014) de acuerdo con los Informe del IPCC de ese último año; lo cual es importante para aplicar en los cálculos y estimaciones que se realicen en torno al tema.

En el caso particular del metano, indica dicho cuadro que el mismo posee una vida útil de  $12 \pm 3$  años. El informe del IPCC le asigna un GWP de 62 en una escala de tiempo de 20 años, 23 en 100 años y 7 en 500 años. Un análisis del 2014, sin embargo, establece que, aunque el impacto inicial del metano es aproximadamente 100 veces mayor que el del  $CO_2$ , debido a la menor vida atmosférica, después de seis o siete décadas, el impacto de los dos gases se torna casi igual, luego de lo cual el papel relativo del metano continúa disminuyendo. La disminución del índice de GWP proyectado en periodos de tiempos más largos se debe presuntamente a que el metano se degrada a agua y  $CO_2$  a través de reacciones químicas ocurridas en la atmósfera. En el caso del  $N_2O$  la situación es más crítica, pues el efecto se estima en cerca de 300 veces mayor al  $CO_2$  con una vida útil de 114 años. Su potencial de calentamiento es alto en los primeros 100 años y luego disminuye levemente hacia periodos más extensos. Queda así demostrado que el óxido nitroso es un poderoso gas con efecto invernadero, por lo que a las emisiones de este gas se las responsabiliza parcialmente junto con el dióxido de carbono, el metano y algunos aerosoles de uso comercial conocidos, como revela el Cuadro 2, de provocar y acelerar el calentamiento global.

A excepción del ozono, todos los GEI que son directamente influenciados por las emisiones humanas se encuentran bien mezclados en la atmósfera, de forma que su concentración es casi la misma en cualquier parte del globo y es independiente del lugar donde se produce. El  $O_3$  también difiere de los demás GEI porque no se emite directamente hacia la atmósfera, sino que es generado por reacciones fotoquímicas en las que participan otras sustancias, denominadas “precursores”, que sí se emiten directamente. En lo que respecta a los procesos de eliminación, todos los GEI, excepto el dióxido de carbono, se eliminan en buena parte por medio de reacciones químicas o fotoquímicas dentro de la atmósfera. De modo diferente, el  $CO_2$  efectúa ciclos continuos entre varios “reservorios” o depósitos de almacenamiento temporales (atmósfera, plantas terrestres, suelos, aguas y sedimentos de los océanos). Las fuentes de los GEI naturales y sus procesos de eliminación están influenciados por el clima.

En todo esto es importante anotar que la capa de ozono presente de manera natural en la atmósfera superior o estratosfera (situada entre 10 y 50 km de altura), es la que actúa figurativamente como escudo protegiendo a los seres humanos y otros seres vivos de la nociva radiación ultravioleta (UV) procedente del sol, en una compleja actividad constituida por procesos fotoquímicos. El ozono es una sustancia cuya molécula está compuesta por tres átomos de oxígeno

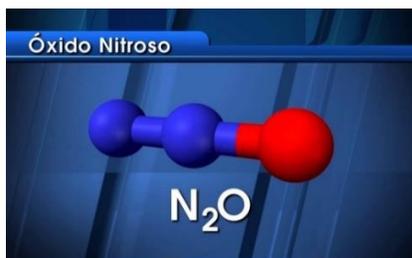
( $O_3$ ), que se forma al disociarse los dos átomos que componen el gas molecular de oxígeno ( $O_2$ ); donde cada átomo de oxígeno liberado se une a otra molécula de oxígeno ( $O_2$ ), formando moléculas trivalentes de Ozono ( $O_3$ ). Sin embargo, el gas califica y actúa también como un contaminante importante en la troposfera y uno de los gases de efecto invernadero que más contribuye al calentamiento global, superado tan solo por el  $CO_2$  y el  $CH_4$ . Se tiene por comprobado que el calentamiento global puede generar más ozono, promoviendo el calentamiento de la atmósfera. Se estima que el ozono tiene un potencial de calentamiento 200 veces superior al  $CO_2$ , por lo cual su presencia contribuye a aumentar las temperaturas en una escala local, no así mundial. Está demostrado que los clorofluorocarbonos (CFC) producidos a nivel industrial participan directamente en reacciones catalíticas de destrucción de la capa de ozono, como se anota en dicho cuadro, ahí las rígidas y estrictas medidas que se han establecido a nivel mundial para su control y regulación. La gravedad de la situación provocó que en el año 1989 se aprobara e implementara el Protocolo de Montreal con el objeto de limitar sus emisiones. En el caso de Costa Rica se ha hecho un enorme esfuerzo en esta línea de gestión institucional público-privada, con resultados muy satisfactorios.

El tema vinculado con el ozono se ha tornado sin embargo polémico en los últimos años, en consideración de que se ha demostrado que el incremento de sus concentraciones en las capas bajas de la atmósfera (tropósfera) no ha recibido el mismo nivel de importancia y atención mediática que la percibida en la capa superior; esto pese a que el gas actúa como un contaminante que afecta negativamente la salud de las personas y afecta adicionalmente la biosfera, al dañar la vegetación y reducir su capacidad para realizar fotosíntesis. Se le han atribuido también efectos detrimentales por afectación y disminución de la capacidad de absorción de  $CO_2$  en los ecosistemas, con el consecuente impacto negativo sobre el clima. Se sabe que ese ozono procede de los componentes orgánicos volátiles y el monóxido de carbono (CO), cuyo origen, entre otras fuentes, son los motores de combustión, los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) y las emisiones industriales. Se ha determinado que la contribución por arrastre desde la estratosfera a la tropósfera es relativamente baja. Es claro que el ozono troposférico de las capas bajas depende de las emisiones de sus precursores situados en la superficie terrestre. Lo que está claro y demostrado, es que el ozono es un potente gas con efecto invernadero, que al aumentar sus concentraciones en la atmósfera contribuye también con el calentamiento global.

#### Óxido nitroso ¿Qué es?

El óxido de nitrógeno ( $N_2O$ ), distinguido y conocido químicamente con otros nombres como óxido nitroso, monóxido de dinitrógeno, óxido hiponitroso, protóxido de nitrógeno, anhídrido hiponitroso, óxido jaloso, E-942 y Azo-óxido, es un gas atmosférico muy particular que ha adquirido en los últimos años mucha relevancia por sus características,

pero sobre todo por sus efectos. Posee una densidad de 0,0012228 g/cm<sup>3</sup> y una masa molar de 44,013 g/mol; su Punto de Ebullición es de 184,67 K (-88 °C) y de Fusión de 182,29 K (-91 °C), su Solubilidad es de 1,305 l/litro de agua a 0 °C y de 0,596 l/litro de agua a 25 °C. El gas se genera por la termólisis controlada del nitrato de amonio, según la reacción:  $\text{NH}_4\text{NO}_3 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2\text{O}$  o por reacción de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) con ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ). El gas es más denso que el aire y puede acumularse en las zonas más bajas, produciendo una deficiencia de oxígeno. La concentración máxima permitida en lugares de trabajo es de 100 ppm. Se le reporta como un gas no inflamable ni explosivo, que soporta la combustión tan activamente como el oxígeno cuando está presente en concentraciones apropiadas con anestésicos o material inflamable. No es combustible pero facilita la combustión de otras sustancias; desprendiendo en caso de incendio humos (o gases) tóxicos e irritantes, razón por la cual no debe estar en contacto con sustancias combustibles. Es un oxidante fuerte por encima de los 300°C, que reacciona violentamente con reductores y algunas sustancias combustibles, lo que genera peligro de incendio y explosión.



La sustancia puede ser absorbida por inhalación, por lo que, al producirse una pérdida de gas, se alcanzará muy rápidamente una concentración nociva del mismo en el aire. Por sus efectos es un gas hilarante que produce sensaciones placenteras que pueden ayudar al paciente a relajarse, por lo que es también conocido por sus efectos como “gas de la risa”; su inhalación puede provocar euforia, somnolencia, vértigo y hasta pérdida del conocimiento, motivo por el cual se recomienda en su uso contar siempre con ventilación apropiada. Es conveniente preventivamente usar extracción localizada o protección respiratoria. Físicamente es un gas incoloro comprimido licuado de olor característico, poseedor de un olor dulce y ligeramente tóxico en sus efectos. Por su efecto anestésico y disociativo que combinado con el oxígeno es de amplio uso en la medicina, sobre todo la odontología. Los efectos de su exposición durante periodos de corta duración, el líquido puede producir congelación y afectar al sistema nervioso central, lo que puede disminuir el estado de alerta. Los efectos en periodos de exposición prolongada o repetida pueden afectar la médula ósea y el sistema nervioso; además de producir alteraciones en la reproducción humana. Es utilizado igualmente en automóviles convencionales modificados, donde la cadena molecular

del gas se rompe durante la combustión en la cámara, a unos 275 °C de temperatura, produciendo un incremento del oxígeno (sobrealimentación) disponible para la combustión con el consecuente aumento de potencia (Wikipedia, 2021c).

Como se indicó, el óxido de nitrógeno se genera por la termólisis controlada del nitrato de amonio o por reacción de amoníaco con ácido nítrico; se forma también en condiciones anaeróbicas a partir de los abonos minerales incorporados al suelo. Es un gas que como se ha demostrado contribuye de manera significativa al efecto invernadero; teniendo una permanencia media prolongada (≈114 años o más) en la atmósfera que lo hace más peligroso. Actualmente se considera que entre el 5-8% del efecto invernadero es provocado por este gas. Adicionalmente, se ha encontrado que ataca la capa de ozono, reduciendo el ozono ( $\text{O}_3$ ) a oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ) y liberando dos moléculas de monóxido de nitrógeno. El  $\text{N}_2\text{O}$  es inerte en la troposfera. Su principal sumidero se da por medio de las reacciones fotoquímicas en la estratosfera que afectan la abundancia de ozono estratosférico

El óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) es un gas con reconocido y demostrado efecto invernadero el cual viene asociado con su capacidad de poseer un poder de calentamiento atmosférico, equivalente comparativamente a 296 veces mayor que el provocado por el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) empleado como referente. El  $\text{N}_2\text{O}$  es producido a partir del nitrógeno mineral que se incorpora e ingresa a los suelos en forma de fertilizantes sintéticos, abonos orgánicos, residuos biomásicos de cosecha y deyecciones de origen animal (heces y orina), entre otros. Se pueden distinguir tres tipos de emisiones: a) las directas desde el suelo, b) las directas de  $\text{N}_2\text{O}$  del suelo debido a la actividad pecuaria (pastoreo) y c) las indirectas generadas por el uso de fertilizantes. Otras fuentes de  $\text{N}_2\text{O}$  de menor importancia son: la producción de ácido nítrico y adípico (nylon), el tratamiento de aguas residuales y la quema de residuos y biomasa. El gas es producido y se origina como un producto supletorio de las reacciones microbianas acontecidas durante la nitrificación (producción aeróbica de nitratos a partir del nitrógeno orgánico del suelo) y también las de desnitrificación (respiración anaeróbica de nitratos). Puede considerarse por esto, que esas dos vías de generación representan la fuente principal de emisión de óxido nitroso en la agricultura mundial, extensivo y aplicable al caso de Costa Rica; lo que involucra inexcusablemente al sector

Se ha planteado y cuestionado sin embargo recientemente, por parte de diferentes y calificados entes e investigadores mundiales, que los cálculos y estimaciones realizadas por el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático o Panel Intergubernamental del Cambio Climático con sede en Ginebra, Suiza) en cuanto a las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  de la agricultura, podrían estar siendo sub valoradas de manera significativa, habiendo subestimado unas 3-5 veces las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  procedentes de los cultivos, como lo mencionaran Crutzen y compañeros en el año 2007, al reexaminar

los índices expuestos utilizando la remoción atmosférica mundial conocida. Se concluye a partir de este cuestionamiento, que el impacto provocado por la agricultura industrial sobre el cambio climático sería mucho mayor respecto al índice estimado actualmente. Tal aseveración obliga a revisar y replantear el tema.

Considerando su origen y naturaleza, resulta entonces de suma importancia identificar y conocer cuáles son los factores que determinan e influyen sobre las emisiones de  $N_2O$  en los suelos, con el objeto de poder elaborar con mayor certeza estrategias viables, factibles y efectivas de manejo que procuren reducir y mitigar las emisiones del gas. En primera instancia se clasifica por sus características a los factores reguladores de las emisiones de  $N_2O$  en próximos y distales; correspondiendo los primeros a los vinculados con la calidad del sustrato (proporción de carbono y nitrógeno presente) y las condiciones de ambiente prevaletentes en el lugar (temperatura, potencial redox, contenido de humedad, grado de acidez, etc.). Por su parte, los factores distales son definidos por sus propiedades como muy variados y consideran las condiciones del suelo y el tipo de manejo agronómico incorporado en las plantaciones.

#### ¿Cómo se forma el $N_2O$ ? ¿Cuál es su origen?

La procedencia del óxido nitroso es muy diversa en cuanto a su origen pues proviene y origina de varias fuentes, lo que desmitifica de alguna manera el señalamiento tendencioso de que es exclusivamente producido por la agricultura, y en lo específico, los fertilizantes los únicos causantes. De acuerdo con lo señalado por Berger (2011) citando numerosas referencias, existen *“Otras fuentes de  $N_2O$  son: océanos, suelos, acuíferos, aguas servidas contaminadas, combustión de biomasa, uso de fertilizantes nitrogenados, perturbación del suelo, pasturas basadas en leguminosas, fijación biológica de N por parte de los cultivos, animales domésticos, emisiones provenientes de procesos industriales, automóviles, limpieza de terrenos e incineración de basura.”* Menciona, asimismo el mismo autor, que, las pasturas requeridas para la síntesis de proteínas y aminoácidos, el pastoreo y los establecimientos de engorde intensivo de bovinos es importante, ya que el N es devuelto al suelo en forma de orina y heces del ganado. Concluye en torno al tema, que *“En el ámbito de la producción animal, se distinguen tres posibles fuentes directas de emisión de  $N_2O$ : (i) los propios animales a través de emisión de pequeñas cantidades de emisión de origen intestinal liberadas durante la actividad ruminal, (ii) el estiércol y residuos generados por animales en confinamiento, y (iii) las heces y orina generada por animales en pastoreo.”* Agrega de manera aclaratoria, que *“...las emisiones de  $N_2O$  por parte del ganado pueden ser clasificadas en directas e indirectas.”* Siendo las primeras las producidas por el animal en forma de excreciones de heces y orina; las indirectas, involucra todo aquello que no deriva directamente del ganado, como son las emisiones procedentes de los cultivos y fertilizantes empleados en su alimentación, las de aplicación del

estiércol y la originada por el procesamiento y transporte de los productos derivados de la actividad pecuaria.

El  $N_2O$  es un gas que se produce y emite de forma natural desde los suelos agrícolas y forestales, independientemente de que se apliquen o no fertilizantes nitrogenados; también de los océanos a partir de la acción de microorganismos que descomponen (mineralizan) la materia orgánica en sus componentes básicos. Sin embargo, el aporte humano es cada vez mayor y más incidente. La agricultura es la principal fuente antropogénica generadora de este gas, ya que al sustituir la vegetación natural por cultivos comerciales se modifican la temperatura del suelo, los ciclos del agua y también de los nutrientes.

Los suelos actúan de dos formas, sea como emisores y como receptores de  $N_2O$  y NO. Sin embargo, a escala global, las actividades que favorecen la emisión de  $N_2O$  y NO dominan sobre las de recepción generando un desbalance. La producción y consumo de  $N_2O$  y NO en suelos involucra procesos bióticos y abióticos. Numerosos grupos de microorganismos contribuyen a la producción y consumo de NO y  $N_2O$ , pero los procesos involucrados dominantes son en definitiva la nitrificación y la desnitrificación biológica.

Los estudios de investigación más recientes han concluido que las emisiones de  $N_2O$  están aumentando a gran velocidad, estimándolas un 20% superiores en relación al nivel observado durante la época preindustrial, comprobando que el crecimiento más preocupante se ha verificado en los últimos cincuenta años, debido a las emisiones causadas por la actividad humana; lo cual viene comprometiendo seriamente poder cumplir con los alcances del Acuerdo de París, cuyo objetivo básico es limitar ese incremento de la temperatura global por debajo de los 2 grados centígrados, fijándolo en 1,5°C. Hay coincidencia, sin embargo en el campo agrícola, en reconocer que el empleo de grandes cantidades de N sea por contar con un desarrollo muy amplio, intensivo (por uso de los factores e insumos de la producción) y extensivo (medido en hectáreas) de la actividad agropecuaria; o también, por el empleo desmedido e innecesario que las dosis de N incorporadas con la fertilización provocan, ante la imposibilidad e incapacidad de los suelos de retener y las plantas de absorber el exceso de N, pérdidas importantes del nutrimento por causa de lixiviación de los nitratos o emisión gaseosa del mismo en forma de amonio, óxido nítrico, óxido nitroso y dinitrógeno.

Puede concluirse con certeza en este punto, que uno de los grandes problemas que presentan los inventarios de Gases de Efecto Invernadero, es que por lo general concentran sus valoraciones y derivan sus inferencias, en las emisiones de  $N_2O$  procedentes del suelo, sabiendo que existen otras fuentes de emisión con aportes también muy significativos; lo cual, podría estar sobre dimensionando el rol de la agricultura en el calentamiento atmosférico global, y, por otra parte, sub valorando el efecto real de esas emisiones a partir de

otras fuentes. Es conveniente que este tópico sea convenientemente revisado y ajustado a la realidad.

Específicamente en lo concerniente a la formación y emisión de óxido nítrico, los procesos participantes más determinantes son el N perdido durante la amonificación, la nitrificación y la desnitrificación; motivo por el cual serán los mecanismos que se comentarán seguidamente con más detalle. FAO (2004) hace una excelente revisión y desarrollo de todas las relaciones surgidas con este gas, proponiendo “Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de  $\text{NH}_3$ , NO y  $\text{N}_2\text{O}$  provenientes de las tierras agrícolas”, lo cual contextualiza y ubica el tópico propiamente en el ámbito agrícola.

La pérdida de nitrógeno por causa de la nitrificación y la desnitrificación, sumadas a las inducidas por la volatilización del gas amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), no cabe la menor duda que son la causa principal de la contaminación y la baja eficiencia de los fertilizantes nitrogenados. Dichas pérdidas surgen como resultado de la actividad promovida por numerosos procesos químicos, físicos y biológicos que ocurren en el medio con intensidad variable; cuya magnitud es afectada por factores bióticos y abióticos propios del ambiente, el suelo y atribuibles al manejo agronómico con que se atiende la plantación o la actividad pecuaria, entre los que cabe destacar en lo específico la temperatura, humedad, viento, tensión de vapor superficial, grado de acidez (pH) del suelo, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), contenido de materia orgánica, grado de mineralización y relación C/N, tipo de cobertura vegetal y calidad de los residuos orgánicos existentes en la superficie, fuente, dosis incorporada y localización del fertilizante; de igual manera, las características anatómicas y fisiológicas del cultivo son también influyentes. La Figura 3 expone de manera específica y sucinta las etapas y reacciones vinculadas con el proceso de nitrificación y desnitrificación del nitrógeno en el suelo, como promotoras de la formación de óxido nítrico.



**Volatilización:** corresponde a la emisión de amoníaco gaseoso desde el suelo hacia la atmósfera con la intervención de mecanismos de carácter estrictamente químico. El efecto se da porque el amonio en condiciones de suelos secos con pH alcalino (alto) se convierte en amoníaco que es un gas muy volátil. La urea luego de transformarse y los fertilizantes amoniacales en general, pueden sufrir este tipo de pérdidas cuando incorporados en suelos alcalinos, particularmente si su pH es mayor de 7. En los abonos orgánicos este tipo de pérdida puede ser elevada si no se manejan adecuadamente. Debido al equilibrio existente, la volatilización es mayor en suelos con pH

elevados y baja capacidad de intercambio catiónico. La intensidad y magnitud de la volatilización del  $\text{NH}_3$  determina la disponibilidad del N para la nitrificación y la desnitrificación. En diversos estudios se ha concluido que la desnitrificación es más baja cuando las pérdidas de  $\text{NH}_3$  son altas tanto en suelos secos como inundados, lo que influye en los sistemas de arroz. Los principales factores que controlan la desnitrificación biológica incluyen la disponibilidad de carbono orgánico, oxígeno y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) u otros óxidos de N. La volatilización y pérdida del N ocurre naturalmente cuando hay un exceso de  $\text{NH}_3$  contenido en la solución del suelo, como se aprecia seguidamente.



Debido a que por lo general la desnitrificación y la nitrificación ocurren simultáneamente, resulta difícil poder extrapolar estos resultados para las condiciones normales de campo. Sin embargo, aun en condiciones de campo la relación de  $\text{NO}/\text{N}_2\text{O}$  puede indicar cuales son los procesos dominantes responsables de la emisión de NO.

Entre los factores y condiciones que elevan las pérdidas de N por este mecanismo, son el resultado de numerosos procesos químicos, físicos y biológicos, entre los cuales están:  $\text{pH} > 7$ , suelos secos de baja Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), alta temperatura, baja humedad, presencia de  $\text{CaCO}_3$ , contenido de materia orgánica, cobertura y calidad de los residuos contenidos en la superficie, viento, tensión de vapor superficial y la dosis y localización del fertilizante, entre otras. Se estima que las pérdidas de N del fertilizante nitrogenado aplicado serían por este proceso en promedio del orden del 15 al 20%.

**Nitrificación:** es una etapa determinante en el ciclo natural del nitrógeno en los suelos que corresponde a la oxidación biológica por medio de bacterias aerobias del amonio con oxígeno para generar nitrito, seguida y complementada por la oxidación de esos nitritos convertidos luego a nitratos. La disponibilidad de  $\text{NH}_4^+$  y oxígeno son los factores más importantes que controlan la nitrificación. El proceso es activado por microorganismos autótrofos especializados (principalmente Nitrobacterias), que obtienen su energía a partir de este proceso oxidativo. El proceso se divide en dos etapas, la primera etapa definida por la oxidación de  $\text{NH}_4^+$  a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y la segunda etapa definida por la oxidación de (nitritos)  $\text{NO}_2^-$  a (nitratos)  $\text{NO}_3^-$ . Debido a que el nitrito se transforma con mayor rapidez en nitrato a como se produce, sus concentraciones en el suelo suelen ser muy bajas. El nitrato es la fuente acidificante más importante en los suelos agrícolas. La nitrificación es un proceso relativamente constante en todos los ecosistemas, mientras que las tasas de desnitrificación varían temporal y espacialmente. El nitrato es la forma más común como las plantas absorben el nitrógeno, y la caña de azúcar tiene especial avidez y preferencia por esta forma química (Chaves, 1999a, 2021c).

**Desnitrificación:** corresponde a la conversión y transformación de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en nitrógeno gaseoso ( $\text{N}_2$ ) o en óxidos de nitrógeno, también gaseosos, que pasan a la atmósfera. Acontece cuando los suelos se saturan de agua sea por causa de encharcamiento o inundación, provocando que el oxígeno del suelo sea desplazado y excluido del sistema iniciando con ello una descomposición de carácter anaeróbico. Algunos organismos anaeróbicos facultativos tienen la capacidad de obtener para su respiración el oxígeno a partir del  $\text{NO}_2^-$  y el  $\text{NO}_3^-$  con la consecuente liberación del N a la atmósfera en forma  $\text{N}_2$  y  $\text{N}_2\text{O}$ .

En el Cuadro 3 se anota una aproximación de las eventuales pérdidas que pueden producirse por causa de la desnitrificación en suelos con diferentes contenidos de materia orgánica y condiciones variables de drenaje. Se considera que, si la fertilización se realiza empleando abono orgánico, esos porcentajes de pérdida pueden ser mayores; a mayor contenido de materia orgánica y drenaje limitado, las pérdidas son mayores. Se infiere el efecto concluyente y determinante que el drenaje provoca sobre el nivel de pérdidas de N.

Contenido de Materia Orgánica (%)	Drenaje	
	Bueno	Malo
< 2	2 - 4	10 - 30
Entre 2 y 5	5 - 10	20 - 50

Fuente: Ramos y Ocio (1992).

Cuantitativamente, el flujo combinado de estos gases representa nominalmente una pérdida económica muy significativa de N para los sistemas agropecuarios. La dinámica de este proceso depende de factores, como: la temperatura, el contenido de humedad del suelo, el grado de oxigenación, la concentración de carbono, el nivel de acidez (pH), la textura y agregación del suelo, la relación C/N y la concentración de  $\text{NO}_3^-$  presente en el sistema (Chaves 2020a). En los suelos arables existe por lo general una gran población de organismos desnitrificantes que se encuentran también en cantidades importantes en la rizosfera. Sin embargo, como lo ha señalado (Follett 2001; Elizondo 2006), las condiciones del medio deben ser muy favorables para que estos microorganismos cambien de una forma de respiración aeróbica a un tipo de metabolismo desnitrificante. En la Figura 4 se presentan con detalle y de manera secuencial las reacciones involucradas en la desnitrificación biológica de nitrógeno acontecidas en el suelo.

$2 \text{HNO}_3 + 4 \text{H}^+$	$\rightleftharpoons$	$2 \text{HNO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	(1)
$2 \text{HNO}_2 + 4 \text{H}^+$	$\rightleftharpoons$	$\text{H}_2\text{N}_2\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	(2)
$\text{H}_2\text{N}_2\text{O}_2 + 2 \text{H}^+$	$\rightleftharpoons$	$\text{N}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	(3)
$\text{H}_2\text{N}_2\text{O}_2$	$\xrightarrow{\text{pH} < 6,0}$	$\text{N}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	(4)

Fuente: Núñez Escobar (2013).

En esta materia se tiene que el grupo de bacterias que participan en la producción de  $\text{N}_2\text{O}$  se denominan desnitrificantes y tienen el potencial genético de producir, por la acción de algunas enzimas óxido nitro reductasas, la conversión de  $\text{NO}_3^-$  hasta llegar a  $\text{N}_2$  molecular. En el proceso participan algunas bacterias de los géneros *Paracoccus*, *Pseudomonas*, *Thiobacillus* y *Rhizobium*, que en condiciones de anaerobiosis reducen los nitratos a nitrógeno molecular, óxido nítrico y óxido nitroso, los cuales escapan a la atmósfera como gas.

En la Figura 5 se presentan de manera resumida y sucinta para fines ilustrativos los productos y puntos de reacción química donde ocurren las pérdidas de N en forma de  $\text{N}_2\text{O}$ , NO y  $\text{N}_2$ ; a las cuales se suman las de N-  $\text{NH}_3$  inducidas por volatilización.



Como todo proceso, existen en el medio donde ocurren las mismas, reacciones sinérgicas que estimulan y promueven por un lado la actividad, pero también otras antagónicas que por el contrario la inhiben y limitan. Es conocido que la tasa de desnitrificación es intervenida y afectada por diversos factores que modifican la concentración de C,  $\text{O}_2$  y  $\text{NO}_3^-$  en el suelo; así como por las poblaciones de bacterias y nutrientes que participan del proceso, entre los cuales pueden mencionarse como más importantes los siguientes:

- 1) La naturaleza y el tipo de fertilizante nitrogenado adicionado, sea N orgánico,  $\text{NH}_4^+$  o  $\text{NO}_3^-$ , que favorecen la emisión de  $\text{N}_2\text{O}$  por los procesos de nitrificación y desnitrificación.
- 2) La tasa de mineralización de la materia orgánica (MO) presente, a partir de la cual se produce  $\text{NO}_3^-$  el cual puede por lixiviación y transporte desplazarse a capas más profundas del suelo. La evidencia revela que, a menor contenido de MO, el proceso de lixiviación es más lento debido a la ausencia de bacterias, ya que el C de los

compuestos orgánicos son fuente de energía para la actividad de estos microorganismos, aunque hay otros nutrientes como el mismo N en forma de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  y Ca (Chaves, 2020a).

- 3) La secreción de exudados radicales que regulan la actividad y la dinámica de las poblaciones de bacterias desnitrificantes en el suelo.
- 4) El grado de oxigenación presente en el medio, por cuanto la enzima óxido reductasa es reprimida por la presencia de  $\text{O}_2$ , que también inhibe la formación de reductasa, se estima, probablemente por la competencia de electrones. La reducción de  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{NO}_2^-$  se observa con bajas concentraciones de  $\text{O}_2$ .
- 5) El grado de humedad manifestado por elevados contenidos hídricos, superiores a 70-80 % del agua útil durante períodos prolongados son importantes para que ocurra de desnitrificación.
- 6) La textura del suelo resulta determinante, pues los suelos de textura arcillosa poseen generalmente mayores contenidos de materia orgánica (carbono lábil) y por ello cuentan con una mayor actividad microbiana; en los suelos arenosos acontece lo contrario.
- 7) La acidez del suelo interpretada por su índice de pH. Condiciones con una reacción del suelo de carácter neutro o ligeramente alcalino, promueven la desnitrificación por favorecer el desarrollo y la actividad de las bacterias en el suelo; aunque como se ha comprobado, hay bacterias capaces de producir desnitrificación a valores de  $\text{pH} < 4$ . El IPCC (2001) ha propuesto que cuantitativamente del N aplicado al suelo, aproximadamente un 1,25% del mismo se pierde como  $\text{N}_2\text{O}$ ; lo cual, sin embargo, con fundamento en lo anteriormente mencionado, es predecible que este porcentaje de pérdida dependa en términos generales del tipo del suelo, el clima, el cultivo y el manejo que se preste a la plantación. Otros investigadores como Thorburn *et al* (2010) y Allen *et al* (2010) han reportado que cerca del 5% del N aplicado se transforma en Óxido Nitroso.

#### Eficiencia y aprovechamiento del nitrógeno

Como ya en ocasiones anteriores se ha comentado con bastante detalle y especificidad, el N por su naturaleza es un nutriente muy particular en su dinámica en el suelo y en la planta; a lo que ahora se incorpora también la atmósfera como ámbito de expansión de su acción y actividad. Esto hace que la perspectiva actual y moderna no deba enfocarse y orientarse solo a reconocer su importancia y accionar fisicoquímico, biológico y fisiológico; sino también a la imperiosa necesidad que se tiene de asegurar su uso pleno bajo estrictos criterios de ecoeficiencia. En todo esto, es bien conocida la ineficiencia del

elemento por las significativas pérdidas que su adición al suelo acarrea, lo cual, se agrava virtud de las consecuencias atmosféricas indeseables que se vienen observando desde hace varias décadas, manifestadas por el calentamiento global, el cambio climático y la contaminación de las aguas con serios impactos ambientales y de calidad de vida, asuntos que tanto preocupan a la humanidad y a la sociedad costarricense en lo particular.

Propiamente en lo que compete al suelo, el grado variable de eficiencia de los tres nutrientes clásicos y esenciales N-P-K es conocida y manifiesta, maximizándose, por el contrario, el grado de ineficiencia observado en el caso del fósforo y el nitrógeno, como revela el Cuadro 4 propuesto por Bertsch (2003) y ajustado por el autor, para cuatro órdenes diferentes de suelos predominantes en las plantaciones comerciales de caña de azúcar de Costa Rica. Es evidente que el grado de aprovechamiento de un nutriente va ligado no apenas a sus propiedades fisicoquímicas, sino también a las características del suelo.

Cuadro 4. Ámbitos porcentuales de eficiencia nutricional del N-P-K según tipo de suelo.

Elemento	Vertisoles	Volcánicos	Rojos	Inceptisoles	Rango medio *	Pérdidas potenciales **
N	50 - 65%	55 - 65%	50 - 55%	50 - 70%	50 - 70%	30 - 50%
P	45 - 50%	30 - 35%	35 - 40%	40 - 50%	30 - 50%	50 - 70%
K	60 - 65%	70 - 80%	60 - 70%	60 - 80%	60 - 80%	20 - 40%
Rango medio *	45 - 65%	30 - 80%	35 - 70%	40 - 80%	30 - 80%	
Pérdidas potenciales **	35 - 55%	20 - 70%	30 - 65%	20 - 60%		30 - 80%

Fuente: Adaptado de Bertsch (2003).  
 \* Valores % extremos de eficiencia.  
 \*\* Las pérdidas potenciales se refieren al % elemento que no es utilizado por la planta.  
 Nota: Ordenes Taxonómicos corresponden a Vertisoles, Andisoles, Ultisoles e Inceptisoles, respectivamente.

Como concluyera Chaves (2021d) en torno al contenido de esa información, "...la eficiencia de la fertilización aplicada al suelo es diferente y muy específica para cada nutriente y tipo de sustrato implicado, siendo en el caso del N muy baja con un rango de eficiencia de apenas entre 50 y 70% entre lo que se aplica y lo que la planta aprovecha. De todos, el P es el nutriente más ineficiente en cuanto a este revelador indicador; mientras que el K en contraparte el más efectivo y consecuentemente de mayor absorción.

Al ubicar la eficiencia en el uso del N de acuerdo con los órdenes taxonómicos de suelo expuestos, se evidencia un menor porcentaje de absorción en el caso de los Ultisoles rojos, ácidos e infértiles, lo que es explicable por las características fisicoquímicas de los mismos y las limitaciones que por ello surgen en la actividad microbiana que se da en los mismos. La más alta acontece por el contrario en los suelos del orden Inceptisol.

*Cotejando y ubicando taxonómicamente el área sembrada con caña de azúcar en el país, se encuentra que el 79,1% de la misma corresponde a esos cuatro órdenes de suelo, predominando en lo específico los Inceptisoles con el 36,9% del área, seguido por Vertisoles y Ultisoles con un 17,6% c/u y luego el Andisol de origen volcánico con un 6,9%, como lo indicaran Chaves (2017) y Chaves y Chavarría (2017). Queda claro que la eficiencia teórica en el uso del N no supera el 70%, lo que denota una pérdida importante del elemento superior al 30%.”*

Los numerosos estudios desarrollados a nivel mundial en torno al tema, demuestran que el nitrógeno en el suelo presenta un índice de aprovechamiento y asimilación muy bajo por los cultivos, incluyendo la caña de azúcar; revelando con ello que del total del N que se incorpora al suelo mediante la fertilización, dependiendo del tipo de suelo, las condiciones de clima prevaleciente, el manejo que se preste a la plantación, la cantidad y del tipo de fertilizante adicionado, más del 50% (hasta un 80%) es perdido por causa de volatilización, desnitrificación y lixiviación (lavado por el agua hacia el subsuelo). Como se ha señalado anteriormente, el N se pierde por causa de los gases que se producen en el suelo en forma de amonio, óxido nítrico y óxido nitroso; así como también por lavado como nitrato orgánico o formas de nitrógeno orgánico que se pueden disolver en agua. Según estimaciones de Erisman y colaboradores (2008), se calcula que sólo el 17% de los fertilizantes nitrogenados producidos en el año 2005 fueron asimilados por los cultivos, dispersándose el resto por los ecosistemas provocando grandes problemas de contaminación y de emisiones; lo cual no ocurre con la utilización de abonos en el modelo de agricultura ecológica, donde, por el contrario, esta es mucho más eficiente y menos contaminante. Otras fuentes reportan que, en el año 2017, el óxido nitroso representó cerca del 5,6% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero en EEUA debido a las actividades promovidas por el ser humano; pese a lo cual las emisiones de óxido nitroso disminuyeron en aproximadamente un 2,6% entre 1990 y 2017, debido, en parte, a una disminución observada en las emisiones provenientes de la combustión de los automóviles por control de emisiones vehicular. Las emisiones de óxido nitroso provenientes de tierras agrícolas ha sin embargo variado durante este período y fueron aproximadamente un 5,8% más altas en 2017 en relación con 1990.

Para que la producción de  $N_2O$  sea significativa debe presentarse y existir un periodo de lluvia que genere una condición de alta humedad en el suelo, lo cual debe considerarse al momento de realizar las aplicaciones, recomendando la consulta y empleo de criterios climáticos.

La eficiencia de uso y el grado de aprovechamiento del N ha sido por su importancia y trascendencia para efectos productivos, un tema muy estudiado en diferentes gramíneas por autores como Fageria y Baligar (2001), que encontraron para el cultivo de arroz eficiencias del 39%

que calificaron como bajas, las cuales variaron con las características del suelo, los métodos, cantidades y tiempos de aplicación de los fertilizantes; como también por las prácticas de manejo incorporadas en la plantación. En el caso del maíz, Carneiro *et al* (2013) evaluaron dosis de N entre 0 y 180 kg/ha, determinando que la eficiencia del elemento fue apenas del 30% al utilizar una dosis considerada alta que fluctuó entre 50 y 70%, respecto a la dosis intermedia. Barbieri *et al* (2008), reportan por su parte eficiencias de N que varían entre 59 y 85% por efecto de las dosis de aplicación del elemento y entre 60 y 76% influenciado por el distanciamiento de siembra. Abou El-Hassan y compañeros (2014), evaluaron la influencia y los efectos de la humedad del suelo en relación con las dosis de fertilizante incorporadas, encontrando eficiencias que fluctuaron entre 18,7 a 44%, que se correspondieron con la mejor eficiencia del suelo con humedad de campo. Sin embargo, Remache *et al* (2017) encontraron que el N fue absorbido cerca del 50% del total hasta la floración de las plantas de maíz.

Montenegro (2019) encontró en el cultivo del café en Costa Rica resultados importantes, concluyendo que *“Se determinaron los mayores eventos de emisión del  $N_2O$  inmediatamente después de aplicar el fertilizante, con disminución importante a partir de la segunda-tercera semana después de la misma, donde las lluvias parecen tener influencia solamente durante los primeros días, luego de aplicado el fertilizante. Se determinó que existe emisión de  $N_2O$  aún sin aplicación de fertilizante nitrogenado, aunque menor a los restantes tratamientos. También se detectó incremento en la emisión del óxido nitroso conforme se aumentó la cantidad aplicada de fertilizante nitrogenado, aunque las dosis de 100 y 225 kg de N/ha/año mostraron valores similares. La mayor emisión de  $N_2O$  se determinó con la aplicación de 350 kg de N/ha/año.”*

Como se infiere a partir de esos reveladores resultados, efectivamente el grado de eficiencia del N aplicado con la fertilización al suelo es muy deficiente e ineficiente en cuanto a su aprovechamiento por las plantas, aún las más eficientes por su elevado y reconocido poder de extracción como es el caso de las gramíneas y en particular la caña de azúcar, como fuera demostrado por Chaves (1986), lo que se debe tomar en cuenta al momento de establecer un programa de fertilización comercial.

El uso del riego y la adición regulada y controlada de agua permiten reducir la pérdida de N por  $N_2O$ . En su estudio, Lópes y compañeros (2018) evaluando la combinación de dos dosis de N y  $K_2O$  (60-120 y 120-180 kg/ha) y dos formas de aplicación (suelo y fertirrigación) y un testigo en Brasil; encontraron que el uso de la fertirrigación redujo las emisiones de  $N_2O$  en la caña de azúcar en comparación con los cultivos fertilizados convencionalmente. De igual manera, el incremento de la dosis de N de 60 a 120 kg/ha aplicada vía fertirrigación no afectó las emisiones de  $N_2O$ , mientras que la aplicación de 60 y 120 kg/ha vía

suelo proporcionó un significativo aumento de 40,6 y 50,2% en las emisiones de  $N_2O$ , respectivamente. La aplicación de 60 y 120 kg/ha de N a través del suelo tuvo un factor de emisión de  $N_2O$  mayor, siendo 1,39 y 2,08% superior que el registrado en el cultivo fertilizado con 60 y 120 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente.

Por su parte, Hervani *et al* (2017) estudiaron en una plantación convencional de caña de azúcar en condiciones de secano situada en el distrito de Jaken, Pati, Java Central, la emisión de  $N_2O$  empleando el método de cámara cerrada. El estudio mostró que los flujos máximos de la plantación de caña antes y después de la aplicación de fertilizantes fueron 4.011 y 223  $\mu g N_2O m^2/día$ , respectivamente. Luego de la aplicación del fertilizante, los flujos máximo y mínimo de  $N_2O$  son 6,408 y 25  $\mu g N_2O m^2/día$ . La emisión de  $N_2O$  de las plantaciones de caña de azúcar se registró en el área de secano como  $4,21 \pm 2,53 kg N_2O/ha/año$  con un potencial de calentamiento global de 1,31 ton  $CO_2-e$  por hectárea por año.

#### ¿Qué sucede en el sector azucarero nacional?

Como es obvio esperar, la agroindustria cañero-azucarera costarricense mantiene en su ámbito nacional una participación que resulta muy relevante en materia de emisión de gases, algunos de ellos con efecto directo en el calentamiento global como ha sido valorado, estimado y comunicado. Dicha participación se fundamenta en tres elementos básicos muy particulares del cultivo, como son: 1) el área sembrada que ocupa el cultivo de la caña dedicada a fabricar azúcar en el país, es por su dimensión (62.666 ha) muy importante, pues se ubica de acuerdo con SEPSA (2021) entre las tres más amplias solo antecedida por el café (93.697 ha) y la palma aceitera (76.720 ha), 2) por su ubicación geográfica y presencia de condiciones bióticas y abióticas tan heterogéneas, la magnitud de las pérdidas y las posibilidades reales de controlarlas resultan difíciles y disímiles de operar y 3) por lo anterior, la cantidad y tipo de fertilizante adicionado a las plantaciones comerciales, en particular los nitrogenados, es en cantidad muy significativa (Chaves, 2019abc). Esos y otros elementos adicionales como son la quema de la plantación para la cosecha y sus residuos y el laboreo de los terrenos, provocan que el total de emisiones de gases a la atmósfera y la lixiviación de nitratos en el suelo se torne por magnitud, y no tanto por intensidad y eficiencia unitaria del cultivo, muy significativa. Es definitivo que la diferencia con respecto a otras actividades productivas la establece la dimensión del área involucrada.

Como señalaran Cabrera y Zuaznabar (2010) en relación al punto, “Cuando se fomenta un agroecosistema cañero después de la remoción de un área boscosa, el suelo tiene un contenido de materia orgánica que oscila entre 6 y 10 % y con posterioridad comienza una disminución, hasta alcanzar cierta estabilización a valores entre 3 y 4 % en condiciones de cultivo manual, y sin el uso de la quema para

realizar la cosecha; pero cuando se aplica la quema y requema de los residuos agrícolas o la cosecha se realiza de forma mecanizada, ocurren modificaciones de las propiedades del suelo, manifestadas en la disminución de la materia orgánica y el aumento de la compactación entre otras, lo que constituye, y actualmente se conoce, como cambios globales en los suelos.” Concluyen los mismos autores en su estudio realizado en Cuba, que “Al quemar para la cosecha, una parte de la biomasa de la caña de azúcar se mineraliza, proceso mediante el cual se emite C hacia la atmósfera; pero esta es menor que aquella que fue capturada durante el crecimiento y desarrollo de la plantación, lo que motiva que el balance del C por concepto de biomasa sea positivo. La fertilización con N incrementó el secuestro o la captura del C y, a la vez, propició una mayor emisión hacia la atmósfera; no obstante, en el agroecosistema el ingreso de C fue mayor que la emisión, lo que está motivado por el incremento de los rendimientos, tanto de tallos como de los residuos agrícolas, por efecto del N aplicado con el fertilizante.”

De acuerdo con Chacón *et al* (2009), el sector cañero fue responsable de aportar el 30% del  $N_2O$  generado solo en el sector agrícola, lo cual representó, para el año 2005 un total de 160,9 toneladas de  $N_2O-N$ . Debido a que este gas tiene un potencial de calentamiento equivalente a 310 veces el del  $CO_2$ , si la emisión se expresa en estas unidades, supone que el sector cañero contribuyó en el 2005 con 99.758 toneladas de  $CO_2$  equivalente. Asimismo, Montenegro y Chaves (2011) concluyeron para la Zafra 2010-2011 sobre el mismo tópico, que “De acuerdo con la Metodología del IPCC (2006), este aporte incremental representa en promedio por hectárea y por año, aproximadamente 67 kg de  $CO_2$ . En términos promedio por hectárea y por año, la caña de azúcar se estima que está capturando aproximadamente 379 kg de  $CO_2$ . A nivel nacional y de manera integral, la caña de azúcar podría estar fijando en las 54.300 has cosechadas en la Zafra del 2010-2011, cerca de 19.815 TM de  $CO_2$ .”

Estimaciones puntuales realizadas por Montenegro y Chaves (2012) a nivel regional para el cultivo de la caña en el país, revelaron que la emisión de  $N_2O$  fue significativamente mayor en la región de Guanacaste y el Pacífico Central, lo cual se explica por contar con la mayor área dedicada al cultivo de la caña de azúcar y por tanto más empleo del fertilizante nitrogenado; dejando claro con ello que la generación y emisión del gas crece consecuentemente con la cantidad de N aplicado en el campo. Sin embargo, la cantidad de N tiene un peso relativo muy importante en esta relación, como lo demuestra lo acontecido en la Zona Norte con más área sembrada (8.100 ha) en relación con el Pacífico Central (5.700 ha) con mayor cantidad de N incorporado (150 kg/ha) respecto a la primera (100 kg). En el Cuadro 5 se exponen las estimaciones de emisión nacional según región cañera, cuyo rango de emisión se ubicó entre 1,17 y 3,56 kg  $N_2O-N/ha/año$ , con un valor promedio de 2,4 kg, resultados que demuestran la variación e incertidumbre asociada a estas

estimaciones. Cabe indicar y aclarar en este punto, que algunas veces el  $N_2O$  se expresa como tal; pero en otras como  $N_2O-N$  lo que obliga realizar su transformación para expresarlo como  $N_2O$ .

**Cuadro 5. Índices promedio de emisión de Óxido Nitroso estimados para cada región productora de caña de azúcar en Costa Rica.**

Región Productora	Índice de Emisión	Ambito de Emisión	Emisión	
	Kilogramos $N_2O-N/ha/año$		Toneladas $N_2O-N/ha/año$	Toneladas $CO_2 eq/ha/año$
Zona Norte	1,79 ± 0,62	1,17 - 2,41	15	7.071
Zona Sur	2,03 ± 0,72	1,31 - 2,75	9	4.556
Turrialba-Juan Viñas	2,11 ± 0,76	1,35 - 2,87	10	4.840
Guanacaste	2,19 ± 0,79	1,40 - 2,98	66	32.176
Valle Central	2,27 ± 0,83	1,44 - 3,10	10	4.876
Puntarenas	2,58 ± 0,98	1,60 - 3,56	15	7.170
Nacional	2,16 ± 0,78	1,38 - 2,94	125	60.689

Fuente: Montenegro y Chaves (2012).  
 \* Índices estimados con base en información de la Zafra 2011-2012.  
 Se proyectó sobre un área de 57.600 hectáreas y una aplicación promedio de N de 123 kg/ha.

Concluyeron Montenegro y Chaves (2012) de su estudio, que “Con el escenario de menor emisión, los menores valores, y por lo tanto las mejores eficiencias para la producción de caña se determinaron en el Valle Central; por el contrario, los mayores valores y menores eficiencias se estimaron para la región de Puntarenas. En general, se pueden clasificar las regiones productoras por la eficiencia de emisión en la producción de azúcar en tres grupos: 1) formado por el Valle Central y la Zona Sur que serían los más eficientes; 2) el grupo lo conformaría Puntarenas con la menor eficiencia. Un grupo intermedio 3) lo conformarían las restantes regiones de Guanacaste, Turrialba y Zona Norte.” En adición a lo anterior concluyeron los mismos investigadores a partir de su estudio, que “De acuerdo con los cuatro escenarios planteados y las estimaciones realizadas, la emisión total derivada del área dedicada al cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica tendría un índice nacional equivalente a 2,16 kg de  $N_2O-N ha^{-1} a^{-1}$ , y con él se estimaría una emisión de 124,4 toneladas de  $N_2O-N$ .”

Resulta obvio entender que los índices de emisión de  $N_2O$  indicados han cambiado significativamente en el país, considerando que el área actual se estima en 62.666 ha y el promedio de aplicación de N se incrementó recientemente a 134,7 kg/ha, para un 8,8% y 9,5%, respectivamente, como lo anotara Chaves (2021d).

De acuerdo con Comunicación Personal del Dr. Johnny Montenegro Ballesterero (setiembre 2021), la emisión de GEI por parte del sector cañero primario (productor de materia prima) ha sido estimada para el año 2015 de acuerdo con las estimaciones establecidas en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero en 113,5 Gg de  $CO_2$  equivalente, esto sin considerar ni incluir la quema de las

plantaciones para su cosecha (IMN, 2015). Ese valor representa un 24% del correspondiente a todo el sector agrícola integrado y un 16% de todo el sector agropecuario costarricense. Proyectando ese valor para todo el país, considerando la emisión neta, se estima que la emisión del sector primario de la caña alcanza el orden del 1%.

En torno a este tema y siendo muy específico en las estimaciones, se considera con buen criterio técnico, que en el país la mayor fuente de emisión de gases en el caso particular de la caña de azúcar la representa la fertilización nitrogenada; seguida por la práctica de la quema efectuada previo a la cosecha y posteriormente con los residuos vegetales remanentes en el campo. La aplicación de enmiendas calcáreas incorporadas al suelo para corregir la acidez presente es también una fuente importante de emisión; al igual que las prácticas de cultivo vinculadas con la preparación del suelo, los combustibles fósiles empleados en la ejecución de labores de mantenimiento de las plantaciones, la cosecha y el transporte de materia prima cortada para su procesamiento en el ingenio. Como es norma reconocida en la actividad cañera nacional, la cantidad y eficiencia en la emisión gaseosa fluctúa significativamente de acuerdo con la región productora. Importante reiterar como quedó demostrado, que la cantidad nominal total de emisión va en función directa de la extensión del área cultivada (ha), lo cual pone a la región productora de Guanacaste en el primer lugar; no así en cuanto a la eficiencia de emisión, la cual varía entre localidades pues está determinada por otros factores como grado de fertilización nitrogenada incorporada (kg/ha), intensidad de quema de plantaciones, corrección de suelos ácidos, nivel de productividad agroindustrial alcanzado (t/ha), intensidad de laboreo y condiciones del clima prevalecientes en el lugar, entre otros.

#### Sugerencias y recomendaciones para el uso eficiente del nitrógeno

Se proponen y sugieren seguidamente, algunas recomendaciones pragmáticas e importantes orientadas a promover y favorecer el uso óptimo, eficiente, rentable, sostenible y ecoeficiente de los fertilizantes nitrogenados en la caña de azúcar; procurando adicionalmente minimizar y mitigar las pérdidas, la contaminación y la emisión de gases con efecto invernadero a la atmósfera, entre las cuales están las siguientes:

- 1) Reconocer y aceptar en primera instancia que los fertilizantes son insumos importantes y necesarios para complementar y satisfacer las necesidades nutricionales del cultivo, al menos en proyectos agro empresariales operados bajo una visión de alta productividad y competitividad agroindustrial, rol en el cual el nitrógeno tiene una participación primaria y vital; sin la cual las posibilidades de lograr productividades satisfactorias y sostenibles en el

- tiempo se tornan casi imposibles de lograr, salvo presencia de condiciones muy especiales.
- 2) El costo implicado y vinculado con la aplicación de fertilizantes minerales en la caña de azúcar es alto y significativo, como lo referenciaría Chaves (2021d) 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. Esto obliga enfatizar en la sana búsqueda y pretensión de optimizar su uso y lograr rentabilidad con utilidades, hacer un uso eficiente de los mismos en cualquier programa de ahorro y eficiencia energética que se implemente.
  - 3) Considerando que la generación de  $N_2O$  a partir de los fertilizantes minerales y también orgánicos (no están exentos de sufrir pérdidas) es significativa cuando los índices de precipitación y temperatura son elevados, resulta imperativo disponer y conocer las condiciones climáticas y edáficas (textura) del lugar.
  - 4) Resulta obligado e inexcusable en este acápite, conocer con detalle de previo las necesidades nutricionales y fisiológicas del cultivo de la caña en cada una de las etapas fenológicas del ciclo vegetativo de la planta, lo cual ubica y contextualiza, en concertación con las condiciones y características particulares del entorno agroproductivo, las fuentes, dosis y momentos más oportunos para realizar la práctica de adicionar los nutrimentos al suelo, muy en particular el N (Chaves 1999ab, 2019a).
  - 5) La adición del nutrimento en el momento fenológico justo mediante un correcto reparto y distribución del insumo mejora su eficiencia y, en consecuencia, reduce la dosis necesaria incorporar incluyendo su costo. Por lo general, la mayor absorción de N coincide con los periodos de más rápido crecimiento del cultivo.
  - 6) Es imperativo contar como elemento de partida, con un conocimiento detallado de la condición de fertilidad del suelo donde se encuentra situada la plantación; para lo cual es obligado e insoslayable realizar muestreos periódicos (al menos cada dos años) que evalúen la condición fisicoquímica de los mismos. No puede pretender mejorarse lo que no sabemos con certeza cuál es su estado real actual.
  - 7) El análisis (semi o detallado) del suelo debe no apenas revelar la condición actual de fertilidad del suelo, sino también, orientar y coadyuvar en la medida de lo posible, a 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 abortar las clásicas y tradicionales aplicaciones generalizadas en toda la plantación.
  - 8) Nunca puede ni debe bajo ninguna circunstancia ignorarse y menos aún desconocerse que la nutrición es un concepto integral donde se dan efectos sinérgicos y antagónicos entre factores y nutrimentos; que en el caso particular del N resultan determinantes, como acontece con las conocidas relaciones iónicas entre N:K y N:S; además de la reconocida relación C:N en la fase inicial de mineralización del ciclo biológico del N (Chaves 2020a).
  - 9) Resulta necesario considerar como trascendente en los casos donde la condición de acidez del suelo lo justifique y amerite, proceder con su corrección y adecuación mediante la aplicación de enmiendas bajo los criterios establecidos (Chaves, 1999c, 2017, 2020e).
  - 10) Es importante establecer un programa de fertilización objetivo y realista cotejando lo que se tiene en el suelo con lo que se desea y considera debe tener el mismo para acompañar y satisfacer la expectativa productiva esperada y pretendida lograr. En esto interviene la capacidad, viabilidad y factibilidad técnica, administrativa y financiera de proveer suplementariamente lo que por infertilidad hace falta incorporar (deseado-existente).
  - 11) No puede ni debe omitirse la importancia de estimar en lo técnicamente posible, la cantidad de nitrógeno que posee el suelo y es adicionalmente potencialmente capaz de proveer y suministrar.
  - 12) Debe evitarse el laboreo excesivo e innecesario del suelo durante su preparación para la siembra, pues las pérdidas de N pueden ser importantes al favorecer una mayor oxigenación y mineralización de la materia orgánica. El uso de arado y rastra debe ser regulado y ajustado a lo estrictamente necesario.
  - 13) Es imperativo lograr establecer e implementar un uso eficiente del nitrógeno mineral en el cultivo, seleccionando la fuente idónea, ajustando las dosis necesarias al lugar y etapa fenológica específica del cultivo, asegurando su aplicación en los momentos más oportunos para lograr su mayor y mejor aprovechamiento. Como apuntara Chaves (2021c), en el caso particular de la caña de azúcar, la planta tiene más afinidad por los nitratos.
  - 14) Se debe considerar que, aparte de los abonos nitrogenados tradicionales y convencionales como la urea, el nitrato amonio, el sulfato de amonio y el nitrato de calcio, entre otros, en la actualidad se vienen desarrollando dos grupos importantes de fertilizantes orientados a incrementar la eficiencia. Entre ellos se tienen los fertilizantes nitrogenados de liberación lenta que, empleando diferentes mecanismos, hacen que las formas de nitrógeno asimilables por las plantas se dosifiquen y liberen lentamente de manera que las pérdidas se reducen y minimizan. El mecanismo con

el que operan esos fertilizantes, son: a) las formas activas de N están envueltas en un material que se disuelve gradualmente con la humedad del suelo (abonos recubiertos) y b) las formas activas están unidas a polímeros que disminuyen la solubilidad de estas (urea-formaldehído). También están los fertilizantes estabilizados, donde algunas formas de N van acompañadas de moléculas inhibitoras de procesos de transformación del N en el suelo; como por ejemplo, una fuente de N con amonio más una molécula inhibitora de la nitrificación haría que el proceso de nitrificación (conversión de amonio a nitrato) se ralentizara y el N permanece durante más tiempo en forma de amonio que es retenido por las arcillas del suelo, no siendo susceptible de ser lixiviado y perdido como nitrato. Otro ejemplo es el de la urea más un inhibidor de la ureasa (enzima que degrada la urea a amonio), sustentando su efectividad en que se ralentiza la degradación de urea a amonio evitando las pérdidas por volatilización (Chaves, 2016).

- 15) En casos calificados pueden emplearse para reducir la nitrificación y, por tanto, la emisión de óxido nitroso de los fertilizantes orgánicos, inhibidores de la nitrificación a los fertilizantes; como acontece con los ácidos húmicos.
- 16) Esta necesidad torna interesante, importante y necesario utilizar herramientas tecnológicas avanzadas como son los análisis de suelo y foliares (en lo posible), medidores de clorofila, establecer balances de N con el debido asesoramiento técnico, con el objeto de ubicar y ajustar las dosis del N mineral que deben aportarse al cultivo. El empleo de esas herramientas coadyuva a tomar la mejor decisión en torno al uso del elemento basadas en criterios sencillos y pragmáticos, entre las que están los análisis del N mineral disponible en el suelo o las medidas del estado nutricional del cultivo mediante el uso de lectores de clorofila. El método de los balances pretende simplificar los factores que intervienen en el ciclo del N en el suelo y la planta, para ayudar al agricultor a tomar la mejor decisión posible.
- 17) La agricultura de precisión ofrece la posibilidad de racionalizar el N, bien por la vía de la precisión en su distribución y ubicación o mediante la utilización de modelos complejos de decisión aplicados de modo automático. Por lo anterior, la agricultura de precisión representa una opción técnica interesante y necesaria para incorporar ahorros significativos en el rubro de los fertilizantes minerales.
- 18) Se ha encontrado que la agricultura de precisión posibilita economizar N, en primera instancia por la mayor precisión de los equipos utilizados, que al orientarse por un sistema GPS permiten ahorros de hasta el 5% del fertilizante, al evitar aplicaciones innecesarias y poco aprovechables. Es notorio

que cada vez se utilizan en la agricultura equipos mecánicos con mayor anchura y amplitud de trabajo (24, 36 m, etc.), lo que dificulta la ubicación y orientación del productor en el campo. Con el posicionamiento mediante GPS y los sistemas de orientación automática, la circulación en la plantación se da con gran precisión. En este sentido es bueno saber que existen ya modelos que incorporan el uso de mapas de fertilización intraparcularia, las cuales cuentan con un gran número de capas de información sobre: características del suelo, curvas con altitudes, mapas de cosecha potencial, estado nutricional del cultivo, entre otros.

- 19) La cantidad de N por aplicar va en relación directa con la condición de fertilidad actual de los suelos, las características bióticas y abióticas del lugar, la variedad de caña cultivada y el ciclo vegetativo de la plantación, la expectativa productiva que se fije como meta agroindustrial y la capacidad de inversión dispuesta incorporar en el proyecto productivo. Hay límites en esas variables que definen el potencial por alcanzar; se debe ser muy realista y objetivo en esta materia y no operar sobre escenarios inviables.
- 20) Las plantaciones de caña donde se deben concentrar e intensificar las acciones técnico-administrativas de ahorro y uso eficiente de los fertilizantes minerales nitrogenados, son principalmente las de regadío, en consideración de la intensidad que mantienen en el uso del nutrimento.
- 21) El agua es un factor clave para intervenir las emisiones, por ello, el riego puede ser utilizado para reducir flujos. El adecuado manejo del riego resulta fundamental para lograr obtener una buena eficiencia del N aportado al suelo, especialmente en texturas gruesas donde la infiltración es muy amplia por razones de espacio poroso.
- 22) Está demostrado que la máxima eficiencia se consigue aplicando el N por medio de fertirrigación y con sistemas de riego espacialmente localizado. La utilización de riego por goteo es recomendable, pues al mantener una menor proporción de superficie húmeda las emisiones se reducen.
- 23) Se debe evitar el encharcamiento del suelo durante el riego, lo cual promovería desnitrificación.
- 24) Es conveniente el uso de riego luego de realizar la fertilización. La incorporación del fertilizante en el suelo permite reducir emisiones.
- 25) La correcta y adecuada calibración y manejo de la abonadora mecánica cuando es utilizada es fundamental para lograr un uso eficiente y óptimo del fertilizante nitrogenado en la plantación. Lo ideal sería contar con modernas abonadoras de dosificación variable que dosifiquen de acuerdo con la necesidad particular del punto. En el caso de las aplicaciones manuales cabe también revisar, controlar y fiscalizar el

concepto, asegurando que, en lo posible, la adición del insumo fertilizante sea equilibrada y homogénea.

- 26) Conocidas las necesidades nutricionales básicas del cultivo y previo de aportar el fertilizante mineral, es sano y muy conveniente considerar la factibilidad de utilizar otras fuentes de N aprovechables por el cultivo, como son entre otras: a) contribución del suelo con base en su contenido de materia orgánica y su fertilidad natural, b) la contribución de los abonos orgánicos, c) el empleo de leguminosas y abonos verdes como fuente de N y d) el aporte de los restos biomásicos de cosecha.
- 27) Con el objeto de aprovechar e incrementar la capacidad fijadora de nitrógeno, es muy conveniente introducir leguminosas en los sistemas de producción, bien sea como cultivo asociado o un sistema de rotación de cultivos apropiado (Chaves, 2020cd). No puede tampoco desconocerse la capacidad de fijación natural que posee la caña de azúcar, como lo expusiera con gran detalle Chaves (2021d), lo cual debe estimularse y promoverse.
- 28) Incrementar los sumideros de carbono por medio de la intensificación de la rotación, la asociación de cultivos y la incorporación de cultivos de cobertura, los cuales son una excelente acción para seguir. La adopción de estas prácticas será sin lugar a duda de gran utilidad y beneficio económico para el agricultor, pero sobre todo para el suelo y la plantación.
- 29) Se reporta que las adiciones de “biochar” como enmienda favorecen la disminución de las emisiones de GEI en suelos tropicales, lo que habilita una nueva opción de recursos para atender el problema.
- 30) Es muy importante valorar la posibilidad de utilizar pragmática y correctamente residuos o materias de origen orgánico disponibles en la zona; los cuales una vez identificados y conocida su composición y calidad, puede establecerse un programa que ubique origen, naturaleza, cantidad, periodicidad y preparación con el fin de lograr un correcto reparto, distribución y dosificación de este en las plantaciones comerciales que así lo requieran. Los costos implícitos son determinantes en esta materia.
- 31) Los problemas de pérdida de N valioso se dan tanto en fuentes orgánicas como minerales, lo cual justifica la adopción de medidas preventivas y correctivas que aseguren su uso óptimo. El origen orgánico no exime, como muchas veces se cree, del problema de las pérdidas.
- 32) Se debe evitar quemar la plantación de caña para su cosecha; como también los residuos que pudieran quedar como remanentes biomásicos en el suelo antes, durante y después de practicada la corta, pues la afectación del substrato es inminente. Como anotaran Montenegro y

Chaves (2011), *“existe evidencia científica que muestra la presencia de menores contenidos de Carbono en el suelo con la ejecución de la práctica de quema de residuos y plantaciones, por lo que se requiere desestimular prudente, sistemática y racionalmente esta práctica y con ello lograr más beneficios ambientales asociados con este cultivo. Resulta imperativo aplicar estímulos que coadyuven.”*

- 33) Se recomienda en lo posible, incorporar los restos orgánicos de cosecha de las plantaciones con el fin de mejorar la condición física y de fertilidad del suelo; para lo cual se pueden utilizar abonos verdes (Chaves, 2020d). Es importante reducir en lo posible el tamaño del material orgánico mediante picadoras, con lo cual se incrementa la superficie específica y favorece su mineralización.
- 34) Es muy importante por ser necesario, aprovechar y hacer uso de los servicios de asesoramiento técnico especializado existentes y ofertados por el Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA) y el MAG en esta materia; asociados a programas de asistencia técnica y transferencia de tecnología. En estas materias tan técnicas y complejas no cabe la improvisación ni tampoco vale la experiencia sin conocimiento especializado.

### Conclusión

En la agricultura cañero-azucarera costarricense es conocida y reconocida la creación y selección de nuevos y mejores materiales genéticos dotados de un alto potencial de rendimiento, tanto agrícola como industrial, los cuales son medidos y juzgados en este caso por las toneladas (t) de materia prima (caña), la concentración de sacarosa que posean en sus tallos (kg/t) y el azúcar que produzcan por unidad de área (t/ha), los cuales se liberan periódicamente para uso comercial en el país. Estos nuevos y mejores biotipos de caña deben ir necesariamente acompañados para optimizar su potencial agroindustrial intrínseco, de información técnica complementaria que exponga y oriente sobre sus características fisiológicas, fitosanitarias asociadas con la tolerancia a plagas y enfermedades, requerimientos hídricos y edáficos, condiciones individuales de adaptación al clima y también respecto a sus necesidades nutricionales particulares.

El tema nutricional ha en este sentido, evolucionado significativamente, pues en la agricultura actual y sobre todo la futura, ya no basta con conocer las necesidades nutricionales del clon de acuerdo con el potencial de rendimiento y la fertilidad natural de los suelos donde se ubica la plantación, las cuales como es conocido en el caso de Costa Rica, varían de manera muy significativa y determinante entre las diferentes zonas cañeras del país, como lo demostrara con gran detalle Chaves (2019abc). A diferencia de otras agroindustrias azucareras del mundo, la costarricense se caracteriza por su alta heterogeneidad edafoclimática y genética.

Entre los cambios que la materia nutricional ha sufrido y viene sobrellevando cada vez con mayor énfasis y profundidad, es la preocupación, integración y concientización por el tema ecológico y ambiental; de manera que en la actualidad el enfoque sobre la nutrición vegetal ha reorientado su dinámica y gestión no apenas a preocuparse por tópicos tecnológicos vinculados con el suelo, la planta y los rendimientos, como tradicionalmente ha ocurrido, sino también a buscar incorporar medidas en favor del ahorro y la eficiencia energética y financiera, reorientando y elevando de igual manera la visión hacia la atmósfera, la biodiversidad, la contaminación y conservación de los recursos naturales con énfasis en el hídrico (Chaves y Bermúdez, 1999). Esta nueva y renovadora orientación socio tecnológica, prevé la adopción e implementación de medidas de formación e información de técnicas sobre uso eficiente de la energía en la agricultura y preventivas contra la contaminación; todo con el objeto de introducir, concienciar, informar e inducir a los agentes del sector sobre la importancia de incorporar y aplicar los conceptos de eficiencia energética y de ecoeficiencia.

Resulta obligado, imperativo e insoslayable inducir y provocar con la rapidez y consistencia necesarias a nivel sectorial, institucional y personal, los cambios estructurales, técnicos y operativos que sean necesarios e inexcusables para evitar y contrarrestar la contaminación atmosférica, hídrica y la promoción del calentamiento de la atmósfera por emisión de gases con efecto invernadero, como viene lamentablemente aconteciendo cada vez con mayor intensidad y magnitud. En lo específico se deben incorporar a los planes y programas de manejo agronómico de las plantaciones, medidas preventivas y operativas efectivas que minimicen y mitiguen la emisión de óxido nitroso y la pérdida de valioso N a la atmósfera por gasificación (volatilización, desnitrificación) y lixiviación (nitrificación). Esta iniciativa empresarial es beneficiosa para todos pues conduce no solo a favorecer el ambiente, sino también la productividad de las plantaciones y la rentabilidad del emprendimiento empresarial al optimizar los costos implicados.

Entre estas acciones se opera y gestiona con gran ímpetu actualmente en el desarrollo de mejores productos fertilizantes que coadyuven y contribuyan a minimizar las pérdidas y evitar la contaminación en todas sus diferentes acepciones; también se trabaja en la adopción de mejores técnicas de aplicación concentrándose en adicionar lo estrictamente necesario para cada condición específica de suelo, bajo criterios apegados a la agricultura de precisión o de sitio. Con estas acciones se ha avanzado sobremedida en el empleo de modernas abonadoras de dosificación variable, dotadas con equipos informáticos capaces de procesar mucha información rápidamente y en directa comunicación con el GPS del tractor, hacen posible el ajuste de las dosis de fertilizantes (nitrógeno) a lo estrictamente necesario, no solo a nivel de parcela sino de píxel (unidad de 10 x 10 m), lo que

favorece poder realizar una aplicación con alto potencial de aprovechamiento y satisfacción de las necesidades de la planta. Una agricultura moderna selecciona y utiliza las fuentes fertilizantes idóneas, analiza y conoce con detalle la condición y estado de sus suelos, aplica la dosis requerida con base en la necesidad y en el momento fenológico más oportuno; nunca, por actúa por tradición de manera generalizada e indiscriminada simplemente por adicionar nutrientes sin criterios técnicos específicos de sitio.

Las circunstancias y condiciones que dominan el contexto actual y futuro de la agricultura mundial y nacional, independientemente de la actividad productiva que se trate, obligan a todos los sectores e instituciones público-privadas, a concentrar esfuerzos y orientar recursos en procura de contrarrestar sea por evitación, erradicación o mitigación, los efectos contaminantes y de calentamiento atmosférico que viene favoreciendo e induciendo el uso inconveniente y poco apegado a principios técnicos de los fertilizantes, tanto orgánicos como minerales; lo cual se ha lamentablemente traducido en los impactos que el cambio climático viene manifestando. En el caso de la agroindustria azucarera la responsabilidad del sector para con el ambiente es muy alta (Chaves y Bermúdez, 1999), pues el aporte en materia de gases es significativa virtud de la amplitud del área que ocupa el cultivo y la cantidad de fertilizantes nitrogenados que se aplica habitualmente.

Corresponde por ello a DIECA como órgano técnico responsable, impulsar y orientar el proceso de cambio por la ruta correcta, ejerciendo las acciones tecnológicas requeridas implementar mediante estrategias de información, asesoramiento y capacitación correspondientes a los usuarios del sector. Es necesario también acompañar la iniciativa sectorial con actividades de investigación que permitan eliminar y superar la enorme incertidumbre asociada a las estimaciones que sobre pérdidas, impacto y contaminación existen en la actualidad; aportando y asegurando consistencia y exactitud a las mediciones, para lo cual se hace necesario el poder realizar las correspondientes determinaciones a nivel de laboratorio, invernadero y campo con el objeto de corroborar o bien modificar los valores generados. La generalización o el uso de valores internacionales ajenos a nuestra realidad, no es conveniente ni para el país y menos para el sector, pues podrían estarse generando índices irreales, como lo concluyeran Montenegro y Chaves (2012), al reconocer a partir de su investigación, que *“Se considera con buen criterio y fundamento técnico basado en esta información preliminar, que la cantidad de Óxido Nitroso reportada en el Inventario Nacional de Gases con Efecto Invernadero (GEI) del 2005, podría estar sobre estimada en 47,3 toneladas de N<sub>2</sub>O-N lo cual representa una cantidad significativa (23.041 toneladas) cuando se traduce a su equivalentes de CO<sub>2</sub>.”*

Se considera que con esta medida institucional se logrará incrementar la precisión del inventario nacional de Gases con Efecto Invernadero,

en lo relativo a las emisiones que provienen particularmente del sector productor de caña de azúcar. No cabe la menor duda que la contribución del sector azucarero en cuanto a la producción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) es importante, lo que merece, justifica y obliga adoptar responsablemente medidas inmediatas para su mitigación y reducción.

#### Literatura citada

- Abou El-Hassan, W.H.; Hafez, E.M.; Ghareib, A.A.A.; Freeg, M.R.; Seleiman, M.F. 2014. *Impact of nitrogen fertilization and irrigation on water utilization efficiency, N accumulation, growth and yields of Zea mays L.* Journal of Food Agriculture Environment 12(3-4):217-222.
- Allen, D.; Kington, G.; Rennenberg, H.; Dalai, R.; Smithdt, S. 2010. *Effect of nitrogen fertilizer management and waterlogging on nitrous oxide emission from subtropical sugarcane soils.* Agriculture, Ecosystems and Environment 136:209-217.
- Barbieri, P.A.; Echeverría, H.E.; Saínz Rozas, H.R.; Andrade, F.H. 2008. *Nitrogen use efficiency in maize as affected by nitrogen availability and row spacing.* Agronomy Journal 100(4):1094-1100.
- Benavides Ballesteros, H.O.; León Aristizabal, G.E. 2007. *Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático.* Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, Subdirección de Meteorología. Nota Técnica del IDEAM IDEAM-METEO/008-2007, diciembre. 102 p.
- Bermejo, I. 2010/11. *Agricultura y cambio climático.* Área de Agroecología de Ecologistas en Acción. Revista El Ecologista nº 67. p: 18-22.
- Berger Berreta, L. 2011. *Emisiones de óxido nitroso producidas por la actividad ganadera en el Uruguay en condiciones de pastoreo.* Uruguay. Informe de Pasantía. Lic. en Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Setiembre. 42 p.
- Bertsch Hernández, F. 2003. *Absorción de nutrientes por los cultivos.* 1ª ed. San José, C.R.: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). 307 p.
- Cabrera, J.A.; Zuaznábar, R. 2010. *Impacto sobre el ambiente del monocultivo de la caña de azúcar con el uso de la quema para la cosecha y la fertilización nitrogenada. I. balance del Carbono.* Revista Cultivos Tropicales 31:1, p. 5-13.
- Carneiro, A.; Telmo, J.; Villalba, H.; Oswin, E.; Pivotto, B.R.; Santi, A.L.; Benítez, L.; Asterio, E.; Menefee, D.; Kunz, J. 2013. *Efficiency of nitrogen fertilizer applied at corn sowing in contrasting growing seasons in Paraguay.* Revista Brasileira de Ciencia do Solo, Sociedade de Brasileira de Ciencia do Solo 37(6):1641-1650.
- Crutzen, P.J.; Mosier, A.R.; Smith, K.A.; Winiwarter, W. 2007. *N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels.* Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 7, 11191-11205.
- Chacón, A.; Montenegro, J.; Gijad, J. 2009. *Inventario Nacional de Gases con Efecto Invernadero y Sumideros de Carbono.* IMN-MINAET. 96 p.
- Chaves Solera, M.A. 1986. *Requerimientos, extracción y remoción de nutrientes por la caña de azúcar.* Boletín Informativo DIECA (Costa Rica) Año 4, Nº 29, San José. p: 1-2.
- Chaves, M.; Bermúdez, A. 1999. *Por una mayor conciencia ambiental en el sector azucarero.* En: Congreso de ATACORI "Randall E. Mora A.", 13, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 1999. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), setiembre. p: 274-278.
- 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.
- Chaves Solera, M. 1999b. *El Nitrógeno, Fósforo y Potasio en la caña de azúcar.* San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, setiembre. 130 p.
- 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.
- 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.
- Chaves Solera, M.A. 2015. *Errores y omisiones técnico-administrativas que sacrifican productividad y cuestan dinero en la agroindustria azucarera.* San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, febrero. 16 p.
- Chaves Solera, M.A. 2016. *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.
- 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. 2019a. *Clima y ciclo vegetativo de la caña de azúcar*. Boletín Agroclimático 1(7): 5-6, julio.
- 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.
- Chaves Solera, M.A. 2019c. *Ambiente agroclimático y producción de caña de azúcar en Costa Rica*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(18): 5-10, noviembre-diciembre.
- Chaves Solera, M.A. 2020a. *Participación del clima en la degradación y mineralización de la materia orgánica: aplicación a la caña de azúcar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(12): 6-17, junio.
- Chaves Solera, M.A. 2020b. *Clima, degradación del suelo y productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(15): 5-13, julio.
- Chaves Solera, M.A. 2020c. *Materia orgánica y disponibilidad de nitrógeno para la caña de azúcar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(21): 6-16, octubre.
- Chaves Solera, M.A. 2020d. *Abono verde, consociación y rotación de cultivos en caña de azúcar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(22): 5-19, octubre.
- Chaves Solera, M.A. 2020e. *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. *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.
- Díaz, R. 2001. *Overview of hypoxia around the world*. Journal of Environmental Quality (30): 275-281.
- Elizondo Salazar, J. 2006. *El nitrógeno en los sistemas ganaderos de leche*. Agronomía Mesoamericana 17(1): 69-77.
- Epstein, E.; Bloom, A. 2006. *Nutrição Mineral de Plantas: Principios e Perspectivas*. 2 edic. Trad. María Edna Tenório Nunes. Londrina, Brasil. Editora Planta. 403 p.
- Erisman, J.W. et al. 2008. *How a century of ammonia synthesis changed the world*. Nature Geoscience 1, 636-639.
- Fageria, N.K.; Baligar, V.C. 2001. *Lowland rice response to nitrogen fertilization*. Communications in Soil Science and Plant Analysis 32 (9-10):1405-1429.
- FAO. 2004. *Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH<sub>3</sub>, NO y NO<sub>2</sub> provenientes de las tierras agrícolas*. Roma. Primera versión, publicada por la FAO y la IFA. 120 p.
- 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.
- Follett, R. 2001. *Nitrogen transformation and transport processes*. In: Follett, R.; Hatfield, J. eds. Nitrogen in the environment: Sources, problems and management. Elsevier Science, The Netherlands. p. 17-44.
- Hervani, A.; Kartikawati, R.; Ariani, M.; Setyanto, P. 2017. *N<sub>2</sub>O Emissions from Rainfed Sugarcane Plantation*. Buletin Tanaman Tembaku, Serat & Minyak Industri 9(1): 10-14, april.

Instituto Meteorológico Nacional. 2015. *Inventario nacional de emisiones por fuente, y absorción por sumideros de Gases de Efecto Invernadero en costa Rica 2015*. San José, Costa Rica. Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). 71 p.

IPCC. 2001. *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. NGGIP.

Publications; Japan ([www.ipcc-nggip.iges.or.jp](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp))

Lópes, A.S.; Andrade Junior, A.S.; Bassoi, L.H.; Silva, F.C.; Bastos, E.A.; Paulo, V.F. 2018. *Emissão de óxido nitroso em resposta à aplicação de N em cana-de-açúcar irrigada*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 22(11): 758-763.

Malavolta, E. 1981. *Manual de Química Agrícola: Adubos e Adubação*. 3<sup>era</sup> edic. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda. p: 31-96.

Mengel, K.; Kirkby, E. A. 2001. *Principles of plant nutrition*. 5<sup>th</sup> ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 849 p.

Myhre, G.; Shindell, D.; Bréon, F.M.; Collins, W.; Fuglestedt, J.; Huang, J.; Koch, D.; Lamarque, J.F.; Lee, D.; Mendoza, B.; Nakajima, T.; Robock, A.; Stephens, G.; Takemura T.; Zhang, H. 2013. *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.K.Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Montenegro Ballester, J.; Chaves Solera, M. 2011. En: *Contribución del sector cañero a la mitigación del cambio climático*. Congreso Azucarero Nacional ATACORI "M.Sc. Teresita Rodríguez Salas (+)", 18, Colegio de Ingenieros Agrónomos, San José, Costa Rica, 2011. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 8 y 9 de setiembre del 2011. 14 p.

Montenegro Ballester, J.; Chaves Solera, M. 2012. *Estimación de la emisión Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) por región productora de caña de azúcar en Costa Rica. Primera aproximación*. En: Congreso Tecnológico DIECA 2012, 5, Coopevictoria, Grecia, Alajuela, Costa Rica. Memoria. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), 5, 6 y 7 de setiembre del 2012. 15 p.

Montenegro Ballester, J. 2019. *Respuesta polinómica de la emisión de óxido nitroso en plantaciones de café en Costa Rica*. Revista de Ciencias Ambientales 53(2): 1-24.

Núñez Escobar, R. 2013. *El suelo como medio natural en la nutrición de los cultivos: nitrógeno*. En: Nutrición de Cultivos. 1<sup>ª</sup> edic. Coord.

Gabriel Alcázar González y Libia I. Trejo Téllez. México, Colegio de Postgraduados. p: 100-122.

Ramos Mompo, C.; Ocio Armentia, J.A. 1992. *La agricultura y la contaminación de las aguas por nitratos*. Madrid, España. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Hojas Divulgadoras N° 7/92 HD. 32 p.

Remache, M.; Carrillo, M.; Mora, R.; Durango, W.; Morales, F. 2017. *Absorción de macronutrientes y eficiencia del N, en híbrido promisorio de maíz. Patricia Pilar, Ecuador*. Agronomía Costarricense 41(2): 103-115.

Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA). 2021. *Área y Producción*. En: Boletín Estadístico Agropecuario. Serie Cronológica 2017-2020. Edición N° 31. San José, Costa Rica. Abril.

Thorburn, P.; Biggs, J.; Probert, M. 2010. *Nitrous oxide emissions from soils in Australian sugarcane production systems*. In: 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1-6 August 2010, Brisbane, Australia. p: 187-190.

Wikipedia. 2021a. *Ciclo del Nitrógeno*. Consultado el 26 de agosto 2021. Disponible en: [https://www.google.com/search?q=ciclo+del+nitrogeno&sxsrf=ALeKk00H0ssVsz9brYvhU46x2sXDeDcRwQ%3A1629919734424&ei=9pkmYbusGa-YwbkP5d6KsAU&aq=ciclo+del+nitrogeno&gs\\_lcp=Cgdn3Mtd2l6EAWyBAgjECcyBQgAEIAEMgUIABCABDIFCAAQgAQyBQgAEIAEMgUIABCABDIFCAAQgAQyBQgAEIAEMgUIABCABDIFCAAQgAQ6BwgjE LADECc6BwgAEcQsAM6BAGAEEM6EQguEIAEELEDEIMBEMcBEK8BOggIABCABCCxZozRCC4QgAQQsQMqgWEQxwEQQM6CwgAEIAEELEDEIMBOggIABCxAXCDAToLCC4QgAQQxwEQowl6BQguEIAE OgsLhCABBDHARDRAzoOCC4QgAQQsQMqgWEQowl6CggAELEDEIMBEM6DgguEIAEELEDEMcbEK8BOgsLhCABBDHARCvAUoECEEYAFc1hDNYyLgzYPHm2gBcAJ4AIABkgGIAYORkgEENC4xNZgBAKA BAcgBCcABAQ&scient=gws-wiz&ved=0ahUKEwi7\\_6CW9MzyAhUvTDABHWWvAIYQ4dUDCA8](https://www.google.com/search?q=ciclo+del+nitrogeno&sxsrf=ALeKk00H0ssVsz9brYvhU46x2sXDeDcRwQ%3A1629919734424&ei=9pkmYbusGa-YwbkP5d6KsAU&aq=ciclo+del+nitrogeno&gs_lcp=Cgdn3Mtd2l6EAWyBAgjECcyBQgAEIAEMgUIABCABDIFCAAQgAQyBQgAEIAEMgUIABCABDIFCAAQgAQyBQgAEIAEMgUIABCABDIFCAAQgAQ6BwgjE LADECc6BwgAEcQsAM6BAGAEEM6EQguEIAEELEDEIMBEMcBEK8BOggIABCABCCxZozRCC4QgAQQsQMqgWEQxwEQQM6CwgAEIAEELEDEIMBOggIABCxAXCDAToLCC4QgAQQxwEQowl6BQguEIAE OgsLhCABBDHARDRAzoOCC4QgAQQsQMqgWEQowl6CggAELEDEIMBEM6DgguEIAEELEDEMcbEK8BOgsLhCABBDHARCvAUoECEEYAFc1hDNYyLgzYPHm2gBcAJ4AIABkgGIAYORkgEENC4xNZgBAKA BAcgBCcABAQ&scient=gws-wiz&ved=0ahUKEwi7_6CW9MzyAhUvTDABHWWvAIYQ4dUDCA8)

Wikipedia. 2021b. *Índice GWP*. Consultado el 26 de agosto 2021. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%8Dndice\\_GWP](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%8Dndice_GWP)

Wikipedia. 2021c. *Óxido Nitroso*. Consultado el 24 de agosto 2021. Disponible en: <https://www.google.com/search?q=oxido+nitroso&aq=oxido+nitroso&aqs=chrome..69i57j0i512l9.6769j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF->

BOLETÍN



LAICA

# AGROCLIMÁTICO CAÑA DE AZÚCAR

Setiembre 2021 - Volumen 3 – Número 19