



Fecha de recibido: 27/11/21
Fecha de aceptado: 26/05/2022



Fijación biológica de nitrógeno en caña de azúcar: una alternativa a gases nitrogenados efecto invernadero

Biological nitrogen fixation in sugar cane crop: an alternative to nitrogen gases for greenhouse effect

Sandra Patricia Montenegro Gómez
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
<https://orcid.org/0000-0003-0035-0089>
sandra.montenegro@unad.edu.co

Sandra Yamilé Pulido Pulido
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
<https://orcid.org/0000-0003-4208-0611>
sandra.pulido@unad.edu.co

Jonatan Mina
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
<https://orcid.org/0000-0001-6571-6593>
jminav@unadvirtual.edu.co

Citación: Montenegro-Gomez, S.P., Pulido-Pulido, S.Y., Mina, J. (2022). Fijación biológica de nitrógeno en caña de azúcar: una alternativa a gases nitrogenados efecto invernadero. *Working Papers ECAPMA*, 5(1), 59 - 77.
<https://doi.org/10.22490/26653176.5475>

RESUMEN

Contextualización: La agricultura es la cuarta causa de emisión de gases efecto invernadero y emite grandes cantidades de los llamados “gases que no son CO₂”, incluyendo N₂O y CH₄ con un poder de calentamiento de 265 y 28 veces respectivamente, mayor en comparación con el CO₂.

Vacío de conocimiento: Al aplicar fertilizantes basados en nitrógeno (N) amoniacal o ureico sobre un cultivo, se incrementan las emisiones de N₂O debido al aporte de la oxidación biológica de amonio a nitrato. En el cultivo de la caña de azúcar, el N es el nutriente más limitante en la producción. Estudios iniciados en suelos brasileiros fertilizados con baja o ninguna aplicación de N, demostraron que la contribución de microorganismos diazotróficos (fijadores de nitrógeno), podría suplir entre el 30% y 70% las necesidades de este nutriente.

Propósito: La presente revisión tiene como objetivo, el aportar información relevante sobre la actividad funcional de microorganismos diazotróficos en el rendimiento del cultivo de la caña de azúcar y estimular el uso de prácticas de fertilización con menor impacto ambiental; principalmente un detrimento en la emisión de gases efecto invernadero originados a partir de fuentes de nitrógeno de síntesis química.

Conclusión: La fertilización nitrogenada a futuro, podría sustituirse parcial o totalmente con el aprovechamiento funcional de microorganismos fijadores de nitrógeno, con expectativas de mejorar condiciones ambientales causadas por fertilizantes nitrogenados de síntesis química.

Palabras clave: Agricultura; bacterias fijadoras de nitrógeno; cambio climático; deterioro ambiental.

ABSTRACT

Contextualization: Agriculture is the fourth cause of greenhouse gas emission and emits large amounts of “gases that do not yield CO_2 ”, including N_2O and CH_4 with a heating power of 265 and 28 times respectively, greater in comparison with CO_2 .

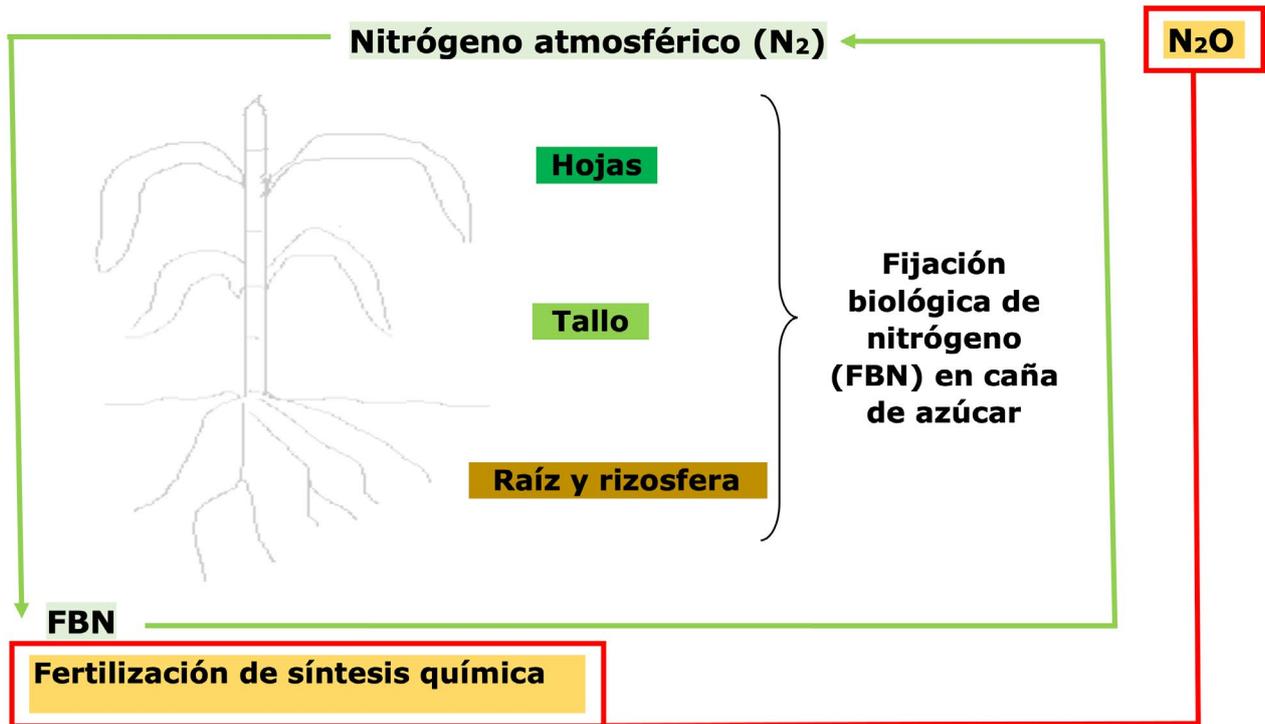
Knowledge gap: When applying nitrogen (N) ammoniacal or ureic fertilizers on a crop, N_2O emissions are increased due to biological oxidation of ammonia to nitrate contribution. In sugarcane crop, N is the most limiting nutriment in crop yield. Studies initiated in Brazilian soils fertilized with low or neither N supplying, have shown that the diazotrophic microorganisms (nitrogen fixers) contribution, can supply between 30% and 70% of this nutrient need.

Purpose: This review, hopes to contribute with relevant information about functional activity of diazotrophic microorganisms in sugarcane crop yield and to stimulate the use of fertilization practices with less environmental impact, mainly less greenhouse gas emissions originating from nitrogen sources of chemical synthesis.

Conclusion: Nitrogen fertilization in a near future, could be partially or totally replaced by a functional use of nitrogen-fixing microorganisms, with expectations of improving environmental conditions caused by chemically synthesized nitrogen fertilizers.

Keywords: Agriculture; climate change; environmental degradation; nitrogen-fixing bacteria.

RESUMEN GRÁFICO



1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es considerado como uno de los problemas ambientales más urgentes a nivel global, y el impacto negativo más importante, es la emisión de gases efecto invernadero (GEI) (Alföldi et al., 2003; Sepúlveda et al., 2019).

La agricultura es la cuarta causa de emisión GEI y emite grandes cantidades de los llamados “gases que no son CO₂”, incluyendo N₂O y CH₄ con un poder de calentamiento de 265 y 28 veces, respectivamente, mayor en comparación con el CO₂ (Saynes et al., 2016; Montenegro et al., 2021). Se estima que la aplicación de fertilizantes representa aproximadamente el 1.5% de las emisiones globales de GEI (IFA, 2018). En lo que respecta a fertilizantes nitrogenados de síntesis química, éstos son considerados como los principales causantes de emisiones del GEI N₂O, con un alcance aproximado de 70% del total emisiones globales (Moiser et al., 1996; Malla et al., 2005; Li et al., 2018).

Al aplicar fertilizantes nitrogenados de carácter amoniacal o ureico sobre un cultivo en particular, se incrementan las emisiones de N₂O debido al aporte de la oxidación biológica de amonio a nitrato (López et al., 2018); razón suficiente para replantear la forma de fertilización y encaminarse hacia prácticas agrícolas sustentables (Polanco et al., 2019), donde los ciclos de nutrientes y en particular el ciclo del nitrógeno, se pueda mantener sin pérdidas que impacten el medio ambien-

te, principalmente por emisiones de N₂O; un potente GEI liberado después de las actividades de manejo del suelo, especialmente durante el riego cuando se aplica el fertilizante nitrogenado. Una preocupante situación que concierne a científicos, ambientalistas, gobiernos, industria y cuerpos internacionales (Montenegro y Barrera, 2014; Montenegro et al., 2017).

De acuerdo con García y González (2016), quienes se basaron en un reporte realizado por la IFA-International Fertilizer Association desde 1961 hasta 2013, el consumo mundial de fertilizantes creció 571%. En 2013, el consumo fue de aproximadamente 181 millones de toneladas; de este total, 110 correspondieron a nitrógeno (N), es decir, 61%. Esta tendencia se mantiene debido a que el N es considerado el nutriente más importante en términos de fertilizantes (USDA, 2010). Por lo tanto, se hace urgente la realización de estudios encaminados hacia el fortalecimiento de la bioprospección de bacterias fijadoras de nitrógeno en diversos cultivos agrícolas, debido a que la FBN ejercida por estas bacterias, representa el 65% de N atmosférico que puede ser fijado naturalmente y con disponibilidad para las plantas; este proceso se basa en la reducción del N₂ atmosférico a un estado inorgánico combinado (NH₃), mediado por la enzima nitrogenasa, la cual es exclusiva de estas bacterias tal y como lo reportaron Moreira y Siquiera (2006) y se expone en la ecuación 1.



Ecuación 1

la presente revisión tiene como objetivo, el aportar información relevante para la producción sustentable del cultivo de la caña de azúcar mediante la bioprospección de la fijación biológica de nitrógeno (FBN).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura de acuerdo con los parámetros establecidos por PRISMA (Urrutia y Bonfill, 2010) y con base a información relevante en temáticas relacionadas con la fijación biológica de nitrógeno, el uso de agroquímicos en el cultivo de la caña de azúcar y los gases nitrogenados efecto invernadero.

Motor de búsqueda: La búsqueda se delimitó principalmente a documentos registrados en Google Scholar, una herramienta gratuita y efectiva para localizar información actualizada procedente de diversas instituciones académico-científicas.

Palabras clave utilizadas: Se hizo uso del recurso denominado, Tesoro de la UNESCO (en español e inglés). Se seleccionaron las siguientes palabras clave: *i)* Agricultura; *ii)* Contaminación; *iii)* Biología agraria y *iv)* Bacterias fijadoras de nitrógeno, debido a que aportan información relevante para la debida comprensión de la problemática de contaminación agrícola por compuestos ni-

trogenados y el papel biológico para su mitigación.

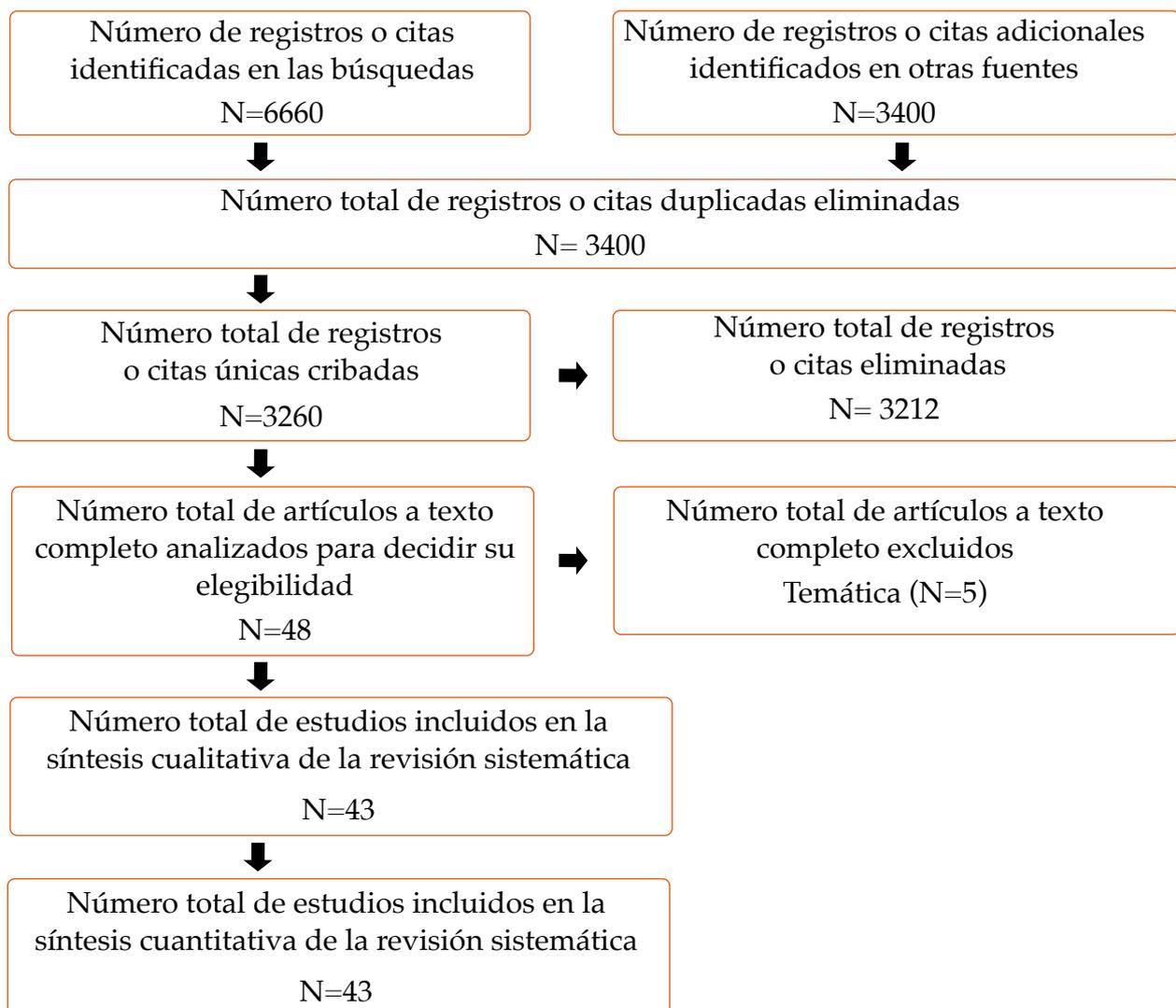
Selección de estudios y criterios de elegibilidad: Inicialmente, se incluyeron artículos que abordaran el tema objeto de estudio, principalmente en idioma inglés, teniendo en cuenta que las investigaciones de alto impacto en su mayoría, son publicadas en este idioma; el segundo idioma seleccionado fue el portugués, teniendo en cuenta los grandes avances llevados a cabo en Brasil en temáticas relacionadas con la fertilización biológica en el cultivo de la caña de azúcar. Otro factor importante fue la fecha de publicación, en este sentido, se conservó un equilibrio entre algunos artículos antiguos vitales en la fundamentación teórica y artículos con información reciente. Entre los documentos seleccionados inicialmente, se excluyeron aquellos que al leerlos, no abordaban directamente el tema objeto de estudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos por número de registro de búsqueda, selección de artículos y registro completo para la estructuración de la presente revisión, se relacionan en la figura 1.

● Figura 1

Diagrama PRISMA de la información a través de las diferentes fases de revisión sistemática asociada a las temáticas de fijación biológica de nitrógeno, uso de agroquímicos en caña de azúcar y gases nitrogenados efecto invernadero.



Adaptado a partir de Urrutia y Bonfill (2010).

3.1 Fertilización nitrogenada de síntesis química y respuesta del cultivo de caña de azúcar

Tanto en literatura antigua como reciente, se reporta al N como el nutrimento que más limita la producción del cultivo de la caña de azúcar, siendo las fuentes de N más utilizadas, la urea (46% de N); el sulfato de amonio (21% de N); el amoniaco anhidro (82% de N) y el fósforo dinámico o DAP (18% de N y 20% de P) (Quintero, 1995). Sin embargo, en un estudio realizado en Brasil por Reis y Kennedy (2007) y Ohyama et al. (2014), quedó en evidencia una disminución en las tasas de fertilización de N, generalmente inferior a 60 kg de N por hectárea y cabe anotar que fue llevado a cabo en Brasil, que es el máximo productor del cultivo de la caña de azúcar a nivel mundial. Se comprobó además, la débil respuesta a los fertilizantes de N en este cultivo (Boddey, 1995; Reis et al., 2007; Ohyama et al., 2014), con solo el 19% de incremento significativo en el rendimiento debido a la aplicación del fertilizante nitrogenado (Azeredo et al., 1986; Ohyama et al., 2014).

Otros estudios llevados a cabo en Brasil como el de Dong et al. (1994), dan cuenta que en algunos sitios donde se ha sembrado continuamente el cultivo de la caña de azúcar durante cien años, no se ha evidenciado aplicación alguna de fertilizante nitrogenado. También se ha evidenciado que ciertas variedades de caña de azúcar, han presentado rendimientos de hasta de 200 ton.ha⁻¹ sin fertilización nitrogenada (Urquiaga et al., 1992; Döbereiner, 1997). Por otro lado, en términos de calidad y rendimiento, se ha evidenciado que aunque los niveles altos de N

están casi siempre asociados con un vigoroso desarrollo vegetativo, en contraste, tienden a disminuir los contenidos de sacarosa (Wang, 1976). Esta evidencia circunstancial sugiere un alto potencial de BNF en la productividad de caña de azúcar (Ohyama et al., 2014).

3.2 FBN en caña de azúcar

La FBN es la principal fuente de N para la biosfera terrestre (Galloway et al., 1995; Vitousek et al., 1997) y es realizada exclusivamente por microorganismos de los dominios Bacteria y Arquea que pueden ser simbióticos, asociativos o de vida libre, (Reed et al., 2011), los cuales son conocidos como diazotróficos. Los suelos brasileros fertilizados con baja o ninguna aplicación de N, demostraron que la contribución de FBN podría suplir entre el 30% y 70% las necesidades de este nutriente en el cultivo de la caña de azúcar (Döbereiner y Duque; 1980; Lino, 2018). Por otra parte, en estudios realizados por la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria-EMBRAPA/CNPBS, se encontró que al cuantificar el N proveniente de FBN en la variedad de caña de azúcar CB 47-89, su acumulación de N era mayor a 150 Kg de N.ha⁻¹ (Lima et al., 1987; Döbereiner, 1997).

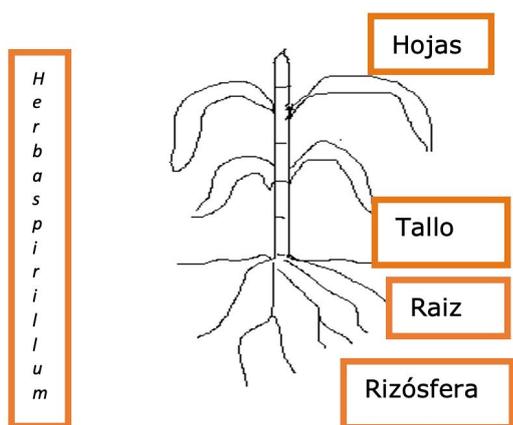
Adicionalmente, se evidenciaron diferencias significativas en FBN entre las variedades y la colonización microbiana en diversos compartimientos de la planta, lo cual refleja un gran potencial de FBN tanto en la parte aérea como en la raíz de la planta y su entorno rizosférico (figuras 2A y 2B) tanto a nivel externo como interno. Fue así como el descubrimiento de las bacterias diazotróficas endofíticas

(colonización interna), contribuyó a un mejor entendimiento de la FBN dado que en el cultivo de la caña de azúcar,

esta asociación planta-microorganismo es muy eficiente (Döbereiner, 1997).

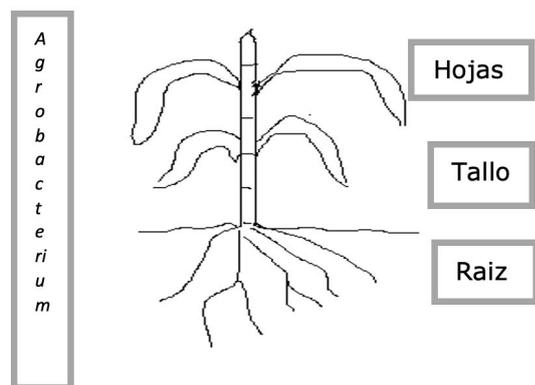
● **Figura 2A**

*Presencia de bacterias diazotróficas *Herbaspirillum* y *Agrobacterium* en caña de azúcar*



Bacteria endofítica (colonización de tejidos)

- Fija nitrógeno en el interior de la planta y no logra sobrevivir en el suelo por mucho tiempo (Moreira et. al., 2010).
- 30 % N total acumulado en plantas micropropagadas inoculadas con la mezcla de cepas: *Herbaspirillum seropedicae*, *Herbaspirillum rubrisubalbicans*, *Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Azospirillum amazonense* y *Burkholderia sp.* Oliveira et al., (2002).
*Sin *Herbaspirillum* la FBN fue menor.



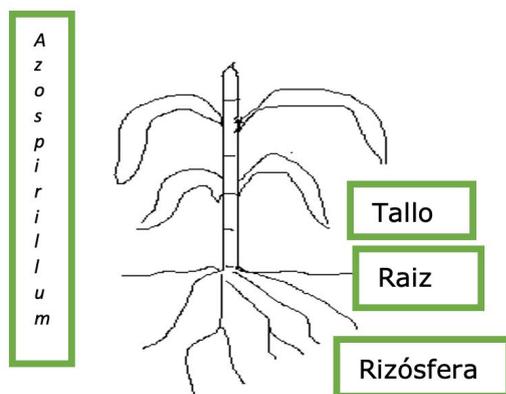
Bacteria endofítica (colonización de tejidos)

- En Algunas variedades de caña FBN hasta el 60% (Urquiaga et al., 1992).
- Áreas ricas en azúcar o alcohólicas
- Tolerancia a pH bajo-Óptimo 5.5 a 6.0
- Temperatura 25-30°C, sin crecimiento.
- 37°C (Oliveira et al, 2010).

Adaptado de Ohshima et al. (2014).

● **Figura 2B**

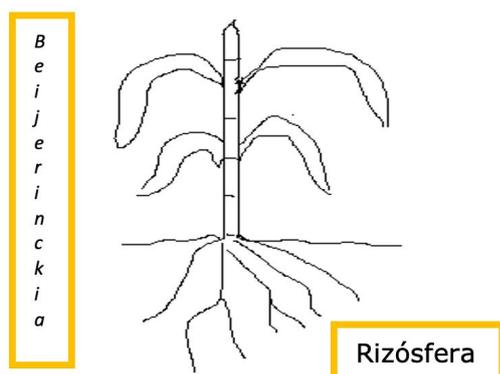
Presencia de bacterias diazotróficas *Azospirillum*, *Beijerinckia* y *Azotobacter* en caña de azúcar.



Bacteria endofítica y asociativa

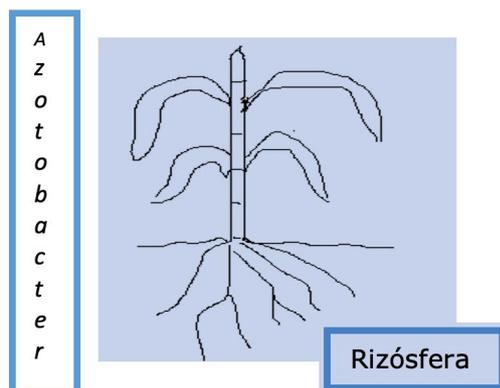
(colonización de tejidos y partes externas de la planta)

- Sustitución hasta 60% del fertilizante químico nitrogenado (Urea) (Castellano et al., 2015)
- Rutas versátiles de utilización de C y N (Bacca y Mendoza, 2010)
- Capaces de establecer relaciones de simbiosis y mutualismo con las plantas y otros microorganismos (Castellano y Fernández (2015).



Bacteria de vida libre (puede sobrevivir sin relación con la planta)

- Contribución de 50kg N.ha.año⁻¹ (Döbereiner et al., 1973).
- Primera bacteria caracterizada con capacidad de fijar nitrógeno en caña de azúcar, relación bastante íntima entre planta y bacteria, esto puede estar asociado a la sacarosa (Döbereiner, 1959; 1961)
- Algunas especies son altamente tolerantes a pH 3.0–4.0 (Becking, 2006).



Bacteria de vida libre (puede sobrevivir sin relación con la planta)

- Capaz de fijar al menos 10 mg de N por gramo de carbono (Becking, 1992).
- tienen una ventaja sobre los diazotróficos asociados a la raíz, por mejores posibilidades de explotar los sustratos de carbono suministrados por la planta (Boddey et al., 1995; Sprent y James, 1995; Triplett, 1996; Abdel-Hamid et al., 2010).

Adaptado de Ohyama et al. (2014).

3.3 Referente internacional y perspectivas para la bioprospección de FBN de caña de azúcar en Colombia

Brasil, genera más del 40% de la producción mundial de caña de azúcar, ubicándolo en el primer productor del mundo. Sin embargo, debido a las respuestas detrimentales del cultivo de la caña de azúcar respecto a la fertilización con nitrógeno, diversas variedades del cultivo, se vienen evaluando para determinar la eficiencia de la FBN en el campo experimental de Embrapa Agrobiology, desde mayo de 1989 (Silvia et al., 2010). A continuación, se citan algunos resultados de ensayos de campo, que mostraron que el inoculante para el cultivo de caña de azúcar, constituido por las bacterias *Gluconacetobacter diazotrophicus*; *Herbaspirillum seropedicae*; *Herbaspirillum rubrisubalbicans*; *Azospirillum amazonense* y *Bulkholderia tropica*; podría ser una alternativa para reducir costos de producción e impactos ambientales relacionados con la fertilización nitrogenada. Cabe anotar que en el estudio mencionado, la FBN no representó mayor cantidad de nitrógeno en las plantas; las bacterias favorecieron la producción de sustancias promotoras de crecimiento radicular, propiciando mayor absorción de nitrógeno como resultado de aumento en la exploración de las capas más profundas del suelo (Schultz et al., 2011).

Recientemente, resultados de campo reportados por Moura et al. (2019), demostraron que la inoculación de *Azospirillum brasilense* provoca un aumento de la masa

de la raíz seca y el diámetro de los brotes en las variedades PBS, El CTC 9004 M, IACSP 955094 e IACSP, 962042 de caña de azúcar. Por su parte, Matoso et al. (2020), sugiere que la aplicación de una mezcla de cinco diazotófos (*Gluconacetobacter diazotrophicus* strain BR11281T = PAL-5T; *Herbaspirillum seropedicae* BR11335 (= HRC54); *Herbaspirillum rubrisubalbicans* BR11504 (= HCC103); *Paraburkholderia tropica* BR11366T = PPe8T y *Nitrospirillum amazonense* BR11145 (= CBAMc), ayuda al crecimiento y desarrollo de las variedades de caña de azúcar cultivadas en Rio Grande do Sul, Brasil; lo que resulta en una mayor productividad, masa seca, acumulación de nitrógeno y maduración temprana. Lo anterior resulta prometedor para la expansión del cultivo de caña de azúcar en este Estado brasilero, que ocupó el último lugar de productividad en la cosecha del periodo 2019-2020.

En Colombia, estudios llevados a cabo sobre la FBN asociada con los sistemas productivos del cultivo de caña de azúcar es incipiente. Sin embargo, podría destacarse la reciente publicación de Roa et al. (2018), donde a partir de un estudio realizado en el Valle del Cauca-Colombia, da cuenta de los impactos ambientales negativos debido a la fertilización con urea en este cultivo. Entre los impactos evidenciados, cita las pérdidas por volatilización o lixiviación que generan contaminación a fuentes de agua y emisión de gases de efecto invernadero. En este estudio realizado con 12 aislamientos de *Azospirillum spp* y 14 de *Gluconacetobacter spp*. con eficiencias en reducción de acetileno (cuantificación indirecta de N fijado por medio de activi-

dad de la enzima nitrogenasa) mayores y diferentes estadísticamente a los controles positivos de referencia de *A. brasilense* NCBIM 11860 y *G. diazotrophicus* NCBIM 12985. Los resultados indicaron una alta

diversidad de especies, alta variabilidad en FBN, y un alto potencial para algunos aislamientos seleccionados para futuros estudios de inoculación en caña de azúcar en el país.



4. CONCLUSIÓN

La fertilización nitrogenada a futuro podría sustituirse parcial o totalmente con el aprovechamiento funcional de microorganismos fijadores de nitrógeno con expectativas de mejorar condiciones ambientales causadas por fertilizantes nitrogenados de síntesis química.

Contribución de la autoría

Sandra Patricia Montenegro Gómez-Do-
cente Escuela de Ciencias Agrícolas, Pe-
cuarias y del Medio Ambiente-UNAD:

investigación, conceptualización, escritura borrador original y manuscrito final.

Sandra Yamilé Pulido Pulido- Docente
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecu-
arias y del Medio Ambiente-UNAD: in-
vestigación, conceptualización, escritura
borrador original y manuscrito final.

Jonatan Mina- Estudiante en la Escuela
de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del
Medio Ambiente-UNAD: Investigación.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia y a la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente por la aprobación del proyecto "Efecto de *Azotobacter* y *Azospirillum* en el rendimiento de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) en un suelo *Typic Haplusterts* del Valle del Cauca-Colombia.

REFERENCIAS

- Abdel-Hamid, M. S., Elbaz, A. F., Ragab, A. A., Hamza, H. A. and El Halafawy, K. A. (2010). Identification and characterization of *Azotobacter chroococcum* isolated from some Egyptian soils. *Journal of Agricultural Chemistry and Biotechnology*, 1(2), 93-104. <https://doi.org/10.21608/jacb.2010.88790>
- Alföldi, T., Fliessbach, A., Geier, U., Kilcher, L., Niggli, U., Pfiffner, L., and Stolze, M. W. H. (2002). Chapter II. Organic agriculture and the environment. Organic agriculture, environment and food security" *Nadia El-Hage Scialabba and Caroline Hattam Eds. FAO, Environment and Natural Resources Service Sustainable Development Department.* <http://www.fao.org/3/y4137s/y4137s02.htm#TopOfPage>
- Azeredo, D.F. Bolsanello, J., Wever, M. and Vieira, J.R. (1986). Nitrogênio em cana-planta, doses e fracionamento. *Stab*, 4 (5), 26-32.
- Baca, K., Sánchez, M., Carreño, C., & Mendoza, G. (2010). Polihidroxicanoatos de cepas de *Azospirillum* spp. aisladas de raíces de *Lycopersicon esculentum* Mill. "tomate" y *Oryza sativa* L. "arroz" en Lambayeque. *Scientia Agropecuaria*, 1(3-4), 213-224. <https://www.redalyc.org/pdf/3576/357633696005.pdf>
- Becking, J.H. (1992). The family Azobacteraceae. The Prokaryotes. A Handbook on the Biology of Bacteria: Ecophysiology, Isolation, Identification, Applications. Springer, Berlin Heidelberg, New York, USA Eds. A Balows, GH Trüper, M Dworkin, W Hander and KH Schleifer, vol. 4, p. 3144-3170.
- Boddey, R. M., De Oliveira, O. C., Urquiaga, S., Reis, V. M., De Olivares, F. L., Baldani, V. L. D. and Döbereiner, J. (1995). Biological nitrogen fixation associated with sugar cane and rice: contributions and prospects for improvement. In: *Management of biological nitrogen fixation for the development of more productive and sustainable agricultural systems* (pp. 195-209). Springer, Dordrecht.
- Castellano, M.H., Espinosa, C.T. y Fernández, M.A. (2015). Uso de *Azospirillum* en la agricultura. *Revista Científica Agroecosistemas*, 3(1). 401-413. https://aes.ucf.edu/cu/index.php/aes/article/download/26/pdf_29
- Döbereiner, J. e Duque, F.F. (1980). Contribuição da pesquisa em fixação biológica de nitrogênio para o desenvolvimento do Brasil. *Brazilian Journal of Rural Economy and Sociology (Revista de Economia e Sociologia Rural-RESR)*, 18(1346-2017-2328), 447-460. <https://ageconsearch.umn.edu/record/264517/files/5.pdf>

- Döbereiner, J. (1959). Influência da cana-de-açúcar na população de Beijerinckia no solo. *Rev. brasil. Biol*, 19, 251-258.
- Döbereiner, J. (1961). Nitrogen-fixing bacteria of the genus Beijerinckia Derx in the rhizosphere of sugar cane. *Plant and Soil*, 15(3), 211-216. <https://doi.org/10.1007/BF01400455>
- Döbereiner, J. (1997). A importância da fixação biológica de nitrogênio para a agricultura sustentável. *Biociência*, Brasília, 1(1), 2-3.
- Döbereiner, J., Day, J. M. e Dart, P.J. (1973). Fixação de nitrogênio na rizosfera de *Paspalum notatum* e da cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 8(7),153157. <http://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/viewFile/17499/11734>
- Dong, Z., Canny, M.J., McCully, M.E., Roboredo, M.R., Cabadilla, C.F., Ortega, E., and Rodes, R. (1994). A nitrogen-fixing endophyte of sugarcane stems (a new role for the apoplast). *Plant physiology*, 105(4), 1139-1147. <https://doi.org/10.1104/pp.105.4.1139>
- Galloway, J.N., Schlesinger, W. H., Levy, H., Michaels, A. and Schnoor, J.L. (1995). Nitrogen fixation: Anthropogenic enhancement□environmental response. *Global biogeochemical cycles*, 9(2), 235-252. <https://doi.org/10.1029/95GB00158>
- García, F. O. y González Sanjuan, M.F. (2016). Consumo de fertilizantes en el mundo y en la Argentina. Sustentabilidad de los agrosistemas y uso de fertilizantes. Orientación Grafica Editora-AACS-Fertilizar AC, Buenos Aires, Argentina, 61-84.
- Li, Y.K., Li, B., Guo, W. Z. and Wu, X.P. (2015). Effects of nitrogen application on soil nitrification and denitrification rates and N₂O emissions in greenhouse. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(2), 519-530. <https://jast.modares.ac.ir/article-23-4149-en.pdf>.
- Lima, E., Boddey, R. M., & Döbereiner, J. (1987) Quantification of biological nitrogen fixation associated with sugar cane using a ¹⁵N aided nitrogen balance. *Soil Biology and Biochemist*, 19(2), 165-170. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90077-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90077-0)
- Lino, A.C.M. (2018). Fixação biológica de nitrogênio em soqueira de cana-de-açúcar com *Azospirillum brasilense* e na compatibilidade com agroquímicos. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.739>
- López Astudillo, A., Rodríguez, L. M., Lubo, C. M., Abadía López, J., Orozco, O. A., Sandoval, J. S. y Arenas, F. (2018). Evaluación de las emisiones de GEI por fertilización del cultivo de caña de azúcar, desde un enfoque en dinámica de sistemas. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(1), 3-17. <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v36n1/2145-9371-inde-36-01-00003.pdf>

- Matoso, E. S., Reis, V. M., Avancini, A. R., Simon, E. D. T., De Marco, E. and dos Anjos, S.D. (2020). Application of a mixture of five diazotrophs on sugarcane cultivated in the south of Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 15(4), 1-8. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v15i4a8535>
- Mosier, A.R., Duxbury, J.M., Freney, J.R., Heinemeyer, O. and Minami, K. (1996). Nitrous oxide emissions from agricultural fields: Assessment, measurement and mitigation. *Plant Soil* 181, 95–108. <https://doi.org/10.1007/BF00011296>
- Montenegro, G.S.P. y Barrera B.S.E. (2014). Biofertilización nitrogenada como aporte a la sustentabilidad de la agricultura colombiana. *RIAA*, 5(2), 135-144. <https://doi.org/10.22490/21456453.1332>
- Montenegro, S. P., Pulido, S. Y., & Vallejo, L. F. C. (2021). Prácticas de biorremediación en suelos y aguas. *Notas de Campus*. <https://doi.org/10.22490/notas.3451>
- Moreira, D.S.F.M. and Siquiera, M.J.O. (2006). Microbiología e Bioquímica do solo, 729p.
- Moreira, D., S.F.M., Da Silva, K., Nóbrega, R.S.A. e De Carvalho, F. (2010). Bactérias diazotróficas associativas: diversidade, ecologia e potencial de aplicações. *Comunicata Scientiae*, 1(2), 74-74.
- Moura, J.B., Souza, R.F., Ventura, M.V.A., Furquim, L.C., Vieira-Junior, W.G., Braga, A.P.M., ... and Lopes, H.P.B. (2019). Influence of nitrogen fixing bacteria in the establishment of pre-broken sugar cane. *Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences*, 21(1), 22-26.
- Ohyama, T., Momose, A., Ohtake, N., Sueyoshi, K., Sato, T., Nakanishi, Y. and Ando, S. (2014). Nitrogen fixation in sugarcane. *Advances in biology and ecology of nitrogen fixation*, 47-70. <https://doi.org/10.5772/56993>
- Oliveira, A.D., Urquiaga, S., Döbereiner, J. and Baldani, J.I. (2002). The effect of inoculating endophytic N₂-fixing bacteria on micropropagated sugarcane plants. *Plant and Soil*, 242(2), 205-215. <https://doi.org/10.1023/A:1016249704336>
- Oliveira, A.L.D.D., Santos Junior, V., Liotti, R.G., Zilioli, E., Spinosa, W.A. e Ribeiro-Paes, J.T. (2010). Estudo de bactérias do gênero *Gluconobacter*: isolamento, purificação, identificação fenotípica e molecular. *Food Science and Technology*, 30(1), 106-112. <http://www.scielo.br/pdf/cta/2010nahead/v30n1a16.pdf>
- Polanco, P.M.F., Gómez, S.P.M., Boldini, J. M., Mena, R.A.M., Guzmán, M. C. V., Casadiego, Y.A.S. y Leiva, M.L.P. (2019). Capítulo 13. Conservación de la diversidad genética. *Libros Universidad Nacional Abierta ya Distancia*, 225-234. <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/book/article/view/3128/3137>

- Quintero D.R. (1995). Fertilización y nutrición. El cultivo de la caña en la zona azucarrera de Colombia. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/281393/3.pdf>
- Reed, S.C., Cleveland, C.C. and Townsend, A.R. (2011). Functional ecology of free-living nitrogen fixation: a contemporary perspective. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 42, 489-512. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102710-145034>
- Reis, V., Lee, S. and Kennedy, C. (2007). Biological nitrogen fixation in sugarcane. In *Associative and Endophytic Nitrogen-fixing Bacteria and Cyanobacterial Associations* (pp. 213-232). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-3546-2_10
- Roa, L., J.; Espinosa, M., A.; Cadavid M.; Muñoz F.; Chica, H., A.; Ángel, C., A. (2018). Cuantificación de la Fijación Biológica de Nitrógeno en Aislamientos de Tres Géneros Bacterianos Asociados a Caña de Azúcar en el Valle del Río Cauca en Colombia –Tecnicaña (Cali – Colombia) | XI Congreso Atalac-Tecnicaña.
- Saynes Santillán, V., Etchevers Barra, J. D., Paz Pellat, F., & Alvarado Cárdenas, L. O. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 83-96. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n1/2395-8030-tl-34-01-00083.pdf>
- Schultz, N.; Da Silva, J. A.; Massena R., V.; Urquiaga, S. (2011) Avaliação agronômica de cana-de-açúcar inoculada com bactérias diazotróficas e adubação nitrogenada. XI Semana Científica Johanna Dobereiner, mudanças climáticas, desastres naturais e prevenção de riscos.
- Silva, J. A.; Schultz, N.; Boddey, R. M.; Alves, B. J. R.; Caballero, S. S. U (2010). Abundância natural de ^{15}N , Balanço de N total, Estudo de longa duração. Embrapa Agrobiologia.
- Sprent, J. I., & James, E. K. (1995). N₂-fixation by endophytic bacteria: questions of entry and operation. In *Azospirillum VI and related microorganisms* (pp. 15-30). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79906-8_2
- Triplett, E. W. (1996). Diazotrophic endophytes: progress and prospects for nitrogen fixation in monocots. *Plant and Soil*, 186(1), 29-38.
<https://doi.org/10.1007/BF00035052>
- U.S. DEPARTMENT OF STATE. (2010) Fifth Climate Action Report to the UN Framework Convention on Climate Change: Chapter 5. Projected Greenhouse Gas Emissions. (pp. 76-85). Washington D.C., USA. <https://2009-2017.state.gov/documents/organization/140007.pdf>

- Urquiaga, S., Cruz, K. H., & Boddey, R. M. (1992). Contribution of nitrogen fixation to sugar cane: nitrogen¹⁵ and nitrogen balance estimates. *Soil Science Society of America Journal*, 56(1), 105-114. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600010017x>
- Urrútia, G., and Bonfill, X. (2010). Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. *Medicina clínica*, 135(11).507-511. <https://revistas.um.es/eglobal/article/download/251571/242631/>
- Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., ... and Tilman, D. G. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological applications*, 7(3), 737-750. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[0737:HAOTGN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[0737:HAOTGN]2.0.CO;2)
- Wang, C.C. (1976). Effect of fertilizer application on sucrose content of sugarcane. *Taiwan sugar*. 23, 167-171.



Licencia de Creative Commons

Revista Agricolae & Habitat is licensed under a Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional License.