

Periodo 12 de julio al 25 de julio 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 28 DE JUNIO AL 11 DE JULIO

En la figura 1 se puede observar, a partir de datos preliminares de 112 estaciones meteorológicas, el acumulado quincenal de lluvias sobre el territorio nacional.

Cada región cañera muestra una distribución particular de lluvia diaria. Guanacaste Este muestra sus días más lluviosos del 2-4 y 10 de julio; Guanacaste Oeste durante 4 y 11 de julio; Norte los días 30 de junio y 10 de julio; Puntarenas tanto 29 de junio como 3 y 10 de julio; Sur entre 2-3 y 11 de julio; Turrialba mantuvo escasas lluvias excepto el 30 de junio además de 4-5 y 10 de julio; Valle Central los días 4 y 10-11 de julio.

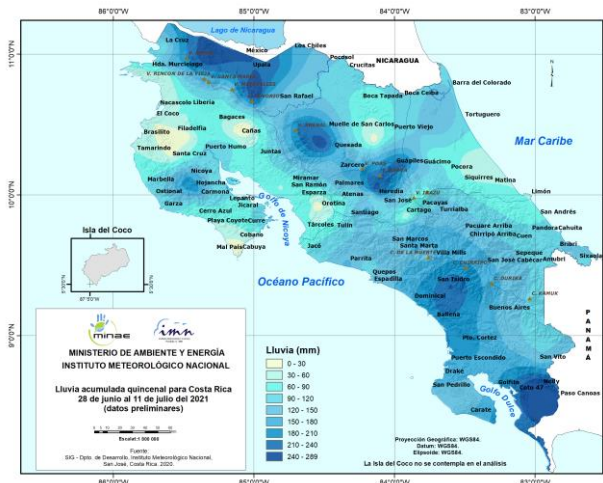


Figura 1. Valores acumulados de la precipitación (mm) durante la quincena del 28 de junio al 11 de julio del 2021.

PRONÓSTICO PARA LAS REGIONES CAÑERAS PERIODO DEL 12 DE JULIO AL 18 DE JULIO

De la figura 2 a la figura 9, se muestran los valores diarios pronosticados de las variables lluvia (mm), velocidad del viento (km/h) y temperaturas extremas (°C) para las regiones cañeras. Se prevé una semana con condiciones menos lluviosas de lo normal en todas las regiones cañeras. Con humedad variable durante la semana, al tiempo que se espera un alto aporte en la región Valle Central y poco aporte de humedad en Guanacaste Oeste a la largo del periodo; además de alto aporte particularmente hacia el fin de semana para la región Norte

Predominando a lo largo de la semana el viento del Este en casi todas las regiones, excepto Turrialba y Sur en las cuales predomina viento variable y viento del Oeste respectivamente. Mientras la temperatura media se mostrará normal para la época, con patrón normal de valores máximos por las mañanas, excepto Sur y Turrialba.

“Se espera la influencia de la onda tropical #15 mediados de semana, seguido de presencia de polvo del Sahara; así como la onda tropical #16 hacia el fin de semana.”

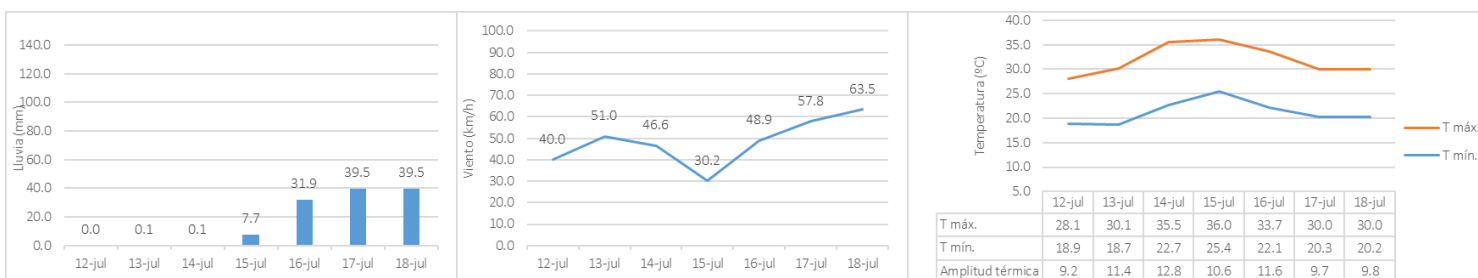


Figura 2. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 12 de julio al 18 de julio en la región cañera Guanacaste Este.

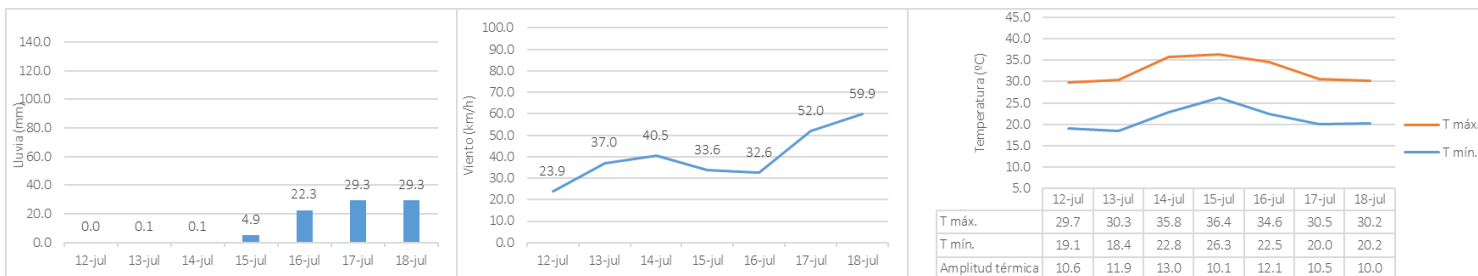


Figura 3. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 12 de julio al 18 de julio en la región cañera Guanacaste Oeste.

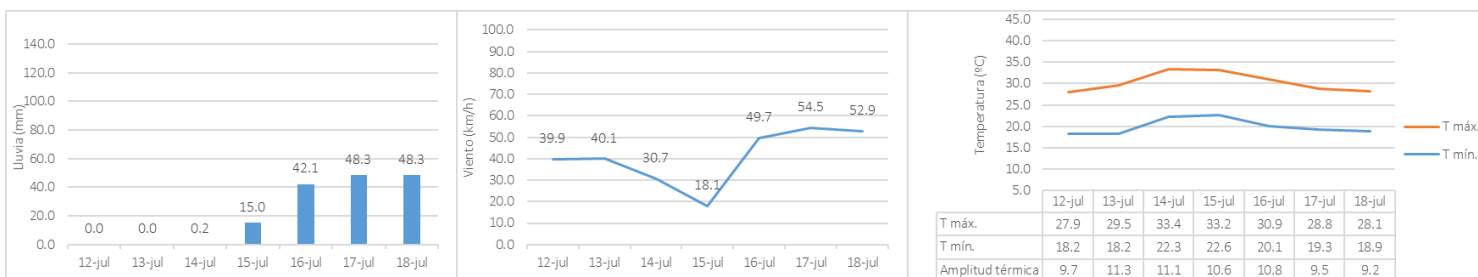


Figura 4. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 12 de julio al 18 de julio en la región cañera Puntarenas.

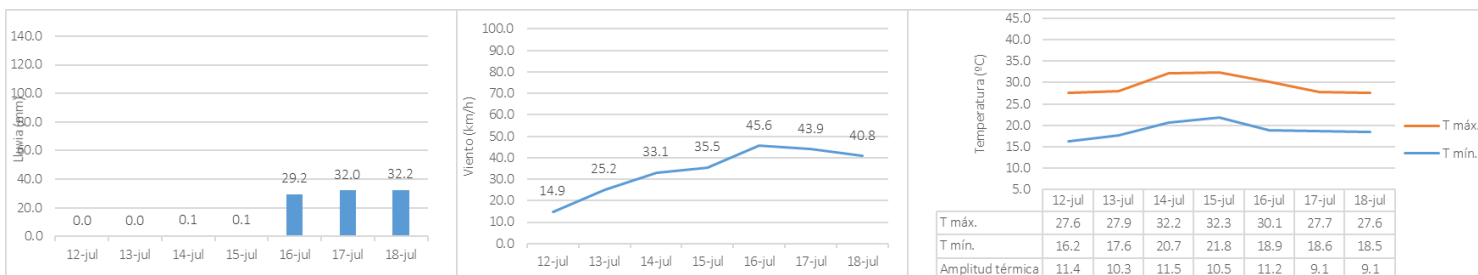


Figura 5. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 12 de julio al 18 de julio en la región cañera Zona Norte.

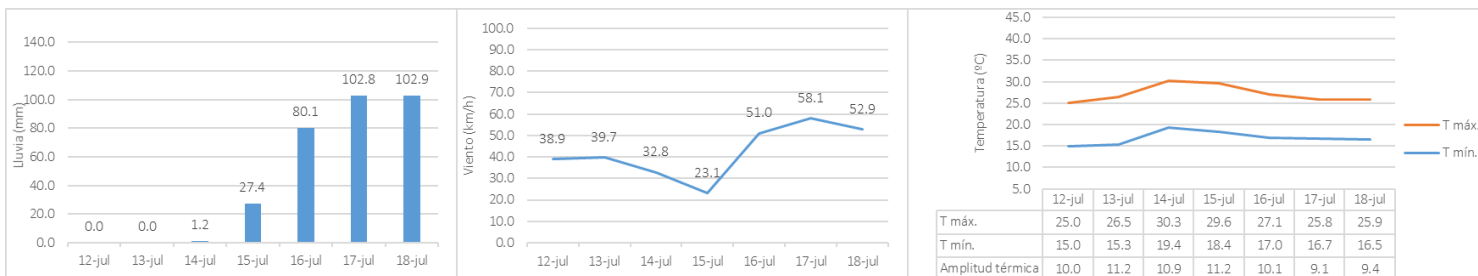


Figura 6. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 12 de julio al 18 de julio en la región cañera Valle Central Este.

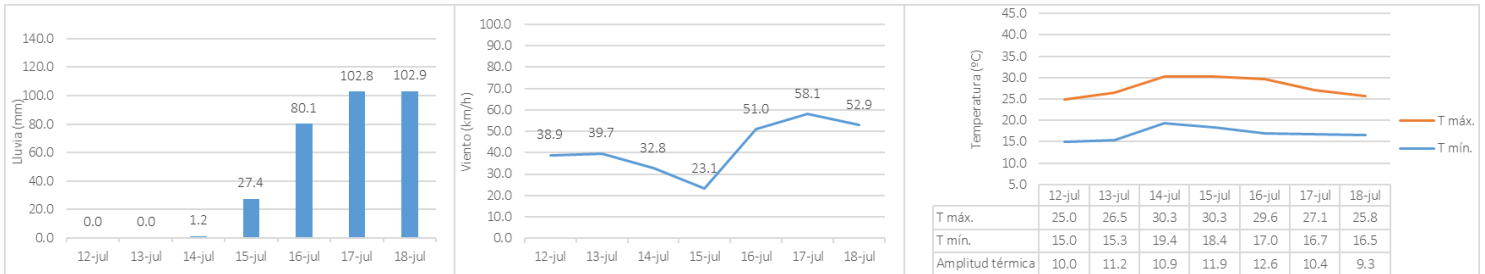


Figura 7. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 12 de julio al 18 de julio en la región cañera Valle Central Oeste.

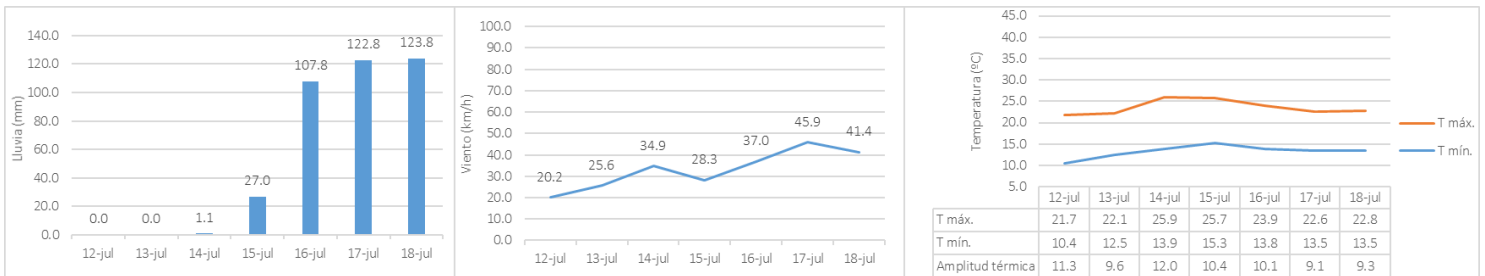


Figura 8. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 12 de julio al 18 de julio en la región cañera Turrialba.

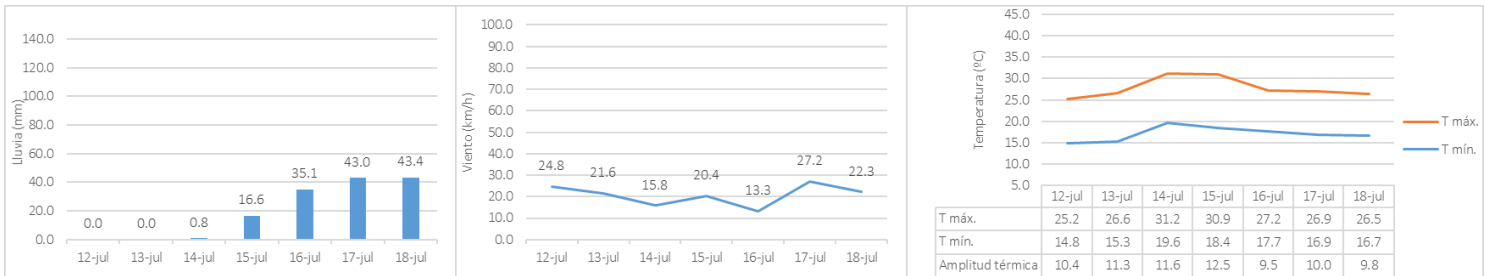


Figura 9. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 12 de julio al 18 de julio en la región cañera Zona Sur.

TENDENCIA PARA EL PERIODO DEL 19 DE JULIO AL 25 DE JULIO

Se prevé una semana menos lluviosa de lo normal en las diversas regiones cañeras, principalmente en Guanacaste Oeste; mientras la región Sur muestra un patrón levemente más lluvioso de lo normal. Predominando a lo largo de la semana el viento del Este en casi todas las regiones, excepto Turrialba. La temperatura promedio se mantendrá normal para el periodo, a lo largo de la semana.

HUMEDAD DEL SUELO ACTUAL PARA REGIONES CAÑERAS

De acuerdo con Central America Flash Flood Guidance System (CAFFG), el cual estima la humedad en los primeros 30 cm de suelo, a inicios de la semana del 05 al 11 de julio de 2021 los suelos de la Región Guanacaste Oeste, Región Norte y Región Sur presentaron porcentajes de humedad altos; a partir del jueves la humedad aumentó en la Zona Norte, pero disminuyó en la Región Guanacaste Oeste. Para el sábado la saturación aumentó en todas las regiones cañeras.

Como se observa en la figura 11, la Región de Guanacaste Oeste tiene entre 30% y 90%, mientras que la Región Guanacaste Este presenta entre 30% y 75% de saturación. La Región Puntarenas está entre 30% y 75%; la Región Valle Central Oeste tiene entre 60% y 90% y la Región Valle Central Este presenta entre 45% y 60%.

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

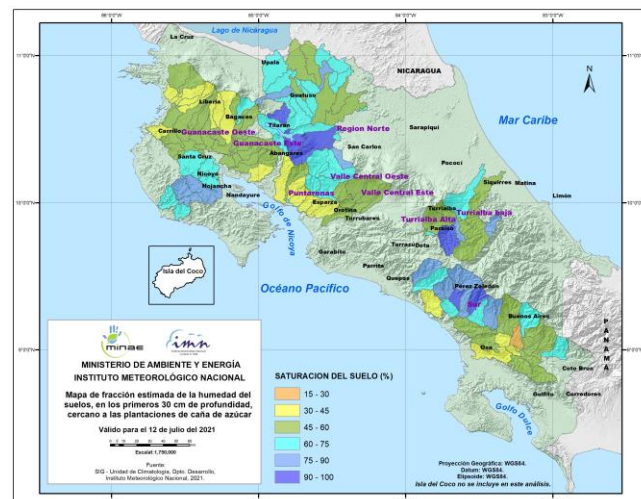





Figura 11. Mapa de fracción estimada de la humedad en porcentaje (%), en los primeros 30 cm de profundidad, cercana a las plantaciones de caña de azúcar, válido para el 12 de julio del 2021.

DIECA Y EL IMN LE RECOMIENDAN

Mantenerse informado con los avisos emitidos por el IMN en:

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

CRÉDITOS BOLETÍN AGROCLIMÁTICO

Producción y edición del Departamento de Desarrollo
 Meteoróloga Karina Hernández Espinoza
 Ingeniera Agrónoma Katia Carvajal Tobar
 Geógrafa Nury Sanabria Valverde
 Geógrafa Marilyn Calvo Méndez

Modelos de tendencia del Departamento de
 Meteorología Sinóptica y Aeronáutica

INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL

PERSPECTIVA CLIMÁTICA

Trimestre de julio a setiembre del 2021.

Pronóstico: Met. Luis Fernando Alvarado, Lic.
luis@imn.ac.cr
 Coordinador Unidad de Climatología (IMN)

Redacción y edición: Met. Karina Hernández Espinoza, M.Sc.
khernandez@imn.ac.cr
 Coordinadora del Boletín Agroclimático (IMN)

Las estaciones meteorológicas monitoreadas durante el mes de junio muestran lluvias deficitarias en la mayor parte del país. La región climática Caribe Norte registra el menor déficit de 23%, Caribe Sur evidencia 25% menos de lluvia, a su vez Zona Norte registra 19% de déficit y Valle Central alcanza una reducción de 13%. Las regiones climáticas con excedente de lluvia en junio fueron: Pacífico Norte con 33%, Pacífico Central muestra 11%, región GLU registra 5% y Pacífico Sur presentó 17% más de lluvia. La figura 1 contiene la lluvia acumulada mensual del mes de junio.

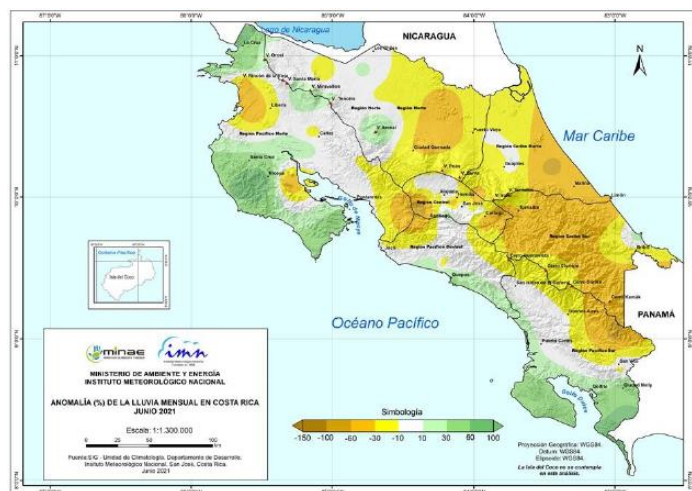


Figura 1. Mapa de anomalía porcentual de lluvia del mes de junio 2021 a nivel nacional. Fuente: UC-IMN.

La COENOS-IMN identifica la ocurrencia del fenómeno ENOS en su fase Neutra, hasta septiembre, acompañada de temperaturas del Océano Atlántico entre los rangos normales durante el trimestre de julio a setiembre del 2021, como se muestra en la figura 2.

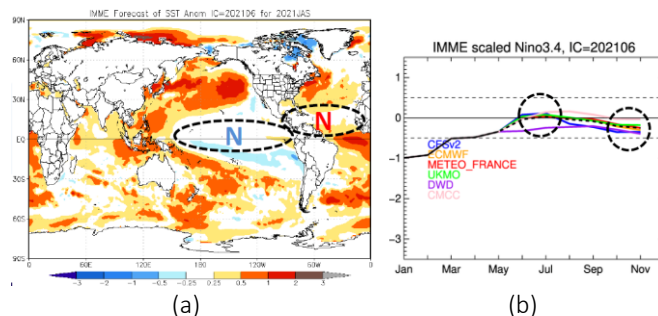


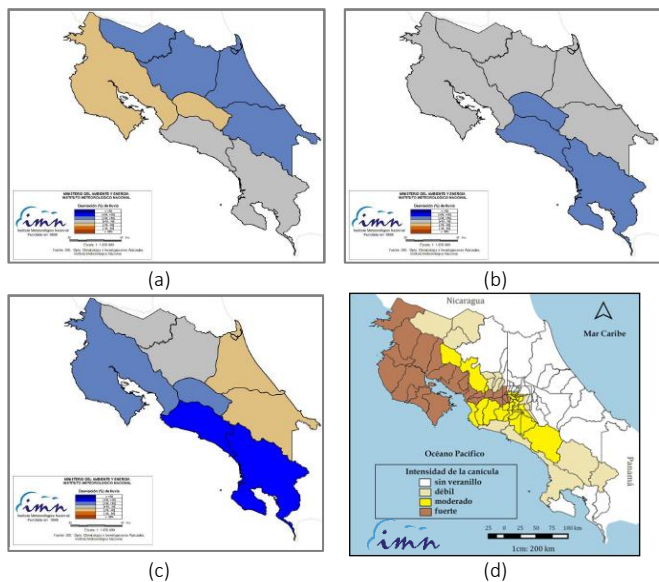
Figura 2. (a) Pronóstico probabilístico de la temperatura superficial del Mar para el trimestre de julio a setiembre del 2021. (b) Pronóstico determinístico del ENOS hasta octubre 2021. Fuente: NOAA.

Debido a estos y otros análisis se pronostica un trimestre con condiciones entre 10-30% más húmedas de los normal en las regiones climáticas del Pacífico Sur, Pacífico Central y Valle Central, en tanto que las demás regiones presentarán lluvias normales para la época. El detalle por región de la perspectiva mensual se identifica en la figura 3.

La perspectiva para el 2021 de la temporada de ciclones tropicales de la cuenca del Océano Atlántico Tropical Norte se muestran en el cuadro 1. De forma que el riesgo de efecto directo será menor a lo normal en el periodo de interés. La última Tormenta Tropical registrada en la temporada fue Elsa, siendo la primera del periodo que ingresa al Mar Caribe.

Cuadro 1. Perspectiva de la temporada de ciclones tropicales de la cuenca del Océano Atlántico Tropical Norte durante el 2021.

PRONOSTICO TEMPORADA 2021				
CUENCA	TORMENTAS	HURACANES (1,2)	HURACANES (3,4,5)	TOTAL
ATLANTICO	9 - 11	4 - 5	3 - 4	16 - 20



La canícula se percibirá apropiadamente entre el 6 y 26 de julio, afectando con mayor medida las regiones arroceras Chorotega Oeste y Chorotega Este; mientras las regiones Pacífico Central y Huetar Norte lo percibirían en menos medida; en tanto que la región Brunca se espera entre débil nula. Tal como se muestra en la figura 3. No se descarta la persistencia de la Canícula en la primera quincena de agosto, durante el mes de julio se actualizará esta tendencia.

Figura 3. Pronóstico de lluvias para julio (a), agosto (b), setiembre (c) y la Canícula con su posible intensidad. (d) del 2021. (Fuente: IMN)

NOTA TÉCNICA

Fijación biológica de nitrógeno atmosférico (N₂) por la caña de azúcar: un importante potencial por aprovechar

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

chavessolera@gmail.com

Especialista en Caña de Azúcar

Introducción

Con motivo de las características dinámicas, cambiantes y heterogéneas del clima, la condición particular de los suelos, la extrema variabilidad del relieve, la tipología divergente de posesión de la estructura de tenencia de la tierra, la prevalencia de sistemas diversificados de producción de caña existentes, la imperiosa necesidad de incrementar la productividad agroindustrial, la rentabilidad y la competitividad comercial en un entorno agroproductivo, económico y comercial muy difícil como el actual; provoca que el tema de los costos y la ecoeficiencia surjan inevitablemente como factores determinantes y sugestivas metas por atender y mejorar.

En toda esta peculiar situación por resolver, polarizada entre limitantes y potenciales, la fertilización, especialmente la nitrogenada, se convierte en un asunto de imperiosa necesidad que debe adecuarse buscando la optimización de la producción agrícola e industrial de la caña de azúcar, a través del máximo rendimiento de biomasa y sacarosa del cultivo; esto, sin afectación de la rentabilidad y la sostenibilidad ambiental.

Sin embargo y como es ampliamente conocido y está suficientemente constatado científicamente, las pérdidas observadas en la fertilización nitrogenada por la injerencia de factores bióticos y abióticos, ocasionan dos efectos colaterales importantes como son la contaminación ambiental favorecida por la lixiviación de nitrógeno a aguas subterráneas y las pérdidas por volatilización y gasificación a la atmósfera en forma de N₂O. Dichas mermas del nutrimento generan a su vez pérdidas económicas cuantiosas que se tornan contraproducentes para el interés particular de la agroempresa (Chaves, 2021b).

En la coyuntura especial y dinámica en que se moviliza la comercialización y la producción de caña de azúcar y sus

derivados en el mundo en la actualidad, resulta imperativo y obligado diseñar estrategias tecnológicas y de mercadeo efectivas, que habiliten espacios viables, factibles y creativos de gestión para superar las limitantes que, a criterio de la opinión pública, sumado a los demandantes y consumidores del endulzante, estiman contrarios al interés común, y, por tanto, necesarios mitigar, eliminar y/o superar. La búsqueda de una agricultura más orgánica, más biológica y más alejada de los agroquímicos es una realidad que los selectivos mercados de destino imponen, no apenas una simple postura ideológica de algunos como podría creerse.

En este contexto y entorno sectorial nacional e internacional, la búsqueda e implementación de estrategias en el campo tecnológico que causen impacto y estén en línea con ese objetivo, de manera que permitan disminuir contaminación y optimizar en este caso la fertilización nitrogenada en los campos cultivados con caña de azúcar, sin perder productividad ni incrementar costos, se convierte en un incuestionable desafío por alcanzar. En este particular, además de los mecanismos conocidos y tradicionales de confrontar esa necesidad, surge el aprovechamiento y utilización de microorganismos fijadores de nitrógeno atmosférico como alternativa para atender la nutrición de las plantas de caña de azúcar, con lo cual se favorecería reducir las altas dosis incorporadas con la fertilización nitrogenada, disminuyendo a su vez los efectos económicos y ambientales causados por los excesos observados en la fertilización mediante el empleo de productos tradicionales de síntesis química.

Como expresara Chaves (1999b) hace más de dos décadas, al abordar y referirse al tema “Al igual que acontece con otras plantas, principalmente leguminosas (frijol común, soya, habas, trébol, guisantes, *Mimosa* sp., *Stylosantes* y especies arbóreas como *Leucaena* spp.), se ha demostrado recientemente, luego

de más de 40 años de investigación, que la caña de azúcar posee la propiedad y capacidad de fijar N biológicamente en cantidades apreciables.”

El uso de biofertilizantes constituidos a base de bacterias fijadoras de nitrógeno, solubilizadoras de fósforo, promotoras de crecimiento y abonos orgánicos de calidad, son alternativas tecnológicas cuyos resultados logrados por la investigación han evidenciado y mostrado tener efectos favorables para elevar los rendimientos agroindustriales de la caña de azúcar, la conservación del suelo y la mejora del ambiente. Esta circunstancia ha motivado que la posibilidad de inocular bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico (N₂) en plantas de caña, gane cada vez más interés y sea una realidad tecnológica y comercial.

Con fundamento en lo anterior, tiene como objetivo primario el presente artículo, abordar y conocer más en torno al tema de la fijación biológica de nitrógeno atmosférico (N₂) por parte de la caña de azúcar, con el objeto de valorar la capacidad de aprovechar y potenciar la misma en el país, como instrumento para reducir las aplicaciones del nutrimento, disminuir los costos asociados, elevar la rentabilidad, mitigar adicionalmente la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y generar mayor sustentabilidad a la actividad cañero-azucarera.

Nitrógeno y nutrición

Resulta en primera instancia obligado reconocer y aceptar que el nitrógeno constituye sin lugar a dudas, el principal elemento nutricional esencial requerido para acompañar y satisfacer los mecanismos biológicos implicados en el desarrollo vegetal y contribuir ostensiblemente con la productividad de la caña de azúcar; siendo el fósforo y el potasio el segundo y tercer elemento mineral en importancia para completar el desarrollo fenológico de la planta. Por ello, la tradicional formulación N-P-K resulta muy expresiva de la relevancia que tienen esos nutrimentos primarios en la nutrición general de la planta de caña; lo cual, como se ha reiteradamente manifestado, corresponde biológicamente a un concepto integral de balances y equilibrios y no apenas a contenidos parciales de elementos químicos (Chaves, 2021a).

Por ese motivo, no puede desconocerse ni tampoco obviarse la importancia y trascendencia que tienen y ejercen los otros nutrimentos declarados como esenciales que, en cantidades y funciones diferenciadas, operando mediante interacciones

sinérgicas y antagónicas, también participan activamente de los procesos fisiológicos y metabólicos que acontecen en las plantas, entre los que destacan el Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (O) como gases; además de Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Azufre (S), Zinc (Zn), Boro (B), Hierro (Fe), Cobre (Cu), Manganeseo (Mn), Molibdeno (Mo), como minerales inorgánicos. El N es el elemento mayoritario de las plantas; sólo el C, el H y el O son más abundantes que él en los tejidos vegetales. En la actualidad se agregan a esa categoría selecta otros elementos como Silicio (Si), Sodio (Na), Cloro (Cl), Cobalto (Co), Níquel (Ni) y Selenio (Se), nombrados por Epstein y Bloom (2006) como *“casi esenciales, aparentemente no esenciales o no conocidos como esenciales”*, de acuerdo con los rígidos principios establecidos en esa categorización nutricional.

El nitrógeno por su función fisiológica y funcionabilidad en la planta es vital y determinante para el éxito productivo y comercial sostenible de cualquier plantación de caña de azúcar, señalando Chaves (1999ab), entre otras, las siguientes funciones:

- *“Es determinante en el metabolismo general de los compuestos orgánicos de la planta.*
- *Forma parte de numerosos compuestos como aminoácidos y proteínas, aminas, amidas, aminoazúcares, nucleótidos, purinas y pirimidinas, alcaloides, coenzimas, vitaminas y pigmentos.*
- *Es un componente importante de la molécula de clorofila.*
- *Forma parte de la estructura molecular de los ácidos nucleicos (ADN y ARN) y también de los citocromos.*
- *Al formar parte de gran cantidad y calidad de compuestos, está implicado directamente en muchos de los procesos de crecimiento y desarrollo de la planta.*
- *Mantiene una relación sinérgica particularmente especial con el potasio, favoreciendo o limitando su accionar dependiendo de la condición de equilibrio en que se encuentre.*
- *Aumenta la longitud y el grosor de los tallos por lo que determina los rendimientos agrícolas de forma importante.*
- *Aplicado tardíamente o en altas cantidades puede afectar negativamente la calidad de los jugos, reduciendo su pureza e incrementando el contenido de azúcares reductores (glucosa y fructuosa), lo que consecuentemente disminuye la concentración de sacarosa en los jugos.”*

La experiencia comercial nacional y mundial de muchos años ha demostrado de manera consistente y contundente, que resulta casi imposible pretender obtener altas productividades de caña con altos rendimientos de sacarosa sin el uso de nitrógeno, lo cual se torna además insostenible en el tiempo para una plantación cuando valorado comercialmente. La alta producción de biomasa por la caña de azúcar se sustenta en lo que el suelo pueda naturalmente proveerle, mejorado con lo que el agricultor le aporte complementariamente por medio de la fertilización. El productor de caña debe admitir y entender que toda la producción de materia prima que zafra a zafra se recolecta, queda en el campo, extrae y transporta de su plantación a la fábrica de azúcar para su procesamiento, se sustenta en buena parte en la disponibilidad y asimilación de nutrientes que pueda tener la planta en el entorno agroproductivo donde se desarrolla. Visualizado y proyectado en el tiempo esa relación nutricional se torna deficitaria, desequilibrada e insostenible si lo extraído no se restituye adecuadamente en el suelo, conduciendo a crear una condición sistemática e inconveniente de infertilidad.

La mejor respuesta al nitrógeno se ha dado mediante aplicaciones granulares al suelo, pues como apuntara Chaves (2021b), *“...la aplicación foliar de productos nitrogenados como la urea no han demostrado ser lo suficientemente eficientes y rentables para pretender complementar y, menos aún, sustituir las aplicaciones de N granular al suelo. Otras fuentes en presentación líquida (amoniacaes) fueron evaluadas en el país con resultados técnicos satisfactorios, aunque limitante en cuando a la posibilidad de implementar y operar pragmáticamente el mecanismo implicado en buena parte de nuestras plantaciones por motivos de relieve, razones mecánicas, económicas y operativas.”*

¿Origen del nitrógeno?

Es importante considerar y tener presente en primera instancia, que la atmósfera posee una cantidad muy apreciable de nitrógeno que se estima próxima al 79% en volumen; el cual, sin embargo, la mayoría de organismos no está en capacidad de acceder y asimilar directamente, debido a no poder romper en triple, fuerte y estable enlace covalente que se forma entre los dos átomos de nitrógeno ($N=N$) que es un gas inerte, y disponer de formas más reactivas como el amoníaco (NH_3) o el nitrato (NO_3). Para que eso sea posible, es necesario invertir en

energía. El hecho de no poder tener acceso con facilidad a ese enorme reservorio desaprovecha una fuente inagotable de N.

De acuerdo con Epstein y Bloom (2006), de toda la fijación natural de N atmosférico y biológico que ocurre en el medio, un 2% del N fijado procede de la reacción fotoquímica que se da entre el óxido nítrico gaseoso y el ozono (molécula compuesta por tres átomos de oxígeno (O_3), formada al disociarse los dos átomos que componen el gas oxígeno (O_2) que genera ácido nítrico- HNO_3). Contabiliza también un 8% originado a partir de la emisión de relámpagos que convierten el vapor de agua y el oxígeno atmosférico en radicales hidroxilos libres altamente reactivos; donde los átomos libres de hidrógeno y oxígeno atacan la molécula de N para formar ácido nítrico (HNO_3), el cual es precipitado y depositado en el suelo a través de la lluvia o el hielo. Anotan esos autores que el 90% restante del N procede de la fijación biológica, por medio de la cual las bacterias fijan el N molecular (N_2) en amoníaco (NH_3). Como se infiere, la fijación bacteriana es un mecanismo natural determinante para poder disponer N accesible, asimilable y barato para las plantas, lo cual se debe fomentar y consolidar.

El nitrógeno se encuentra contenido en el suelo en forma inorgánica (2%) siendo proporcionalmente removido por las plantas en cantidades superiores al resto de nutrientes, lo que marca su relevancia en el desarrollo de los cultivos; sin embargo, la mayor cantidad se encuentra contenido en forma orgánica (98%), debiendo por ello ser mineralizado y descompuesto a formas absorbibles para poder ser asimilado y utilizado por las plantas.

¿En qué consiste la fijación biológica de N?

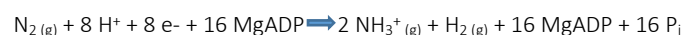
Cuando no se dispone de fertilizantes nitrogenados o no hay residuos orgánicos en el medio, la dinámica y estabilidad del agro ecosistema queda dependiendo completamente de un grupo de microorganismos que tienen la habilidad para reducir el nitrógeno atmosférico (N_2) a amonio (NH_4^+), a través de la síntesis de un complejo enzimático denominado nitrogenasa. Este nitrógeno orgánico es convertido luego a diferentes formas químicas, que pueden ser utilizadas por las plantas y por los mismos microorganismos para suplir total o parcialmente sus requerimientos de síntesis de proteínas y otros compuestos orgánicos. Este proceso de conversión del nitrógeno atmosférico se debe entonces, a que algunos microorganismos

especializados tienen la capacidad de sintetizarlo por medio de un complejo enzimático denominado nitrogenasa, como lo señalaran Geisseler *et al* (2010).

Existen bacterias procariotas (células que presentan ADN libre en el citoplasma, no poseen núcleo celular) de vida libre que tienen la capacidad de convertir el nitrógeno atmosférico en amonio en el suelo; algunas forman asociaciones simbióticas (convivencia “simbiosis” entre seres vivos de distinta especie para obtener algún beneficio común) con plantas superiores, donde el procarionte sufre directamente a la planta N fijado en intercambio con otros nutrientes y carbohidratos; el ejemplo más común y conocido se da en la familia de las leguminosas (Fabaceae) y bacterias de suelo conocidas como Rizobios, que incluyen representantes de los géneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium*, *Sinorhizobium* y

Photorhizobium. El Cobalto (Co) es necesario en la operatividad del sistema.

La fijación biológica de N es similar a la sucedida en el proceso industrial de fabricación de fertilizantes (donde se requiere más de 800 °C de temperatura y bastantes atmósferas de presión (proceso Haber Bosch), solo que, operada en condición ambiente de temperatura y presión produce amoníaco (NH₃⁺) a partir de nitrógeno (N₂) e hidrógeno (H₂) molecular, catalizado por el complejo de la enzima nitrogenasa. La nitrogenasa es muy sensible al O₂. Puede asegurarse que algunas bacterias pueden fijar nitrógeno, gracias a que poseen el complejo enzimático nitrogenasa, como se expone seguidamente:



Cuadro 1. Grupos representativos de organismos fijadores de N₂ y algunas de sus características.

I. Fijadores de vida libre		
Arqueobacterias	<i>Methanosarcina</i>	Constituyen un reino diferenciado de las eubacterias
	<i>Methanococcus</i>	Presentan algunas características peculiares, como poseer intrones
Anaerobios	<i>Clostridium</i>	Suelos, aguas dulces y marinas, sedimentos, tracto intestinal
Anaerobios facultativos	<i>Klebsiella</i>	Flora intestinal, suelos, aguas
Microaerobios	<i>Azospirillum</i>	Suelos, generalmente asociado a raíces de plantas
Aerobios	<i>Azotobacter</i>	Suelos, aguas y superficies vegetales. Generalmente más eficaces a bajas concentraciones de O ₂
	<i>Beijerinckia</i>	
Bacterias fotosintéticas	<i>Rhodospirillum</i>	Acuáticas. Fijan N ₂ en anaerobiosis utilizando la energía de la fotosíntesis
	<i>Chromatium</i>	
Cianobacterias sin heterocistos	<i>Oscillatoria</i>	Fijan N ₂ en microaerobiosis o en aerobiosis con separación temporal de la fijación y de la fotosíntesis
	<i>Gloeotheca</i>	
Cianobacterias con heterocistos	<i>Nostoc</i>	Capaces de fijar N ₂ en condiciones aeróbicas y anaeróbicas
	<i>Anabaena</i>	
II. Fijadores en simbiosis		
Con leguminosas	<i>Rhizobium</i> , <i>Sinorhizobium</i> ,	Leguminosas de origen templado. Leguminosas de origen tropical y subtropical
	<i>Mesorhizobium</i> ,	
	<i>Bradyrhizobium</i> ,	Sesbania
	<i>Allorhizobium</i>	
	<i>Azorhizobium</i>	
Con no leguminosas	<i>Frankia</i>	<i>Alnus</i> , <i>Casuarina</i> , <i>Myrica</i> , <i>Comptonia</i> , <i>Coriaria</i>
Otras simbiosis	<i>Nostoc</i>	Hongos (formando líquenes), briófitos (<i>Blasia</i>), gimnospermas (<i>Macrozamia</i>) y angiospermas (<i>Gunnera</i>)
	<i>Anabaena</i>	Pteridófitos (<i>Azolla</i>)

Fuente: Aparicio, P.M.; Arrese, C.; Becana, M. (2008).

Aparicio, Arrese y Becana (2008) señalan en torno al tema, que *“La fijación biológica de N_2 es catalizada por el complejo enzimático nitrogenasa, que se encuentra exclusivamente en los procariontes. La capacidad de un organismo para fijar N_2 puede determinarse experimentalmente mediante la incorporación de $^{15}N_2$, si bien la presencia en un organismo de los genes que codifican las proteínas necesarias para la síntesis de la nitrogenasa (genes nif) se considera también un indicador de su capacidad fijadora. El espectro de organismos diazotófos, o fijadores de N_2 , es muy amplio, hasta el punto de que éstos pueden encontrarse en casi cualquier hábitat. El Cuadro 1 indica de manera resumida algunos de los grupos más representativos.”*

Asegura Acuña (2009) al abordar el tema de capacidades, que *“La cantidad global de nitrógeno fijado biológicamente se estima que puede ser alrededor de unos 200 a 250 millones de toneladas (t)/año. La dificultad de una estimación fiel deriva de la gran variedad de microorganismos fijadores y de los diferentes ecosistemas posibles. Una parte importante de esa cifra global corresponde al nitrógeno fijado en el mar por las cianobacterias que allí se desarrollan, y algo menos de la mitad se atribuye a la fijación por microorganismos de vida libre, ya que la simbiótica, aunque sea más alta en los cultivos, está limitada a unas pocas especies vegetales.”*

La reacción es de acuerdo con Barlocco (2012), operada únicamente por organismos procariontes (no tienen núcleo definido y ni organelos rodeados por membrana) conocidos como *“Diazótrofos”*, adaptados a condiciones ambientales muy diversas, de vida simbiótica libre, rizosféricos o en su caso endófitos. Es interesante hacer notar en este punto, que la fijación biológica del nitrógeno atmosférico por bacterias diazotróficas, se dice que es el segundo proceso más importante después de la fotosíntesis que ocurre en la naturaleza, lo que denota su magnitud.

Mencionan de manera más específica Lara y compañeros (2007) en torno al proceso, que *“todos los microorganismos que convierten el nitrógeno (N_2) en amoníaco lo hacen gracias a la actividad del complejo enzimático llamado nitrogenasa que está constituido por dos metaloproteínas: la proteína (I), llamada hierro-molibdeno-proteína, y la proteína (II), llamada hierro-proteína; la enzima requiere de la colaboración de otras dos proteínas: ferredoxina y flavodoxina, que actúan como donadores de electrones y reductores naturales de la*

nitrogenasa. Los electrones son transportados a la nitrogenasa por la ferredoxina y llegan a la hierroproteína, ésta activa a la Mo-Fe-proteína y se produce la reducción de nitrógeno, siendo luego fijado como compuesto aminado.”

Puede entenderse entonces la fijación biológica de N como el proceso natural por medio del cual, organismos del suelo asimilan N elemental (N_2) que se traduce en un incremento de la fracción de N orgánico del suelo. Dicha fijación puede ser realizada por dos tipos de microorganismos:

- 1) **Fijación simbiótica:** opera mediante simbiosis (relación que por lo regular aporta beneficios a los dos) por bacterias del género *Rhizobium* con especies de plantas leguminosas como *Phaseolus*, *Leucaena*, *Desmodium*, *Stylosanthes* y *Glycine*; lo que se amplía a las *Casuarinas* y jaules (*Alnus* sp). Esta fijación se da en raíces y hasta en hojas. Por fijación de N se entiende la combinación de nitrógeno molecular o dinitrógeno (N_2) con oxígeno o hidrógeno para formar óxidos o amonio que pueden incorporarse a la biósfera y constituirse en un reservorio importante para las plantas. La evidencia de fijación en gramíneas tropicales entre ellas la caña de azúcar es cada vez más fuerte.
- 2) **Fijación asimbiótica:** esta modalidad de fijación es desarrollada por microorganismos de vida libre que proporcionan al medio compuestos nitrogenados como amonio (NH_4^+), que son luego aprovechados por los vegetales. Heterótrofos aeróbicos de bacterias de los géneros *Azotobacter*, *Beijerinckia* y *Derxia* son comunes en suelos tropicales. Entre los heterótrofos anaeróbicos (no pueden producir su propio alimento, deben nutrirse de otras fuentes de carbono orgánico) está el género *Clostridium*. También los géneros *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Enterobacter* y *Klebsiella* son eficientes fijadoras asimbióticas de nitrógeno, contribuyendo a que los agricultores economicen en fertilizantes nitrogenados conservando el ambiente. La cantidad de N fijada es menor en relación con la de las Simbióticas, estimándose entre 2 y 10 kg/ha/año, aunque puede ser excepcionalmente muy superior.

En el área de la rizósfera (sección del suelo inmediata a las raíces vivas que está bajo su influencia directa) se dan interacciones importantes e intensivas en las que intervienen la planta, el suelo, los microorganismos y la microfauna del medio; además de la influencia que ejerce el clima (FAO 2017).

Las interacciones bioquímicas e intercambio de moléculas entre plantas y microorganismos del suelo pueden influir significativamente en el crecimiento y rendimiento del cultivo. La biota de microorganismos y otros agentes que se encuentran en la rizósfera incluyen bacterias, hongos, nemátodos, protozoos, algas y microartrópodos; siendo sin embargo las bacterias y los microorganismos los más abundantes (Antoun y Prévost 2005).

La rizósfera establece un microhábitat densamente poblado que incluye raíces de plantas y el suelo circundante, en el cual los exudados provenientes de las raíces propician un microambiente muy particular que influencia las condiciones y características del suelo circundante y su microflora. Como es sabido, las plantas exudan una gran cantidad y variedad de compuestos que inducen cambios químicos y biológicos del microhábitat de esa zona. Los exudados de compuestos carbónicos proveen fuentes de energía y nutrientes disponibles para los microorganismos presentes.

En las gramíneas, la composición cuantitativa y cualitativa de los microorganismos en la rizósfera varía entre especies e incluso entre individuos de la misma especie, lo cual se atribuye a la cantidad y la calidad de los exudados de las raíces.

El mecanismo simbiótico para fijar nitrógeno es formar en las raíces (parénquima radicular) de las leguminosas mediante división celular acelerada, estructuras llamadas nódulos (pequeñas protuberancias) que son el resultado de la alelopatía (fenómeno biológico por el cual un organismo interactúa y produce uno o más compuestos bioquímicos que influyen en el crecimiento, supervivencia o reproducción de otro organismo) que sufre la planta con bacterias que son capaces de fijar nitrógeno atmosférico. En principio las bacterias viven y dependen exclusivamente del hospedero, luego agilizan su reproducción y adquieren independencia metabólica, cediendo el N fijado en exceso (hasta un 90%) a la planta hospedero en una clara relación de mutualismo (interacción biológica entre individuos de diferentes especies, en donde ambos se benefician y mejoran su aptitud biológica). La relación va en claro favor de los dos organismos participantes: bacteria-planta.

El N una vez que es fijado como amonio (NH_4^+) o nitrato (NO_3^-) da inicio a un ciclo biogeoquímico continuo en el cual pasa por varias formas orgánicas e inorgánicas previas a convertirse de

nuevo en N molecular (N_2). Aminoácidos, amonio y nitrato producto de la fijación o que fuesen liberados por la mineralización de la materia orgánica contenida en el suelo, pasan en el sistema, a ser parte de una intensa competición que se da entre plantas y microorganismos, los cuales desarrollan diferentes mecanismos para lograr su obtención.

Entre las bacterias las que mayor atención han recibido son las rizosféricas y las endofíticas. La literatura refiere y señala que las bacterias endófitas (viven dentro de la planta) son aquellas aisladas a partir de tejidos de plantas desinfectadas superficialmente o extraídas de su interior, que no ocasionan síntomas visibles de enfermedad en la planta hospedera. Estas bacterias de vida libre y algunas otras invaden el tejido de las plantas para vivir, causando una infección asintomática y no aparente. Los estudios han revelado que estas bacterias cumplen varias funciones, entre las que están ejercer control biológico sobre fitopatógenos, promover el crecimiento del hospedero, aumentar la resistencia a enfermedades, contribuir con la fijación biológica de nitrógeno, participar de la solubilización de fosfatos y zinc y dar protección contra patógenos mediante la producción y síntesis de metabolitos secundarios. Como se infiere su participación y aporte resulta muy relevante. Las bacterias rizosféricas establecen por su parte interacciones con las plantas y hacen uso de los exudados radicales, los que varían en cantidad y composición con la planta y las condiciones abióticas prevalecientes en el medio como son la temperatura y la humedad.

Procurando lograr una mayor especificidad y especialización en el manejo técnico del tema, se ha propuesto la posibilidad de desagregarlas y clasificarlas en bacterias obligadas y facultativas. Las últimas sobreviven en el suelo y/o la superficie de la planta, pudiendo colonizar sus tejidos (ej. *Azospirillum*); las otras se adaptan y sobreviven poco en el suelo, por lo que requieren vivir dentro de la planta, lo que les da alguna ventaja por proximidad a elementos nutritivos y gozar de protección.

¿Cuáles son los agentes fijadores?

Es conocido que la fijación biológica del N de las plantas leguminosas está basada en la simbiosis de bacterias fijadoras de nitrógeno con las raíces-nódulos; mientras que, en otras plantas de importancia agrícola como la caña de azúcar, maíz, arroz, trigo y pasturas, pueden beneficiarse de esta asociación por la interacción con diversas bacterias diazotróficas. A partir

de especies de plantas monocotiledóneas como caña de azúcar, pastos, trigo, sorgo y maíz, se han aislado e identificado numerosas especies de bacterias endófitas diazotróficas, con capacidad de fijar nitrógeno, reduciendo de esta manera la aplicación de fertilizantes químicos.

El hecho notorio y comentado de que, en algunas condiciones particulares de Brasil, los plantíos comerciales de caña que recibían bajas dosis de N no mostraban diferencia significativa en productividad con respecto a los que contrariamente si contaban con dosis altas, lo que motivo a pensar en la presencia de algún mecanismo proveedor, al verificar que los contenidos en el suelo no marcaban diferencia. Fue así como surgió y valoró la posible existencia de algún factor de aporte y suministro adicional, comprobando con la investigación, la actividad microbiológica y la capacidad de fijar nitrógeno por parte de la planta de caña de azúcar. Esta circunstancia y observación pragmática de campo abrió y auspició, nuevos e interesantes espacios en la investigación orientada a estudiar las bacterias endófitas diazotróficas que viven en asociación con la planta, procurando identificar y seleccionar las que mayor capacidad y potencial ofrecían.

En realidad, las evidencias sobre la posible fijación de N por parte de la caña no son nuevas, pues desde la década de los años 50 ya se reportaban en Brasil resultados investigativos con la bacteria *Beijerinckia* asociada con las raíces de la planta, como lo refiere Döbereiner (1961) y más adelante en los años 70 con *Azospirillum*, demostrando con ello por una parte la capacidad fisiológica y, por otro, el enorme potencial de poder aprovecharla, como rápidamente lo demostraron Lima *et al* (1987) y Urquiaga *et al* (1989, 1992). Según la literatura, la novedad y primicia sobre el aporte de N atmosférico por fijación biológica, no proviene de la conocida asociación establecida entre las bacterias diazotróficas en la rizosfera de la planta; sino más bien del descubrimiento de organismos diazotróficos endofíticos actuando dentro de la planta (tallos y hojas), como lo evidenciaron Döbereiner y compañeros (1993).

Como comentario personal particular, debo manifestar que desarrollando estudios de post grado en la Universidade Federal de Viçosa, situada en el Estado de Minas Gerais, Brasil, tuve la dichosa oportunidad de conocer personalmente en julio 18-20 de 1988, participando en la "60^{ava} Semana do Fazendeiro", sobre los primeros resultados que se obtenían a partir de la investigación que sobre fijación biológica de

nitrógeno en caña de azúcar se desarrollaba en ese entonces en ese país, liderada por el Dr. Secundo Urquiaga en asocio con otros prestigiosos investigadores de gran renombre internacional. El énfasis primario se concentraba en ese momento en concertar y armonizar el aspecto metodológico (empleo de grandes macetas de suelo marcado con ¹⁵N), las técnicas de medición y los indicadores empleados en estudios controlados; comprobando, sin embargo, que definitivamente la fijación era una realidad y se daba de manera diferencial entre variedades. Los resultados de dichas pruebas fueron posteriormente expuestos por Urquiaga *et al* (1989, 1992). Quedó demostrado científicamente, que la planta de caña podía obtener de la atmósfera, con o sin fertilización adicional al suelo, parte del N requerido por el cultivo, lo que resultaba extraordinario y muy novedoso para la época y abrió la puerta a las numerosas investigaciones que vendrían luego sobre fijación simbiótica y asimbiótica de N atmosférico.

En los últimos tiempos la investigación ha profundizado mucho en valorar la actividad de las rizobacterias en gramíneas como caña de azúcar, trigo, maíz, sorgo, cebada y pastos tropicales, habiendo identificado como géneros bacterianos *Beijerinckia*, *Azospirillum*, *Acetobacter*, *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* y *Bacillus*, entre otras. En variedades de caña de azúcar la literatura reporta el aislamiento de bacterias de los géneros *Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Enterobacter*, *Pantoea*, *Burkholderia* y *Herbaspirillum seropedicae*; las dos últimas de carácter endófito se han detectado en el interior de las raíces, tallos e incluso hojas de caña. El genotipo bacterial y el de la variedad de caña involucrado está comprobado, influyen de manera determinante, como lo demostraran Reis *et al* (2000), Schultz *et al* (2012) y Barlocco (2012).

En torno a la caña de azúcar, señala Chaves (1999b) de manera puntual y específica, que:

"Algunas bacterias y ciertos microorganismos poseen la capacidad de reducir a amonio (NH₄⁺) el nitrógeno del aire (N₂); en el caso de las leguminosas este papel lo cumple el grupo Rhizobium, las cuales infectan las raíces y forman nódulos donde ocurre la fijación del N.

En el caso de la caña de azúcar se ha encontrado un número considerable de bacterias especialmente del género Beijerinckia, asociadas a las raíces de la caña y otras gramíneas.

El sistema fijador de N₂ en la rizosfera de la caña está constituido por bacterias aeróbicas, anaeróbicas y anaeróbicas facultativas.”

En relación al ámbito bacterial, expresa el mismo autor, que “*Bacterias de los géneros Azotobacter, Erwinia sp., Enterobacter sp., Caulobacter, Derxia, Clostridium, Vibrio, Bacillus spp., Spirillum spp., Klebsiella spp., Azospirillum spp. y Saccharobacter nitrocaptans, entre otras, han sido asociadas a la fijación de N en la caña de azúcar” (Graciolli, 1982; Urquiaga et al, 1989).”*

Se reporta que fue *Acetobacter diazotrophicus* la primera bacteria endofítica que se aisló en plantas de caña de azúcar, la cual cuenta según Boddey (1995) con algunas características sobresalientes que habilitan esa propiedad, como son poder fijar N en altas concentraciones de sacarosa, crecer en pH muy ácidos y realizar la fijación en presencia de NO₃⁻. Luego se aisló la bacteria *Herbaspirillum seropedicae* en tallos, hojas y raíces de caña, como lo mencionan Pimentel y compañeros (1991).

La literatura también menciona y comenta ampliamente respecto a la asociación *Azospirillum*-caña de azúcar, considerándola como punto de partida en el caso de algunos de los programas de fijación biológica desarrollados con plantas no leguminosas a nivel mundial. Este género es considerado como bacterias de la rizósfera, en el cual algunas cepas desarrollan diferencias específicas en la forma de colonizar las raíces. Predominantemente colonizan la superficie de la raíz y sólo unas pocas cepas son capaces de colonizar el interior de las raíces.

En su estudio, Barlocco (2012) aisló en Uruguay 371 bacterias diazotróficas posiblemente endófitas a partir de tallos de las variedades LCP 85-384, TUC 77-42 y TUC 78-14, empleando un sistema con alta y baja incorporación de nitrógeno; procediendo la mayoría de los aislamientos de la variedad TUC 78-14, lo que demuestra, según criterio del autor, la existencia de una posible selectividad genética donde participan y están involucrados tanto el genotipo de la bacteria como también la edad, el estado fisiológico y componente genético de la planta hospedera, como también lo evidenciaran en su momento Muñoz y Caballero (2003). Concluye Barlocco (2012) de su investigación, que “*Existen bacterias “probablemente” endófitas de los géneros Pseudomonas, Enterobacter, Stenotrophomonas, con potencial de promoción del*

crecimiento vegetal y de fijación de N₂ (diazotrofas) en las variedades de caña de Uruguay.”

Se han podido establecer y comprobar a partir de los estudios vínculos bacteriales interesantes, como anotaran Boddey y compañeros (1995), al señalar que investigadores belgas lograron establecer una relación genética y sinérgica entre la bacteria *Pseudomonas rubrisubalbicans* (actual *Herbaspirillum rubrisubalbicans*), encontrada en las hojas de la caña y que es el patógeno causante de la enfermedad conocida como “*estría moteada*”, la cual se asocia con la bacteria *Herbaspirillum seropedicae*, reconocida por ser fijadora de N₂.

La investigación científica ha permitido identificar numerosas bacterias asociadas a gramíneas con reconocida capacidad para fijar N₂, favoreciendo y promoviendo con ello el crecimiento vegetal. Se ha encontrado que las mismas pueden actuar tanto en la zona radicular como en el interior de las plantas (endófitas) mediante mecanismos fisiológicos directos, como son entre otros la producción de fitohormonas y reguladores del crecimiento de plantas como auxinas (ácido indol acético (IAA), citoquininas y giberelinas; como sideróforos (compuesto quelante de hierro Fe²⁺ secretado por microorganismos y asimilado por las plantas); mediante la solubilización de fosfatos y zinc; la fijación biológica de N₂; la solubilización y producción de medios de transporte de nutrientes; mecanismos indirectos de control biológico de plagas y enfermedades; inducción de resistencia sistémica de la planta y la producción de antibióticos (Shukla 2008; Schultz et al 2012; Barlocco 2012; Santi 2013; Estrada et al 2013). Las bacterias endófitas se encuentran en los espacios intercelulares de los tejidos, y con menos frecuencia intracelularmente y en tejidos vasculares; reconociendo que promueven crecimiento, contribuyen con la fijación biológica de N₂, aumentan la resistencia a enfermedades y aportan protección al ataque de patógenos a través de la síntesis de metabolitos secundarios. Se ha encontrado además que pueden producir enzimas pectinasas y endoglucanasas que pueden favorecer el ingreso activo de la bacteria al interior de la planta.

Menciona Agüero (2009), que en el Congreso Internacional de la Caña de Azúcar realizado en Australia en 1997, se demostró que con la aplicación de *Azotobacter* y *Azospirillum* se puede reducir las pérdidas de nitrógeno (NO₃) por lavado, permitiendo la aplicación hasta de hasta 400kg de N sin que se presenten riesgos ambientales. Los niveles de pérdidas están

entre los valores permitidos y se estima que es posible hacer una reducción de al menos el 20% de fertilizante nitrogenado sin afectar la producción.

La investigación sugiere con buen fundamento, que las bacterias endófitas ofrecen un mayor aporte de N por fijación en el caso de la caña en relación a las bacterias rizosféricas, debido a tener una menor probabilidad de padecer la incidencia y efecto de los factores adversos del suelo, la competencia de otros microorganismos y poder disponer directamente de los suministros de la planta, como es el caso de nutrimentos para realizar su acción. El tema es sin embargo polémico a la luz de los resultados variables obtenidos por la investigación. Se ha comprobado que las bacterias crecen y fijan N de manera satisfactoria en condiciones de acidez y concentraciones de sacarosa similares a las encontradas en los fluidos del interior de la planta. Acontece en este particular, que muchos endófitos diazotrofos como la *G. diazotrophicus*, viven en ambientes ricos en sacarosa.

¿Qué factores participan e intervienen?

Las condiciones del clima como también las físico-químicas y microbiológicas del suelo influyen y participan de manera determinante en el mecanismo de fijación simbiótica de nitrógeno; como también factores como el contenido de humedad presente, la condición de acidez (pH), el grado de aireación, la temperatura y la disponibilidad de nutrimentos minerales. La literatura otorga gran influencia sinérgica a los factores ambientales en la promoción de poblaciones de microorganismos diazotróficos y la fijación de N₂; como también otros de carácter limitante. Los factores ambientales, especialmente la sequía generadora de estrés, pueden influir negativamente en la eficiencia de la fertilización con nitrógeno, como lo apuntaron Gava *et al* (2001).

Se ha comprobado que la presencia de N procedente de los fertilizantes, aún incorporados en dosis bajas, puede disminuir la población de bacterias diazotróficas y afectar el mecanismo y resultado de la fijación de N₂; aunque los reportes son variables e inconsistentes y asociados algunas veces a los cambios fisiológicos inducidos por el fertilizante en la planta y que pueden afectar la colonización de las bacterias como lo han mencionado Urquiaga *et al* (1992, 2011); Reis *et al* (2000); Perin *et al* (2004) y Boddey *et al* (2001), entre otros. Se ha reportado que las bacterias diazotrofas pueden crecer sin

contar con una fuente de N en el medio; sin embargo, disponer de una dosis baja puede dinamizar el crecimiento más rápido de las bacterias, lo que viene a ser muy importante y determinante cuando se establecen proyecciones con fines agrícolas e industriales. Barlocco (2012) encontró en su estudio, que la mayor cantidad de aislamientos de bacterias endófitas diazotróficas ubicadas en caña, coincidieron con el nivel más bajo de fertilización nitrogenada.

Es un hecho comprobado entonces, que el nitrógeno mineral inorgánico cuando está presente en el sistema y está disponible para las bacterias del suelo, interviene de forma directa pues es absorbido y sustituye la fijación biológica. Dicho de otra manera, una concentración aún pequeña de N mineral en la solución del suelo inhibirá significativamente la fijación. Es así que cuanto más alto sea el nivel de fertilidad y contenido de N de un suelo, más pequeña será la proporción de N que será fijado por simbiosis.

La diversidad de bacterias endófitas encontradas asociadas con la caña de azúcar, se ha coligado con la injerencia de los diversos factores que intervienen y participan en la distribución de las comunidades bacterianas del suelo y la rizosfera, como son las características y propiedades físico-químicas del suelo, la morfología de la raíz, el estado de crecimiento que tenga la planta y los exudados radicales presentes en el medio, entre otros (Vessey 2003). Asimismo, se considera que la eficiencia de fijación del N atmosférico depende en alto grado de los genotipos de caña y el suministro nutricional adecuado de fósforo y molibdeno, principalmente, como se señalaran Urquiaga *et al* (1992).

Apunta Cantarella (2011) con sentido pragmático, que, en condiciones de campo, la manifestación de los efectos promotores del crecimiento de las plantas, puede ser enmascarada por causa de las interacciones que se dan con otros microorganismos presentes en el medio; así como también, con variedades y por condiciones ambientales desfavorables, entre otros, no descartando inclusive, que algunas de esas bacterias puedan tener y ejercer efectos adversos sobre la caña.

¿Cuánto fija la caña? ¿Cómo es la relación?

La información atinente a este tópico es muy amplia y profusa en consideración a los diferentes enfoques y orientaciones investigativas desarrolladas, metodologías empleadas,

localidades geográficas, entornos y condiciones agroproductivas implicadas; así como también en materia genética con los diferentes genotipos y variedades donde han sido realizadas las investigaciones y determinaciones. A manera de ubicación e introducción al tema, cabe reiterar lo señalado oportunamente por Chaves (1999b), que viene a mostrar el estado de la investigación en ese momento (hace 22 años), al manifestar sobre la bacteria y el mecanismo fijador, que:

“Recientemente (1987) se aisló e identificó la bacteria Acetobacter diazotrophicus en los tallos de la caña (Boddey et al, 1995), mostrando características muy particulares, como:

- *Capacidad de fijar el N₂ a altas concentraciones de azúcar (10% de sacarosa como óptimo y 30% como máximo).*
- *Crece en condiciones muy ácidas (pH 2,5) sin afectar su actividad de fijación.*
- *Fija N₂ en presencia de NO₃⁻, siendo muy sensible a los radicales NH₄⁺.*
- *Se localiza en toda la planta y aún contenida en los residuos de la caña.*
- *No se le encuentra en terrenos libres de residuos, ni siquiera tratándose de campos cultivados de caña.*
- *Aparentemente no infecta malezas y hasta la fecha (1995) se le ha detectado solamente en el pasto elefante (Pennisetum purpureum).*
- *Existe alguna dificultad para infectar plantas de caña, penetrando apenas cuando éstas han sufrido daños mecánicos o previamente han sido infectadas por hongos de micorriza.*
- *En apariencia se propaga a través del material vegetativo de siembra.”*

En cuando a la estimación de la cantidad de nitrógeno atmosférico fijado por la caña de azúcar, agrega el mismo autor sobre los estudios pioneros liderados y desarrollados en la época, que:

“Estudios experimentales realizados durante tres años en 10 variedades de caña (Urquiaga et al, 1992), utilizando tierra marcada con ¹⁵N a la cual no se le aplicó N adicional, se determinó que particularmente la especie Saccharum spontaneum (Krakatau) y las variedades comerciales brasileñas CB 45-3 y SP 70-1143 produjeron rendimientos equivalentes a 200 toneladas métricas (tm) de caña/ha/año.

Durante el periodo de estudio se logró acumular una reserva anual equivalente a más de 200 kg de N/ha, sin ocurrir reducciones en el rendimiento o el contenido total de N. Se concluyó por tanto, que esas variedades (mostraron los niveles más bajos de ¹⁵N) obtuvieron entre un 60-80% del N como producto de la fijación bacterial.”

Resultados obtenidos a partir de varias investigaciones indican que entre el 20 y el 60% del nitrógeno presente en la caña procede de la fijación biológica. En torno a este tópico, apunta Muñoz (2005), que la caña de azúcar en Brasil obtiene una parte sustancial del nitrógeno a partir de la fijación biológica; de lo cual Urquiaga y companeros (1992) determinaron en el mismo país, que más del 60% del N acumulado en algunas variedades de caña provenían de fijación biológica, lo que fue luego ratificado también por Boddey y compañeros (2001) en el mismo lugar. En Filipinas esa contribución fue estimada en promedio por Yoneyama et al (1997) en un 61%. Schultz et al (2012) comprobaron un aumento en la producción de tallos y el contenido de N-total, al inocular variedades de caña con las bacterias *G. diazotrophicus*, *H. seropedicae*, *H. rubrisubalbicans*, *A. amazonense* y *B. tropica*. En Brasil, Lima et al (1987) empleando la técnica de dilución isotópica de ¹⁵N y balance de N, demostraron que algunas variedades de caña lograron obtener más del 50% de sus necesidades de N vía fijación biológica. En Colombia encontraron que con la inoculación de bacterias diazotróficas se podían fijar hasta 150 kg de N por hectárea año en la caña de azúcar (Agüero 2009). Como anotara Acuña (2009) en torno al proceso de fijación a nivel bioquímico y genético, un análisis en cromatógrafo de gases pudo conocer que unos 20 genes estaban relacionados directamente con la reducción del N₂.

*Pereira et al (sf), encontraron como respuesta a la aplicación de bacterias fijadoras de nitrógeno y luego de verificar los efectos de la fertilización nitrogenada sobre el proceso de fijación de nitrógeno, utilizando dos inoculantes líquidos, uno de los cuales correspondió a un compuesto de la bacteria *Azospirillum brasilense* y otro a una mezcla de cinco cepas diferentes de bacterias diazotróficas, que “Los mejores resultados de producción se obtuvieron con la aplicación foliar de los inoculantes, especialmente en la caña soca. La aplicación del inoculante que contenía bacterias diazotróficas asociada a la fertilización nitrogenada no evidenció efecto sobre la calidad tecnológica de la caña planta.”*

Schultz y compañeros (2017), determinaron al evaluar la eficiencia de un inoculante de caña de azúcar compuesto por cinco cepas bacterianas diazotróficas (*Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Herbaspirillum seropedicae*, *Herbaspirillum rubrisubalbicans*, *Nitrospirillum amazonense* anteriormente *Azospirillum* y *Paraburkholderia tropica*); así como la fertilización con nitrógeno (120 kg/ha) aplicada en las variedades RB 86-7515 y RB 72-454, respuestas diferentes cuando se cultivaron en dos regiones climáticas brasileñas muy disímiles (Sapucaia, Rio Grande do Sul y Coruripe, Alagoas). El estudio reveló respuesta genética diferencial a la inoculación y los tipos de suelo. Se verificó respuesta de ambas variedades a la fertilización nitrogenada, observando un aumento en la productividad de tallos frescos en la RB 86-7515 cultivada en la

primera región, inoculada con el consorcio bacterial o fertilizada con nitrógeno; no hubo diferencias entre los tratamientos para RB 72-454. El N total acumulado en la RB 86-7515 en ambas localidades no fue influenciado significativamente ni por la inoculación ni por el fertilizante N; lo que sí sucedió en RB 72-454 sembrada en Coruripe. Los resultados indican que la inoculación y el fertilizante N no influyeron en la síntesis de azúcar, pese a los incrementos tenidos en productividad del tallo y acumulación de materia seca. Se estima que la variabilidad de la caña de azúcar para responder a la fertilización con nitrógeno puede deberse a las condiciones ambientales diferenciales de las dos localidades evaluadas.

Cuadro 2. Porcentaje de utilización de Nitrógeno en 13 variedades de caña de azúcar y Pasto Napier.

Variedad	Materia Seca Total Planta		N total acumulado		Átomos 15N en exceso		Utilización N atmosférico	
	g/maceta	Dif. Estad.	g/maceta	Dif. Estad.	% Total de Planta	Dif. Estad.	%	Dif. Estad.
PGM 89-968	1.037	bc	8,08	b	0,212	ab	60	ab
Pasto Napier	745	bc	6,72	bc	0,224	ab	58	ab
SP 79-2233	560	c	4,74	bc	0,249	ab	53	ab
CP 88-1508	711	bc	5,58	bc	0,322	ab	39	abc
PR 75-2002	524	c	4,01	bc	0,353	a	34	abc
CP 81-1384	673	bc	4,9	bc	0,359	a	33	abc
SP 70-1143	796	bc	4,92	bc	0,394	a	26	abc
PR 87-2080	564	c	3,76	bc	0,414	a	23	abc
CG 95-107	711	bc	3,64	bc	0,418	a	22	abc
CP 72-2086	623	c	4,75	bc	0,444	a	17	bc
Mex 68-p-23	514	c	2,58	bc	0,448	a	16	bc
NA 56-42	681	bc	3,27	bc	0,461	a	14	bc
CG 95-125	523	c	2,94	bc	0,506	a	6	bc
Mex 69-290 2/	483	c	2,63	c	0,536	a		c
CP 72-2086 + N 1/	1.995	a	25,7	a	0,059	b		
SP 70-1143 + N 1/	1.789	a	22,9	a	0,065	b		
Signif. Estad.		**		**		**		*
CV %	25		33,5		5,8		47	

Fuente: Pérez *et al* (1999).

Nota: Emplearon macetas con 64 kg de suelo. Plantas cosecharon con 7 meses de edad.

1/ = Tratamientos fertilizados con altas dosis de N (340 kg/ha).

2/ = Variedad seleccionada como testigo relativo "no fijador".

Concluyeron los investigadores en su estudio, que los resultados “sugieren que los inoculantes bacterianos benefician a las plantas de caña de azúcar al aumentar los tallos y el rendimiento de azúcar (TRS). Sin embargo, la inoculación no alteró el BNF (fijación biológica de N_2) asociado naturalmente con el cultivo, lo que sugiere que los beneficios derivados del inoculante pueden provenir de sustancias promotoras del crecimiento de las plantas que son sintetizadas por diazotrofos u otros efectos de promoción del crecimiento descritos para las cinco cepas utilizadas como inoculante mixto.”

Pérez y compañeros (1999) investigaron en Guatemala la fijación biológica de N_2 en 13 genotipos de caña y adicionalmente integraron el pasto Napier (*Pennisetum purpureum*); empleando el método de la dilución isotópica de ^{15}N en dosis de 15 ppm con 10% de abundancia atómica, aplicado en macetas (64 kg) conteniendo un suelo Andisol (*Typic Hapludands*). Pudieron aislar tres géneros de bacterias fijadoras: *Azospirillum* sp en tallos de la variedad NA 56-42; *Herbaspirillum* sp en hojas del pasto Napier y *Acetobacter* sp en tallos del clon PGM 89-968. En el Cuadro 2 adjunto se exponen parte de los resultados obtenidos mostrando el peso seco total de biomasa (g), el porcentaje de N acumulado por maceta en todo el periodo vegetativo y adicionalmente el % de utilización del N atmosférico.

El rendimiento en producción de biomasa recuperado en el experimento fue muy variable entre clones y superior, con diferencia estadística altamente significativa, en los dos tratamientos que recibieron N en exceso, el cual fue aplicado en las variedades CP 72-2086 y SP 70-1143. En las variedades que recibieron N marcado destacó la PGM 89-968 y SP 70-1143 donde hubo buen efecto. El acúmulo de N en planta es una relación directa surgida entre el rendimiento de materia seca y la concentración de N contenida en la misma, siendo la PGM 89-968 superior y estadísticamente diferente a las otras. De igual manera se exponen para todas las variedades, las medias de los átomos en exceso de N marcado observada y medida en la planta y la eficiencia de uso del N atmosférico; encontrando que el % más bajo lo obtuvo la PGM 89-968 con 0,212% de ^{15}N , siendo a la vez la de mejor rendimiento en materia seca. Se concluyó del experimento, que las variedades PGM 89-968 y SP 79-2233 son capaces de obtener N vía fijación biológica de la atmósfera en cantidades apreciables; cuya magnitud se estimó en 60 y 53%, en relación a Mex 69-290, respectivamente. Se ha considerado que las variedades que no responden a N

recuperaron un 24% y las que si respondieron un 45%. Como inferencia relevante, estiman los autores, que “También es posible que la presencia de bacterias diazotróficas dentro de las plantas puedan beneficiar el crecimiento del cultivo debido a otros procesos no necesariamente por fijación biológica de N, incluyendo la producción de hormonas.”

Expresa Chaves (1999b) al ampliar sobre el tema de la fijación de nitrógeno por parte de la planta de caña, que:

“De acuerdo con la literatura algunas variedades de caña poseen mayor capacidad para fijar N atmosférico respecto a otras, cuyo caso permitiría obtener buenos rendimientos en suelos de baja fertilidad en lo que respecta a sus contenidos de NH_4^+ y NO_3^- ,

En lo referente a las cantidades de N que pueden ser fijadas biológicamente por la caña de azúcar, los valores reportados son variables; Ruschel et al citados por Urquiaga et al (1989), señalan que cerca del 17% del total de N extraído por la planta se debió a la fijación; Vose et al estimó por su parte, que más del 30% del N extraído por la caña se derivó también de su fijación.

La investigación desarrollada por Gracioli (1982) identificó poblaciones de bacterias fijadoras de N_2 en las raíces, las hojas y también en el interior de los tallos de la caña de azúcar. Determinó que los contenidos bacteriales eran mayores en la sección media del tallo respecto a la basal y apical. Encontró también la *Erwinia herbicola* en la sección media y apical y *Azotobacter vinelandii* solamente en la apical; lo que revela que en un plantío de caña la distribución de bacterias es aleatoria.

De todos esos resultados puede inferirse que la fijación de N por parte de la caña es una realidad, por lo que la práctica de quemar hojas, tallos y rastrojos, tanto en el periodo de cosecha como antes del plantío es negativa, ya que además de destruir la materia orgánica del suelo, elimina también las bacterias fijadoras contenidas en ese medio.”

La fijación biológica es afectada por el pH del suelo, su estado nutricional, la velocidad promedio de fotosíntesis de las plantas y el manejo que se dé a las especies vegetales. Las interacciones y la asociación entre el microorganismo y sus plantas anfitrión, así como el proceso de fijación de nitrógeno, se pueden inhibir por la presencia en el suelo de altos niveles de fertilizante agregado, asegura Agüero (2009).

Se considera que los reportes de alta fijación biológica de N atmosférico observados en Brasil, es debida a que en ese país la aplicación del nutrimento en plantaciones comerciales es baja (40-80 kg/ha), inferior a la de otros países como Costa Rica donde supera fácilmente los 100 kg/ha, lo que ha trascendido y reflejado en la labor de mejora genética por hibridación y obtención de nuevas progenies. Según Chaves (2021b), en el caso de Costa Rica, la caña planta de primer ciclo incorpora en promedio más N (134,3 kg) que la de soca o retoño (123,8 kg), lo que establece una media nacional próxima a los 130 kg de N/ha. Es importante por todo esto, tenerlo en consideración al buscar interpretar correctamente el tema.

¿Qué se hace y debe hacer al respecto?

Pese a los años transcurridos y el vertiginoso avance tecnológico alcanzado por la agroindustria azucarera mundial, señala Cantarella (2011) respecto al tema, que “*Todavía hay dudas sobre cuánto de N de fijación biológica (FBN) puede efectivamente suplir en cultivos comerciales y si la inoculación de las bacterias puede sustituir total o parcialmente la fertilización nitrogenada.*” Esto, expresa el autor, fundamentado en el hecho conocido de que, en algunos países como Australia y África del Sur, los resultados obtenidos sugieren que la FBN no es una fuente significativa de nitrógeno para la caña de azúcar en esas condiciones particulares de cultivo. Indica, asimismo, que, pese a esa situación de variabilidad en los resultados, en el caso particular de Brasil, las expectativas son muy optimistas. ¿Cuál es la situación en Costa Rica? Hay que investigarla para tener certeza.

Informa Cantarella (2011) sobre estudios desarrollados en esa área tecnológica en Brasil por parte del Programa de Investigación en Bioenergía (BIOEN), orientados a contribuir a la producción sustentable de etanol; en los cuales se abordan tópicos relacionados con la respuesta de la planta a la inoculación de bacterias asociadas a variabilidad genética de cultivares, ambientes productivos, fertilización nitrogenada, identificación de nuevos microorganismos y estirpes diazotróficos endofíticos, mediante el uso de técnicas moleculares. Se busca ampliar el enfoque investigativo y no concentrarlo apenas en el tema de la fijación, pues se sabe y está comprobado, expresa, que las rizobacterias y bacterias endofíticas fijadoras de N₂, poseen la capacidad de producir fitohormonas, liberar compuestos que inhiben o antagonizan con otros organismos no deseados y, generan sobre la planta

hospedera un efecto promotor del crecimiento muy importante, lo que resulta también muy relevante.

En el Cuadro 3 se expone el resultado de algunas características asociadas con el estímulo al crecimiento de plantas de caña, observados al emplear las variedades SP 81-3250, SP 80-3280, RB 55-36 y IAC 5000 cultivadas con y sin fertilizante nitrogenado; logrando obtener 162 aislamientos de bacterias diazotróficas endofíticas en los tallos y principalmente en las raíces. Se encontró que cerca del 62% de los aislamientos tuvieron capacidad de producir índoles y con ello sintetizar fitohormonas; un 53% inhibieron la presencia del hongo responsable de la “mancha de ojo” (*Bipolaris sacchari*) y el hongo inductor de la “pudrición o mal de la piña” (*Ceratocystis paradoxa*) en un 28%. En la variedad IAC 5000 buena parte de los aislamientos favoreció un incremento en la producción de materia seca de la sección aérea (50%) y las raíces (30%), un aumento en la cantidad de N absorbido (39%) y en la capacidad de ese N para producir materia seca en un 36%. Se observó también la síntesis de etileno y alguna actividad antifúngica contra *Verticillium*, *Rhizoctonia* y *Sclerotinia*. El estudio pudo aislar bacterias de los géneros *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Pseudomonas* y *Klebsiella*.

Cuadro 3. Porcentaje de aislamientos bacterianos diazotróficos endofíticos con efecto positivo en estudio de promoción del crecimiento de plantas *in vitro* y plántulas micropropagadas de la caña IAC 5000.

Mecanismo de promoción del crecimiento	Aislamientos con efecto positivo (%)
Producción de Fitohormonas (presencia de indol)	62
Inhibición de hongos patogénicos	
- Mancha de ojo	53
- Pudrición o mal de la piña	28
Plántulas micropropagadas IAC 5000	
- Incremento materia seca en sección aérea	50
- Aumento de materia seca de raíces	30
- Aumento de N absorbido	39
- Aumento del índice de eficiencia en uso del N	36
Fuente: Freitas (2011) citado por Cantarella (2011).	

En un estudio realizado en Costa Rica, Agüero (2009), procuró establecer un protocolo para la producción de bacterias fijadoras de nitrógeno de los géneros *Azotobacter*, *Bacillus* y *Pseudomonas*; empleando para ello un medio líquido a base de melaza, para realizar la aplicación al cultivo. Mediante el uso de medios semisólidos logró aislar bacterias de los géneros *Bacillus*

y *Azotobacter*. Observó además que los microorganismos crecían en las fermentaciones aeróbicas a altas concentraciones en lapsos cortos de tiempo. La melaza (5% con 32 h de incubación) fue un sustrato eficiente para la fermentación de las bacterias aisladas de interés. Concluyó, que el medio empleado logró suplir los requisitos nutricionales y propiciar el crecimiento bacteriano hasta obtener concentraciones comparables con las empleadas por los productos comerciales, abriendo con ello un interesante espacio para su empleo.

No hay duda en reconocer que la iniciativa para aprovechar el enorme potencial de ventajas y beneficios que ofrece el uso de microorganismos diazotróficos endofíticos aplicados a la caña de azúcar, aún mantiene muchos desafíos y dudas que resolver y superar; sobre todo los vinculados con la posibilidad, factibilidad y viabilidad de inocular las plantaciones comerciales virtud del amplio territorio ocupado por el cultivo considerando su naturaleza extensiva, y que dichos microorganismos son sensibles y de sobrevivencia limitada. Es en todo esto imperativo definir el estado fenológico y punto de crecimiento preciso y más apropiado, para realizar la inoculación de las bacterias en el campo. Es sabido, asimismo, que factores interventores como son el tipo de suelo, la humedad presente, el uso de agroquímicos, el estrés por causa del clima, la cantidad de N incorporado con la fertilización, la riqueza en materia orgánica y la práctica de quemar las plantaciones y sus residuos durante la cosecha tienen implicaciones; lo cual debe sin embargo estudiarse más.

Hay que considerar adicionalmente que los microorganismos inoculados deben competir con la microbiota nativa ya adaptada al medio, lo que obliga necesariamente a generar biotipos especiales que cuenten con las condiciones necesarias para desarrollarse en esas condiciones (Antoun y Prévost (2005). Se considera que la no respuesta a la inoculación, puede deberse muchas veces a que esas poblaciones nativas ya están activas y operando, no pudiendo los nuevos agentes biológicos incorporados adaptarse y desarrollar su actividad a plenitud, lo que sugiere que pueden estar activos en el sistema de producción. De cualquier forma, todo el esfuerzo que se realice en materia tecnológica en esta orientación vale la pena y está plenamente justificado en la búsqueda, adaptación y consolidación de una agricultura cañera más sustentable y eco eficiente.

Conclusión

No cabe la menor duda en asegurar que los fertilizantes químicos minerales han constituido y representado un factor benefactor para el sector agrícola en general, y en lo particular para la agricultura cañera nacional; lo cual, sin embargo, no evita desconocer que el abuso generado en la utilización de ellos ha provocado serios problemas que hoy deben evitarse, corregirse y revertirse para ajustarse a los nuevos requerimientos que los mercados y demandantes exigen.

Como ha sido corroborado la fertilización mineral genera residuos químicos procedentes de las sales que contienen favoreciendo la salinización, problemas en el drenaje, la compactación del suelo y, sobre todo, afectando severamente la actividad microbiana comprometida en el proceso de la nutrición vegetal, en particular la vinculada con la mineralización de la materia orgánica contenida en el suelo. Como expresara Chaves (1999b) en referencia directa al uso y abuso del nitrógeno en la caña de azúcar, *“Su empleo en forma inadecuada puede conducir a la afectación de la calidad de los jugos y con ello al éxito productivo y económico del agricultor. Por el contrario, cuando se adiciona de manera racional y técnica, se convierte en un factor generador de éxito y riqueza.”*

Lo más grave y preocupante de toda la situación que gira alrededor de la producción agropecuaria mundial y nacional, es comprobar como con el transcurrir del tiempo el área sembrada y las actividades agroproductivas aumenta, y con ello, la cantidad de fertilizantes requeridos para su sostenimiento, entre ellos particularmente el nitrógeno se incrementa de manera desproporcionada, favorecida en lo particular por su incuestionable impacto sobre las plantas, su relativo bajo precio de adquisición y facilidad en su empleo. Esta situación ligada a la menor eficiencia de adsorción en el suelo y absorción en la planta, ha venido aumentando desproporcionadamente las cantidades aplicadas y con ello los costos vinculados con la producción. A lo anteriormente dicho se suma el serio problema ambiental generado, debido a la producción de los gases tóxicos que se desprenden de los fertilizantes, como acontece con la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) inducida por los óxidos de nitrógeno (NOx) muy reactivos, como es el caso del óxido nítrico (NO), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y particularmente el potente y activo óxido nitroso (N₂O), además del CO₂ y el CH₄ que dañan la capa de ozono.

La sorprendente actividad y eficiencia agronómica que han demostrado tener los microorganismos de vida libre con capacidad natural para fijar nitrógeno atmosférico (N_2), abre un interesante espacio tecnológico que ofrece un extraordinario potencial para su aprovechamiento y empleo agrícola, en particular en el cultivo de la caña de azúcar, con lo cual podrían satisfacerse parte de sus requerimientos nutricionales de nitrógeno. Los resultados alcanzados por las investigaciones desarrolladas internacionalmente sobre la incorporación de esta clase de microorganismos (inoculantes microbianos o biofertilizantes) a los suelos; han evidenciado generar altos rendimientos en las cosechas de una gran diversidad de cultivos, como arroz, maíz, frijol, tomate y caña de azúcar, entre otros, como se ha demostrado, disminuyendo con ello el uso y dependencia de los fertilizantes químicos, especialmente nitrogenados.

Todo lo anterior no desacredita ni desvirtúa de manera alguna la importancia que sigue y seguirá teniendo la utilización de fertilizantes químicos en la agricultura, especialmente los nitrogenados, particularmente los formulados a base de urea, nitratos y sulfatos; lo que se torna muy necesario si se pretende aumentar la producción por incremento del área (ha) y la productividad agroindustrial en el caso de la caña de azúcar. El estado actual de la tecnología parece revelar que la fijación biológica de nitrógeno atmosférico difícilmente permitirá sustituir en su totalidad el uso de los fertilizantes nitrogenados, por lo que no puede haber sorpresa ni crearse tampoco falsas expectativas al respecto.

Como se acotó, los graves y crecientes daños ecológicos que el uso y el costo de estos productos ha generado, han propiciado el interés hacia la búsqueda de nuevas alternativas sustentables de corte biológico, que disminuyan el empleo de agroquímicos contribuyendo con ello a la protección ambiental; en las cuales, el conocimiento de las poblaciones microbianas nativas que sean eficientes fijadoras asimbióticas de nitrógeno, favorece y permite el aprovechamiento de un recurso natural propio de la región como inoculante (biofertilizantes), para mejorar la productividad agrícola. Es por ello, que la investigación orientada al aislamiento y la evaluación de microorganismos autóctonos fijadores asimbióticos de nitrógeno en el país, puede favorecer el incremento de los rendimientos en el cultivo por sus aportes de nitrógeno, ofreciendo con ello una alternativa viable y de gran valor para la agricultura sostenible de caña en el país.

Precisa Acuña (2009) al respecto, que *“El término biofertilizante se define como la utilización de microorganismos vivos para mejorar el crecimiento de las plantas, que mejoran su nutrición por una mayor disponibilidad de los nutrientes requeridos y por la producción de fitohormonas. También se utilizan los términos biocontrol y biorremediación cuando con la inoculación de microorganismos se busca incrementar la respuesta defensiva de la planta a patógenos o eliminar compuestos xenobióticos del medio.”* Agrega, que *“Los biofertilizantes deben de estar constituidos por cepas seleccionadas por su alta capacidad infectiva y competitiva (posibilidad para colonizar en presencia de las cepas nativas normalmente menos funcionales), y por su capacidad para fijar nitrógeno con la especie vegetal correspondiente.”*

La biofertilización implica e involucra recorrer necesariamente varias etapas sistemáticas como son identificar, seleccionar, aislar y reproducir microorganismos útiles y eficientes, para luego cultivarlos y agregarlos a los suelos donde se encuentran sembradas las plantaciones comerciales. En este complejo, pero necesario ejercicio tecnológico es obligatorio e imperativo tener que investigar y perfeccionar la interacción genotipo bacteria-variedad de caña. Pese a la alta frecuencia de aislamiento de bacterias endófitas, aún es necesario ampliar el conocimiento de sus capacidades fisiológicas implicadas directamente en los intercambios planta-bacteria.

Como corolario, es importante considerar y tener presente como manifestaran Schultz *et al* (2017), que *“Entre los investigadores que trabajan en el área, no existe consenso sobre los efectos de la inoculación de diazotrofos en la síntesis de azúcar en las plantas de caña de azúcar. Hay informes que muestran respuestas positivas, negativas y no aplicables de la fertilización con nitrógeno con respecto a la calidad del jugo de caña de azúcar. Estos resultados se han atribuido a diferencias entre variedades, condiciones de suelo y clima, manejo de cultivos, fuentes de N y procedimientos de aplicación.”*

Resulta pertinente señalar para el caso de Costa Rica, la imperiosa necesidad de actuar en torno a este emprendimiento tecnológico con el objeto de potenciar y favorecer su aprovechamiento, para lo cual se debe actuar en la siguiente orientación:

- 1) Reconocer en primera instancia que el tema es importante y ofrece un gran futuro para la agroindustria cañero-azucarera nacional.

- 2) Establecer y promocionar como fundamento y marco institucional referencial de la iniciativa, el vínculo: *producción primaria-agricultura sostenible-comercialización-nuevos y mejores mercados*.
- 3) Recoger y revisar toda la información y resultados investigativos que sobre fijación biológica de nitrógeno se ha generado en el país, con el objeto de establecer una base de partida nacional objetiva, que favorezca aprovechar conocimiento y evite reiterar asuntos o repetir errores.
- 4) Formular y estructurar un programa específico de investigación visionario sobre fijación biológica de nitrógeno atmosférico para la caña de azúcar; lo que implica el abordaje y definición puntual de objetivos, metas cuantificables, metodologías, indicadores, tiempos implicados, lugares de trabajo, calidad del personal requerido, insumos y materiales, capacitación del personal involucrado, información y comunicación, entre otros. Debe nombrarse un coordinador líder debidamente capacitado y conocedor del tema.
- 5) Identificar, atraer y destinar recursos financieros para el desarrollo del programa; para lo cual pueden procurarse recursos mediante el establecimiento de alianzas público-privadas de carácter nacional y externo que involucre el sector académico. Los estudios deben ser liderados por DIECA.
- 6) En lo estrictamente técnico se debe ser muy cuidadoso e incluso en controlar en lo posible factores determinantes, como: a) hacer un levantamiento que permita identificar y aislar en el campo géneros de bacterias fijadoras de N₂, preferentemente endófitas, en toda la geografía cañera nacional, b) las localidades de trabajo deben ubicarse y discriminarse selectivamente por características bióticas y abióticas del entorno agroproductivo particular, c) definir los biotipos y progenitores del material genético (variedad) a emplear en las pruebas, d) el tema nutricional de los suelos y el uso de N debe conciliarse y ajustarse a lo conveniente, e) la definición de los indicadores por evaluar es muy relevante virtud de la amplitud de efectos que los agentes de fijación pueden generar en las plantas, como son: hormonales, fitosanitarios de protección, crecimiento y producción de biomasa, nutricionales (solubilidad P-Zn), entre otros.
- 7) Nada de todo lo anterior tiene sentido si no se logra llevar al ámbito comercial la viabilidad y factibilidad técnico-

económica de pragmatizar la inoculación de las plantaciones, lo cual debe representar la meta final.

La trascendencia económica y ecológica que con el desarrollo de un emprendimiento tecnológico de esta naturaleza tendría la agroindustria azucarera costarricense, permitiría bajar, no necesariamente eliminar, la cantidad de N químico que se adiciona actualmente a las plantaciones comerciales de caña para elevar y sostener la productividad agroindustrial, fomentando el desarrollo de una agricultura con prácticas de producción ecológicamente sustentables y de buena acogida comercial.

Literatura citada

- Acuña N., O. 2009. **La Fijación Biológica de Nitrógeno: el Caso de la Caña de Azúcar**. En: Congreso Azucarero ATACORI "Cooperativa Agrícola Industrial El General R.L.", 17, Colegio de Ingenieros Agrónomos, San José, Costa Rica, 2009. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 2 y 3 de setiembre del 2009. 12 p.
- Agüero Murillo, A.C. 2009. **Producción de Bacterias Fijadoras de Nitrógeno (*Azotobacter*, *Bacillus* y *Pseudomonas*); en Medio Líquido a Base de Melaza, para su Aplicación en el Cultivo de Caña de Azúcar (*Saccharum* spp.) en Azucarera El Viejo, Guanacaste, Costa Rica**. Cartago. Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 67 p.
- Antoun, H.; Prévost, D. 2005. **Ecology of plant growth promoting rhizobacteria**. PGPR: biocontrol and biofertilization. Springer, Dordrecht, p: 1–38.
- Aparicio, P.M.; Arrese, C.; Becana, M. 2008. **Fijación biológica de nitrógeno**. En: Fundamentos de Fisiología Vegetal. 2ª Ed. Coord. Joaquín Azcón-Bieto y Manuel Talón. Barcelona, McGraw-Hill - Interamericana de España, S.L. p: 305-322.
- Barlocco, C. 2012. **Caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.): bacterias promotoras del crecimiento vegetal y su aporte a la fijación de nitrógeno**. Uruguay. Tesis de Maestría. Laboratorio de Microbiología del Suelo, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República Uruguay, diciembre. 118 p.
- Boddey, R.M.; Urquiaga S., S.; Döbereiner, J. 1995. **Biological Nitrogen Fixation Associated with Sugarcane**. Sugarcane, June. p.: 34-35.

- Boddey, R.; Polidoro, J.; Resendé, A.; Alves, B.; Urquiaga, S. 2001. **Use of the ^{15}N nature abundance technique for the quantification of the contribution of N_2 fixation to sugar cane and other grasses.** J. Plant. Physiol. 28: 889-895.
- Cantarella, H. 2011. **Bacterias Diazotróficas em cana de açúcar.** STAB 29(4): 32, 34.
- 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 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.
- Döbereiner, J. 1961. **Nitrogen fixing bacteria of the genus *Beijerinckia* Derx in the Rhizosphere of sugar cane.** Plant and Soil 15: 211-2016.
- Döbereiner, J.; Reis, V.M.; de Olivares, F.L.; dos Reis Junior; Boddey, R.M. 1993. **Eliminación de la fertilización nitrogenada en genotipos brasileños de caña de azúcar fijadores de N_2 . Clave de un balance alto de energía para producir combustible de biomasa.** En: Seminarios Inter-Americanos de la Caña de Azúcar "La Caña de Azúcar y Nuestro Medio Ambiente". Miami, Florida, setiembre. 385 p.
- 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.
- Estrada, G.A.; Baldani, V.L.D.; Oliveira, D.M.; Urquiaga, S.; Baldani, J.I. 2013. **Selection of phosphate-solubilizing diazotrophic *Herbaspirillum* and *Burkholderia* strains and their effect on rice crop yield and nutrient uptake.** Plant and Soil, 369, 115- 129.
- FAO. 2017a. **Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto.** Roma, Italia. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 90 p.
- Gava, G.J.C.; Trivelin, P.C.O; Oliveira, M.W.; Penatti, C.P. 2001. **Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada.** Investigación Agropecuaria Brasileira, 36: 1347-1354.
- Gracioli, L.A. 1982. **Bactérias Fixadoras de Nitrogênio em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) em Folhas, Caules y raíces.** Têse M.Sc. Piracicaba, ESALQ/USP. 49 p.
- Geisseler, D.; Horwath, W.; Joergensen, R.; Ludwig, B. 2010. **Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms: A review.** Soil Biol. Biochem. 42:2058-2067.
- Lara Mantilla, C.; Villalba Anaya, M.; Oviedo Zumaque, L.E. 2007. **Bacterias fijadoras asimbióticas de nitrógeno de la zona agrícola de San Carlos. Córdoba, Colombia.** Rev. Colombiana Biotecnología Vol. IX No. 2, diciembre. p: 6-14.
- Lima, E.; Boddey, R.M.; Döbereiner, J. 1987. **Quantification of biological nitrogen fixation associated with sugar cane using a ^{15}N aided nitrogen balance.** Soil Biol. Biochem. 19: 165-170.
- Muñoz Rojas, R.J.; Caballero Mellado, J. 2003. **Population dynamics of *Gluconacetobacter diazotrophicus* in sugarcane cultivars and its effects on plant growth.** Microbial Ecology 46: 454-464.
- Muñoz, R.J. 2005. **La interacción *Gluconacetobacter diazotrophicus*-caña. La caña de azúcar y las bacterias endófitas.** Revista Elemento: Ciencia y Cultura 12(57):57-62.
- Pereira, H.S.; Guimarães, D.S.N.; Santos, G.A.; Nicchio, B.; Gómez A, R.; Korndörfer, G.H. **Aplicación de bacterias fijadoras de nitrógeno en el desarrollo, producción y calidad de caña de azúcar.** Uberlandia-MG, Brazil. Universidad Federal de Uberlandia. 9 p.

- Pérez, O.; Ovalle, W.; López, J.J.; Reis, V.; Urquiaga, S. 1999. **Potencial de fijación biológica de nitrógeno en variedades de caña de azúcar en Guatemala.** Guatemala, CENGICAÑA, CONCYT. 19 p.
- Perin, L.; Baldani, J.; Reis, V. 2004. **Diversidade de *Gluconacetobacter diazotrophicus* isolada de plantas de cana de açúcar no Brasil.** Pesquisa Agropecuaria Brasileira 39: 763-770.
- Pimentel, J.P.; Olivares, F.; Pitard, R.M.; Urquiaga, S.; Akiba, F.; Döbereiner, J. 1991. **Dinitrogen fixation and infection of grass leaves by *Pseudomonas rubrisubalbicans* and *Herbaspirillum seropedicae*.** Plan and Soil 137: 61-65.
- Reis, F.B.; da Silva, L.G.; Reis, V.L.M.; Döbereiner, J. 2000. **Ocorrência de bactérias Diazotróficas em diferentes genótipos de cana-de-açúcar.** Pesquisa Agropecuaria Brasileira 35: 985-994.
- Santi, C.; Bogusz, D.; Franche, C. 2013. **Biological fixation in non-legume plants - a review.** Annals of Botany, p: 1-25.
- Schultz, N.; Morais, F.R.; Silva, J.A.; Baptista, R.B.; Oliveira, R.P.; Leite, J.M.; Pereira, W.; de Barros Carneiro Junior, J.; Rodriguez Alves, B.J.; Baldani, J.I.; Boddey, R.M.; Urquiaga, S.; Reis, V.M. 2012. **Avaliação agronômica de variedades de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias Diazotróficas e adubadas com nitrogênio.** Pesquisa Agropecuaria Brasileira 47: 261-268.
- Schultz, N.; Pereira, W.; Silva, P.A.; Baldani, J.I.; Boddey, R.M.; Rodriguez, B.J.; Urquiaga, S.; Reis, V.M. 2017. **Yield of sugarcane varieties and their sugar quality grown in different soil types and inoculated with a diazotrophic bacteria consortium.** Plant Production Science 20(4): 366-374.
- Shukla, S.K.; Yadav, R.L.; Suman, A.; Singh, P.N. 2008. **Mejorar el ambiente rizosférico y el rendimiento de la caña de azúcar a través del estiércol de corral modificado con agentes biológicos en el suelo de *Udic Ustochrept*.** La labranza del suelo Investigación, 99: 158-168.
- Urquiaga, S.; Botteon, P de T.L.; Lima, E.; Boddey, R.M.; Döbereiner, J. 1989. **Fijación Biológica del Nitrógeno: ¿Fuente Importante de Nitrógeno en el Cultivo de la Caña de Azúcar?** Boletín GEPLACEA N° 12, diciembre. 10 p.
- Urquiaga, S.; Cruz, K.H.S.; Boddey, R.M. 1992. **Contribution of nitrogen fixation to sugarcane: nitrogen-15 and nitrogen balance estimates.** Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 105-114.
- Urquiaga, S.; Xavier, R.P.; de Morais, R.F.; Batista, R.B.; Schultz, N.; Leite, J.M.; Maía e Sá, J.; Barbosa, K.P.; Resendé, A.S.; Alves, B.J.R.; Boddey, R.M. 2011. **Evidence from field nitrogen balance and ¹⁵N natural abundance data for the contribution of biological N₂ fixation to Brazilian sugarcane varieties.** Plant and Soil.
- Vessey, J.K. 2003. **Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers.** Plant and Soil. 255: 571-586.
- Yoneyama, T.; Muraoka, T.; Kim, T.; Dacanay, E.; Nakanishi, Y. 1997. **The natural ¹⁵N abundance of sugarcane and neighbouring plants in Brazil, the Philippines and miyako (Japan).** Plant and Soil. 189: 239-244.

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