

Cianobacterias como alternativa de fertilización biológica para el cultivo de maíz

Cyanobacteria as alternative for biological fertilization of maize crop

Gabriela A. Santiago-Juárez¹✉, Ma. Nieves Trujillo-Tapia²✉, Eustacio Ramírez-Fuentes^{3*}✉

¹ Ingeniería Ambiental, Universidad del Mar, campus Puerto Ángel. San Pedro Pochutla, Oaxaca. México.

² Instituto de Ecología, Universidad del Mar, campus Puerto Ángel. San Pedro Pochutla, Oaxaca. México.

³ Instituto de Recursos, Universidad del Mar, campus Puerto Ángel. San Pedro Pochutla, Oaxaca. México.

ABSTRACT

The continuous use of chemical fertilizers in agricultural fields causes soil degradation and environmental pollution, in addition to causing damage to human health. Nitrogen fertilizers are not very efficient, more than 50 % of the applied N is lost by leaching, adsorption to soil particles or NH₃ volatilization into the atmosphere; and its negative effect causes soil acidification, eutrophication of water bodies and loss of biodiversity in ecosystems. The use of biofertilizers based on nitrogen-fixing cyanobacteria is a promising alternative for agricultural production; they are also a potential source of useful fertilization to replace chemical fertilizers and promote soil fertility. The objectives of this work were to compare the biofertilizer vs chemical fertilizer and establish the best application site for the biofertilizer. Maize variety V-524 was planted in pots with a sandy loam soil, a 20 % (v/v) solution of the biofertilizer was sprinkled every 8 days on the soil, foliar and, combined; control was without biofertilizer. Biochemical indicators of the plant and N soil were analyzed. According to the results obtained, cyanobacteria provide the nitrogen required by the plant; the growth rate of corn in treatment C/B was 1.09 times higher than treatment S/B. We conclude that cyanobacteria are an alternative for biological fertilization in maize cultivation, reducing the use of chemical fertilizer by up to 50 %.

Keywords: Environmental pollution, cyanospray, environmental biotechnology.

RESUMEN

El uso continuo de fertilizantes químicos en los campos agrícolas provoca la degradación del suelo, la contaminación ambiental y daños a la salud humana. Los fertilizantes nitrogenados son poco eficientes, más del 50 % del N aplicado se pierde por lixiviación, adsorción a las partículas del suelo o volatilización de NH₃ a la atmósfera; y su efecto negativo provoca la acidificación del suelo, la eutroficación de los cuerpos de agua y la pérdida de biodiversidad en los ecosistemas. El uso de biofertilizantes a base de cianobacterias fijadoras de nitrógeno es una alternativa prometedora para la producción agrícola, además son una fuente potencial de fertilización útil para reemplazar a los fertilizantes químicos y promover la fertilidad del suelo. Los objetivos del trabajo fueron: comparar el biofertilizante vs fertilizante químico, y

establecer el mejor sitio de aplicación del biofertilizante. La variedad de maíz V-524 se sembró en macetas en un suelo franco-arenoso, se asperjó cada 8 d una solución al 20 % (v/v) del biofertilizante en suelo, foliar y, combinado; el control fue sin biofertilizante. Los indicadores bioquímicos de la planta y el N en el suelo fueron analizados. Por los resultados obtenidos, las cianobacterias aportan el nitrógeno requerido por la planta; la tasa de crecimiento del maíz en el tratamiento C/B fue 1.09 veces mayor al tratamiento S/B. Podemos concluir que las cianobacterias son una alternativa de fertilización biológica en el cultivo de maíz, reduciendo hasta en un 50 % el uso de fertilizante químico.

Palabras clave: Contaminación ambiental, cianospray, biotecnología ambiental.

INTRODUCCIÓN

El uso de fertilizantes químicos para satisfacer la creciente demanda de alimentos ha conducido indudablemente a la contaminación, y a dañar severamente hábitats microbianos e insectos benéficos; el resultado del uso excesivo de insumos químicos ha provocado que los cultivos sean más propensos a las enfermedades y la fertilidad del suelo reducida. Teniendo en cuenta el efecto negativo de los fertilizantes químicos, los biofertilizantes son una alternativa para minimizar la perturbación ecológica. Un biofertilizante es una sustancia que contiene microorganismos vivos o materia orgánica y cuando se aplica a semillas, plantas o suelo, se incrementa la colonización de la rizosfera (Vessey, 2003), mejora las propiedades físicas y químicas del suelo (Miransari, 2010; Singh *et al.*, 2011), participan en el reciclaje de nutrientes y beneficia la productividad de los cultivos (Bhardwaj *et al.*, 2014). Las cianobacterias son microorganismos autótrofos de vida libre, por su capacidad de fijar carbono (CO₂); algunas son fijadoras de nitrógeno (N₂) (ejem. *Nostoc*, *Anabaena*, *Fischerella*), además de la producción de sustancias promotoras del crecimiento para las plantas, han sido utilizadas como biofertilizante en el cultivo de arroz, frijol, trigo y chícharo (Irisarri *et al.*, 2006; Pereira *et al.*, 2009, Osman *et al.*, 2010; Hussain y Hasnain, 2011; Renuka *et al.*, 2018).

Existen diversos tipos de formulaciones utilizadas para la aplicación de los biofertilizantes en los cultivos seleccionados: líquido, turba, gránulos y polvos liofilizados; la formulación líquida tiene la ventaja de contener mayor

*Autor para correspondencia: Eustacio Ramírez-Fuentes
Correo-e: eustacioram@gmail.com

Recibido: 31 de octubre de 2024

Aceptado: 22 de agosto de 2025

Publicado: 18 de septiembre de 2025

concentración de células y con cantidades menores de inoculante su eficiencia es similar a las otras formulaciones (Schulz y Thelen, 2008); sin embargo, presentan la desventaja de ser más sensibles a tensores ambientales, como el pH del suelo, salinidad, entre otros (Hynes *et al.*, 2001), así como a la competencia y predación a las cianobacterias; aplicar al follaje el biofertilizante puede resultar una mejor opción para la nutrición de las plantas. Kuepper (2003) menciona que la nutrición foliar puede ser de 8 a 20 veces más eficiente comparada con la aplicación directa al suelo; lo anterior depende de varios factores como, frecuencia de la aplicación, condiciones ambientales y edad de la planta, entre otros.

En la agricultura tradicional la mayoría de los cultivos son de temporal, con periodos de lluvias irregulares (en gran parte debido al cambio climático); por ello, la fertilización foliar puede representar una alternativa para los productores. El cultivo de maíz es un cereal que demanda N, sus requerimientos van desde 60 hasta 200 kg N/ha (Mendoza-Elos *et al.*, 2006; Hokmalipour y Hamele, 2011), y en algunos casos de 200 hasta 320 kg N/ha (Fallah y Tadayyon, 2010), dependiendo de diversos factores como el tipo de semilla, tipo de suelo, densidad de siembra, entre otros. En la costa de Oaxaca el maíz es el principal cultivo en la agricultura tradicional; la dosis utilizada para fertilización nitrogenada en maíz es de 120-60-00; sin embargo, la pérdida de N por lixiviación, adsorción en el suelo y volatilización puede llegar hasta el 50 % del total del fertilizante nitrogenado adicionado al cultivo (Lu *et al.*, 2019). Maqubela *et al.* (2009), reportaron el incremento en el crecimiento de las plantas de maíz en aproximadamente 45 % con la aplicación de una suspensión de *Nostoc* comparado al control (sin *Nostoc*); el mejor crecimiento estuvo asociado a una mayor concentración de N en tejidos de las plantas y mayor contenido de N total y mineral en el suelo después de la aplicación con *Nostoc*. En cultivo de maíz, Subramaniyan *et al.* (2012), aplicaron el biofertilizante (*Oscillatoria annae*) rociado (spray), en comprimidos (pellet) y combinado. El mejor resultado fue en la combinación de rociado (0.4 %) más comprimidos (25 g); con lo anterior, la producción de maíz (g x 10 plantas) fue siete veces más comparado al control (sin biofertilizante); además registraron mayor concentración de clorofila a y b, proteínas y carbohidratos en la planta. Por otra parte, Osman *et al.* (2010), aplicaron un biofertilizante líquido de *Nostoc* y *Anabaena* en plantas de chícharo; la combinación del biofertilizante con el fertilizante químico (100 % de la dosis recomendada) produjo el mayor rendimiento del chícharo con respecto a otros tratamientos y el control. Si bien el efecto benéfico del uso de cianobacterias como biofertilizante está bien documentado -principalmente en arroz- (Osman *et al.*, 2010; Prasanna *et al.*, 2012; Trishna *et al.*, 2017), el efecto en otros cultivos como el maíz se conoce poco. Por lo anterior, los objetivos planteados fueron: i) probar que, con la aplicación del biofertilizante, es posible reducir el uso de fertilizantes químicos nitrogenados y no afectar el crecimiento de la planta de maíz; ii) establecer si existe diferencia en la forma de aplicación del biofertilizante: entre el rociado (aplicación foliar), basal (directo al suelo) o

mixto (combinación de ambas). Para cubrir los objetivos se consideraron indicadores bioquímicos (clorofila total, proteínas en raíz y hoja), talla, peso fresco, peso seco y la tasa de crecimiento del maíz; además de cuantificar el N del suelo.

MATERIAL Y METODOS

El biofertilizante utilizado es un producto biotecnológico desarrollado en la Universidad del Mar, Oaxaca (registro de patente IMPI MX/a/2017/016603), está compuesto de un consorcio de cianobacterias fijadoras de nitrógeno (registro CM CNRG TB 22) y fue aislado, purificado e identificado a partir de muestras de un suelo agrícola ubicado en Bajos del Arenal, en la región costa de Oaxaca (Trujillo-Tapia y Ramírez-Fuentes, 2015; Trujillo-Tapia *et al.*, 2016). La caracterización del biofertilizante se muestra en la Tabla 1.

Ensayo en invernadero

El suelo utilizado en el ensayo fue de una parcela ubicada en la localidad de Hacienda Vieja (Municipio de Santa María Huatulco, Oaxaca), se tomaron submuestras a una profundidad de 0-20 cm para formar una muestra compuesta de aproximadamente 5 kg, utilizando un muestreador de aluminio; la muestra se colocó en bolsas de plástico previamente etiquetada y se llevaron al laboratorio para su acondicionamiento; el cual consistió en el secado del suelo a temperatura ambiente, y el tamizado a través de una malla de 2 mm; se retiraron las piedras y restos vegetales de mayor tamaño (Foster, 1995a). Se separó aproximadamente un kilogramo de suelo para la caracterización fisicoquímica. Por otra parte, se tomó suelo suficiente del mismo predio para el establecimiento del experimento en invernadero. La clasificación de las características físico-químicas del suelo se hizo de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000: el suelo presenta una textura Franco-Arenosa: arena 64 %, limo 24 % y arcilla 12 %; una capacidad de retención de agua (CRA) de 65 %, pH moderadamente ácido (6.2), el contenido de materia orgánica (MO) es muy alto (6 %), mientras que el contenido de N total y el P disponible son medios (0.102 % y 6 mg/kg, respectivamente), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es alta (38 Cmol/kg) y el valor de conductividad eléctrica (CE) de 0.0072 dS/m indica un suelo con efectos despreciables de salinidad.

Tabla 1. Características del biofertilizante a base de cianobacterias fijadoras de nitrógeno desarrollado en la Universidad del Mar, Oax. (CM CNRG TB 22).

Table 1. Characteristics of the biofertilizer based on nitrogen-fixing cyanobacteria developed at the Universidad del Mar, Oax. (CM CNRG TB 22).

| Característica | Contenido (g/L) |
|-------------------|-----------------|
| Peso seco | 0.601 ± 0.141 |
| Amonio | 5.28 ± 0.279 |
| CHT | 30.54 ± 2.547 |
| Carotenos Totales | 0.124 ± 0.021 |
| Clorofila | 0.520 ± 0.100 |
| Ficocianinas | 0.010 ± 0.001 |
| Aloficocianinas | 0.001 ± 0.000 |
| Ficoeritrinas | 0.016 ± 0.001 |

CHT: carbohidratos totales



El ensayo se realizó en el invernadero de las instalaciones de la Universidad del Mar, Campus Puerto Ángel. El experimento consistió en los tratamientos: i) con biofertilizante (C/B); y ii) sin biofertilizante (S/B); con dos niveles: i) con fertilizante químico (C/FQ); y ii) sin fertilizante químico (S/FQ); y tres factores: aplicación del biofertilizante: i) basal al suelo (S), ii) foliar (H) y iii) mixto (M) –ambos: suelo y foliar-. El material vegetal empleado fue el maíz V-524 (Tuxpeño), alcanza la floración a los 58 d, se cosecha a los 130 d; la variedad tiene una alta adaptabilidad, además de soportar las condiciones adversas del clima y suelo; se utiliza en las principales zonas maiceras de Oaxaca, Guerrero y Chiapas (INEGI, 1997).

En cada unidad experimental (maceta) se sembraron 5 semillas de maíz V-524 a 3 cm de profundidad, cada maceta contenía 5 kg de suelo; previo a la siembra el suelo fue regado a capacidad de campo. La aplicación del biofertilizante fue a una concentración del 20 % cada 8 d a partir del día 10 de la emergencia de la plántula y hasta el día 60, este periodo abarca las etapas fenológicas del maíz: temprana y crecimiento. El biofertilizante se aplicó rociando el follaje de manera uniforme (foliar), la misma cantidad de la suspensión se aplicó directo al suelo (basal), y en la combinación foliar + basal (mixto) se aplicó la mitad en cada una; en los tratamientos sin biofertilizante se utilizó agua en la misma cantidad. Para el tratamiento que lo requirió, la cantidad del fertilizante químico (fosfato de amonio) fue el equivalente a la dosis de 60-30-00 kg/ha, esta dosis es la mitad de la recomendada para el maíz cultivado en la costa de Oaxaca. En total se utilizaron 36 unidades experimentales (macetas convencionales) en un diseño de bloques al azar, los tratamientos se establecieron por triplicado, así como los análisis en el laboratorio.

Indicadores bioquímicos y morfológicos de la planta

La concentración de clorofila total, proteínas (en raíz y foliar), talla, peso fresco y peso seco y la tasa de crecimiento de las plantas de maíz fueron los parámetros analizados a los 10, 35, 60 y 85 d después de la emergencia de las plantas (DDG), que corresponden a las etapas: i) temprana, ii) crecimiento, iii) floración y iv) formación del grano; respectivamente. El primer muestreo se realizó a los 10 d después de la germinación y nacimiento de la plántula, porque determina las condiciones iniciales de las plantas, debido a que en esta etapa las plantas no han tomado ningún nutriente proveniente del suelo y se desarrollan únicamente con el aporte de nutrientes almacenados en los cotiledones.

En cada día de toma de muestra, se tomaron al azar 3 plantas de cada tratamiento; la raíz de la planta fue sumergida en hielo inmediatamente después de ser retirada de la maceta y hasta el momento de ser procesada en los análisis. Para la cuantificación de clorofila y proteína se utilizó el método de Mackinney (1941) y Lowry *et al.* (1951), respectivamente.

La tasa de crecimiento (TCR) se calculó con base en el incremento de peso seco de la planta, en función del peso alcanzado en el tiempo dado (Hunt, 2003):

$$TCR = (\ln W_2 - \ln W_1) / (T_2 - T_1)$$

Donde ln = logaritmo natural; W = peso seco (g) de la planta; T = tiempo inicial y final.

Nitrógeno inorgánico

Al final del experimento se tomó muestra de suelo de los diferentes tratamientos para analizar el nitrógeno inorgánico: amonio (NH_4^+), nitritos (NO_2^-), nitratos (NO_3^-) y nitrógeno total (N total). A 30 g de suelo previamente seco al aire y tamizado (malla de 2 mm), se le adicionó 120 mL de una solución extractora de sulfato de potasio (K_2SO_4) 0.5 M (relación 1:4 p/v), se llevaron a agitación por 30 min y se filtraron con papel whatman #42 (Bundy y Meisinger, 1994). Los extractos obtenidos se congelaron hasta su posterior análisis; se utilizaron las técnicas analíticas descritas por Foster (1995b).

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron analizados estadísticamente (Stadística 7.0.) para determinar el grado de significancia entre los diferentes tratamientos y las variables de la planta. Los datos obtenidos cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad, y se analizaron mediante una ANOVA de medias repetidas para detectar diferencias significativas entre los tratamientos y sitio de aplicación del biofertilizante, también se realizó la prueba a posteriori de Tukey para determinar diferencias entre las medias ($P > 0.05$).

RESULTADOS

Indicadores bioquímicos del maíz

De los indicadores analizados únicamente existió diferencia significativa entre tratamientos en la clorofila total y clorofila "a"; para la proteína en raíz, altura de planta, peso fresco y tasa de crecimiento no existieron diferencias significativas (Tabla 2, 3 y Figura 1).

La concentración promedio de clorofila total en los tratamientos S/B-S/FQ, S/B-C/FQ, C/B-S/FQ y C/B-C/FQ fue de 604.5, 689.9, 564.0 y 664.1 g/g, respectivamente, y existió una diferencia significativa entre ellos ($F_{3,20} = 4.6959$, $p = .0122$). El comportamiento de los cuatro tratamientos fue similar durante la cinética, la concentración de clorofila total disminuyó conforme transcurrieron los días. En el día 60 la disminución de la clorofila total con respecto al día 10 fue de aproximadamente 50 %; sin embargo, entre el día 60 y 85 tuvo un incremento del 1.2 veces, sin llegar al valor de la concentración inicial.

El valor promedio de clorofila "a" fue de 4.59, 4.79, 4.12 y 4.66 g/g para los tratamientos S/B-S/FQ, S/B-C/FQ, C/B-S/FQ y C/B-C/FQ; respectivamente. Los tratamientos en los cuales se aplicó el fertilizante químico (C/FQ) presentaron el valor promedio mayor vs sin fertilizante químico (S/FQ).

La concentración de proteína en raíz y hoja no presentó diferencias significativas entre tratamientos. La tendencia en la concentración de proteína en raíz a través de los días fue de aumento; por el contrario, la concentración de proteína en hoja disminuyó conforme transcurrieron los días (Tabla

Tabla 2. Resultados de la producción de metabolitos en las plantas de maíz con los diferentes tratamientos: con biofertilizante (C/B), sin biofertilizante (S/B); con fertilizante químico (C/FQ), sin fertilizante químico (S/FQ).

Table 2. Results of metabolite production in maize plants with different treatments: with biofertilizer (C/B), without biofertilizer (S/B); with chemical fertilizer (C/FQ), without chemical fertilizer (S/FQ).

| Tratamiento | Días Después de la Germinación (DDG) | | | | | | | |
|-------------|--------------------------------------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | 10 | | 35 | | 60 | | 85 | |
| | Clorofila a (g/g) | | | | | | | |
| S/B S/FQ | 4.55 ns | ±0.00 | 4.75 ns | ±0.33 | 4.04 b | ±0.67 | 4.98 ns | ±0.33 |
| S/B C/FQ | 4.55 ns | ±0.00 | 4.72 ns | ±6.33 | 4.89 a | ±0.67 | 4.99 ns | ±0.33 |
| C/B S/FQ | 4.55 ns | ±0.00 | 4.38 ns | ±0.19 | 2.85 c | ±0.38 | 4.71 ns | ±0.19 |
| C/B C/FQ | 4.55 ns | ±0.00 | 4.67 ns | ±0.19 | 4.53 a | ±0.38 | 4.90 ns | ±0.19 |
| | Clorofila total (g/g) | | | | | | | |
| S/B S/FQ | 746.4 ns | ±6.86 | 634.0 c | ±65.3 | 377.8 c | ±83.3 | 659.8 b | ±71.8 |
| S/B C/FQ | 746.4 ns | ±6.86 | 797.2 a | ±65.3 | 566.2 a | ±85.3 | 649.7 b | ±71.8 |
| C/B S/FQ | 746.4 ns | ±6.86 | 603.8 c | ±37.7 | 342.4 c | ±49.2 | 563.5 c | ±41.4 |
| C/B C/FQ | 746.4 ns | ±6.86 | 733.0 b | ±37.7 | 501.7 b | ±49.2 | 675.4 a | ±41.4 |
| | Proteína en raíz (mg/g) | | | | | | | |
| S/B S/FQ | 1.10 ns | ±0.22 | 2.93 ns | ±0.26 | 3.14 ns | ±0.15 | 2.28 ns | ±0.18 |
| S/B C/FQ | 1.10 ns | ±0.22 | 2.01 ns | ±0.26 | 2.42 ns | ±0.15 | 2.27 ns | ±0.18 |
| C/B S/FQ | 1.10 ns | ±0.22 | 2.60 ns | ±0.15 | 2.42 ns | ±0.08 | 2.51 ns | ±0.10 |
| C/B C/FQ | 1.10 ns | ±0.22 | 2.61 ns | ±0.15 | 2.52 ns | ±0.08 | 2.17 ns | ±0.10 |
| | Proteína en hoja (mg/g) | | | | | | | |
| S/B S/FQ | 3.17 ns | ±0.17 | 3.99 ns | ±0.27 | 3.00 ns | ±0.30 | 1.77 ns | ±0.19 |
| S/B C/FQ | 3.17 ns | ±0.17 | 3.50 ns | ±0.27 | 2.92 ns | ±0.30 | 2.34 ns | ±0.19 |
| C/B S/FQ | 3.17 ns | ±0.17 | 3.30 ns | ±0.16 | 3.20 ns | ±0.17 | 1.80 ns | ±0.11 |
| C/B C/FQ | 3.17 ns | ±0.17 | 3.61 ns | ±0.16 | 2.81 ns | ±0.17 | 1.75 ns | ±0.11 |
| | Nitratos (mg/g) | | | | | | | |
| S/B S/FQ | 6.31 ns | ±2.08 | 5.00 ns | ±3.40 | 4.86 ns | ±1.92 | 13.3 ns | ±2.37 |
| S/B C/FQ | 6.31 ns | ±2.08 | 6.43 ns | ±3.46 | 8.97 ns | ±1.92 | 10.6 ns | ±2.37 |
| C/B S/FQ | 6.31 ns | ±2.08 | 8.15 ns | ±2.00 | 4.20 ns | ±1.11 | 12.8 ns | ±1.37 |
| C/B C/FQ | 6.31 ns | ±2.08 | 5.57 ns | ±2.00 | 7.57 ns | ±1.11 | 10.8 ns | ±1.37 |

Los valores son el promedio de tres repeticiones para cada día y tratamiento \pm desviación estándar; la letra diferente en cada columna representa diferencia significativa; ns (no significativa).

2). El valor promedio de la concentración de proteína de raíz para los tratamientos sin fertilizante químico (S/FQ) fue mayor que con fertilizante químico (C/FQ) (2.38 g/g y 2.02 g/g, respectivamente). La concentración de proteína en hoja en los tratamientos sin biofertilizante (S/B) y con biofertilizante (C/B) presentó un valor promedio de 2.98 y 2.85 g/g, respectivamente. Se observó una disminución de la proteína en hoja en los tratamientos en el día 85 después de la germinación. Por el contrario, la concentración de nitratos en la planta se incrementó al día 85 y fue mayor en los tratamientos sin fertilización química (S/FQ) con respecto a los tratamientos con fertilización química (C/FQ) (Tabla 2).

De las variables morfológicas de las plantas de maíz (Tabla 3), el valor promedio para el peso fresco de los tratamientos C/B-S/FQ y C/B-C/FQ fue de 44.0 y 39.7 g/d,

respectivamente; en los tratamientos en donde no se aplicó el biofertilizante (S/B) a las plantas, el valor promedio fue de 33.0 g/d, es decir, 1.2 veces menos.

La altura de planta fue constante y creciente en todos los tratamientos (Tabla 3). El incremento en talla fue de 2, 5 y 11 veces (respectivamente), a los 35, 60 y 85 días después de la germinación. La altura de planta del tratamiento S/B en promedio fueron superiores 1.1 veces vs el tratamiento C/B (los promedios fueron de 52.1 y 45.5 cm respectivamente); sin embargo, la tasa de crecimiento del maíz en el tratamiento C/B fue 1.09 veces mayor al tratamiento S/B (Figura 1). La tasa de crecimiento de las plantas aumentó progresivamente para todos los tratamientos en 46, 84 y 153 % en los días 35, 60 y 85 después de la germinación, sin presentar diferencia significativa entre los tratamientos ($F_{(3,20)} = 1.4565$, $p = .2564$).



Tabla 3. Resultados de la altura y peso fresco en las plantas de maíz con los diferentes tratamientos: con biofertilizante (C/B), sin biofertilizante (S/B); con fertilizante químico (C/FQ), sin fertilizante químico (S/FQ).

Table 3. Results of height and fresh weight in maize plants with different treatments: with biofertilizer (C/B), without biofertilizer (S/B); with chemical fertilizer (C/FQ), without chemical fertilizer (S/FQ).

| Tratamiento | Días Después de la Germinación (DDG) | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|
| | 10 | | 35 | | 60 | | 85 | |
| | Altura de planta (cm) | | | | | | | |
| S/B S/FQ | 12.0 ns | ±0.00 | 26.3 b | ±3.17 | 63.6 a | ±6.79 | 107.1 a | ±11.7 |
| S/B C/FQ | 12.0 ns | ±0.00 | 26.3 b | ±3.17 | 52.6 b | ±6.79 | 119.3 a | ±11.7 |
| C/B S/FQ | 12.0 ns | ±0.00 | 31.3 a | ±1.83 | 53.0 b | ±3.92 | 87.8 b | ±6.70 |
| C/B C/FQ | 12.0 ns | ±0.00 | 31.7 a | ±1.83 | 47.5 c | ±3.92 | 88.1 b | ±6.78 |
| | Peso fresco (g/d) | | | | | | | |
| S/B S/FQ | 8.8 ns | ±6.86 | 32.8 c | ±12.4 | 35.1 b | ±11.5 | 67.6 a | ±6.00 |
| S/B C/FQ | 8.8 ns | ±6.86 | 30.0 c | ±12.4 | 40.6 b | ±11.5 | 52.8 b | ±6.08 |
| C/B S/FQ | 8.8 ns | ±6.86 | 56.5 a | ±7.18 | 60.5 a | ±6.64 | 50.1 b | ±3.51 |
| C/B C/FQ | 8.8 ns | ±6.86 | 42.5 b | ±7.18 | 53.6 a | ±6.64 | 54.0 b | ±3.51 |

Los valores son el promedio de tres repeticiones para cada día y tratamiento ± desviación estándar; la letra diferente en cada columna representa diferencia significativa; ns (no significativa).

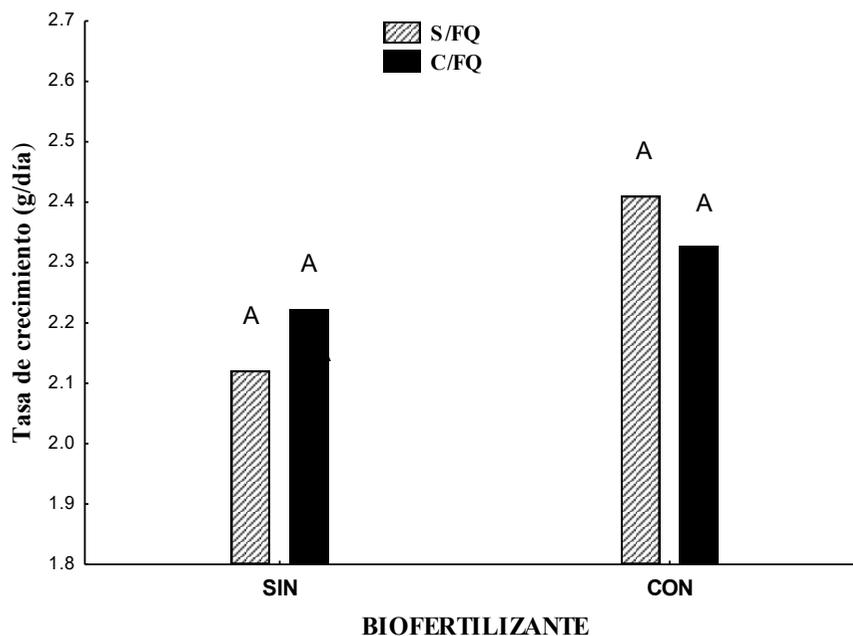


Figura 1. Tasa de crecimiento de las plantas de maíz después de 85 d (DDG), en los diferentes tratamientos: con biofertilizante (C/B), sin biofertilizante (S/B); con fertilizante químico (C/FQ), sin fertilizante químico (S/FQ). La misma letra en las barras, indica que no existe diferencia significativa.

Figure 1. Growth rate of corn plants at 85 d (DDG), in the different treatments: with biofertilizer (C/B), without biofertilizer (S/B); with chemical fertilizer (C/FQ), without chemical fertilizer (S/FQ). The same letter on the bars indicates no significant difference.

Sitio de aplicación del biofertilizante: basal, foliar y mixto

La aplicación del biofertilizante se realizó de tres formas: suelo, foliar y mixto (Tabla 4); no se presentaron diferencias significativas en la clorofila total, clorofila “a”, proteína en raíz y en hoja, nitratos y altura de la planta. Sin embargo, cuando se aplicó de manera foliar el biofertilizante, el valor en clorofila “a” (4.60 g/g) y nitratos en planta (9.34 mg/g) fue mayor

con respecto a la aplicación basal y mixta. En la clorofila total, la aplicación mixta del biofertilizante presentó el mayor valor con 622,6 g/g.

Nitrógeno en suelo

De acuerdo con el análisis de varianza (ANOVA), existió diferencia significativa ($F_{(4, 17)} = 4.6447, p = .01021$) en el N



total, NH_4^+ y NO_3^- (en suelo) entre los tratamientos con el biofertilizante (C/B) vs fertilizante químico (C/FQ) (Tabla 5). El contenido de N total fue mayor con C/FQ (0.118 %) comparado a C/B (0.053 %); en cuanto al contenido de NH_4^+ y NO_3^- con la aplicación del C/B fue significativamente mayor vs C/FQ; el valor de NH_4^+ (683.3 mg/kg) y NO_3^- (18.2 mg/kg) con C/B fue de 1.2 y 1.4 veces más, respectivamente. Por el contrario, en el suelo S/B y S/FQ, el contenido de NH_4^+ y NO_3^- fue mayor (725.8 y 19.3 mg/kg, respectivamente) comparado a los tratamientos con C/B y C/FQ.

Con relación al sitio de aplicación del biofertilizante: basal, foliar y mixto; existieron diferencias significativas ($p > 0.05$) para NO_3^- , NH_4^+ y N total; los valores de NO_2^- no presentaron diferencias significativas (Tabla 6). La concentración de N total fue cuatro veces más en el tratamiento C/B + basal con respecto a C/B + foliar y C/B + mixto.

La concentración promedio de amonio fue de 721.5, 645.6 y 652.5 mg/kg de suelo, para el tratamiento C/B + basal, C/B + foliar y C/B + mixto, respectivamente; y fueron significativamente diferentes ($F_{(8, 18)} = 54.590$, $p = .00000$). La aplicación basal presentó una concentración de amonio en 1.11 y 1.10 veces más con respecto al foliar y mixto.

Con relación al sitio de aplicación del biofertilizante (C/B), en la concentración de NO_3^- existieron diferencias significativas ($F_{(8, 18)} = 54.590$, $p = .00049$); el promedio de nitratos en C/B + basal fue mayor (17.2 mg/kg de suelo) con

relación a C/B + foliar (15.7 mg/kg de suelo) y C/B+ mixto (12 mg/kg de suelo).

La concentración de nitritos no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($F_{(8, 18)} = 54.590$, $p = 0.29400$). Los valores promedio fueron de 3.4, 3.1 y 3.3 mg/kg de suelo para los tratamientos C/B + basal, C/B + foliar y C/B + mixto, respectivamente.

DISCUSION

Indicadores bioquímicos del maíz

El nitrógeno juega un papel importante en la síntesis de clorofila y es una parte integral de la clorofila. Para lograr lo anterior, la planta debe presentar en las diferentes etapas fisiológicas la capacidad óptima de fotosíntesis, por lo que el suplemento de nitrógeno es importante. El contenido de clorofila es un indicador de deficiencia del N en las plantas de maíz. En nuestro trabajo, las plantas fertilizadas únicamente con biofertilizante (C/B) tuvieron concentraciones de clorofila menores que las de los tratamientos con fertilizante químico (C/FQ), sin demérito del crecimiento de las plantas. El biofertilizante cubrió las necesidades de nitrógeno de las plantas y permitieron que estas mantuvieran estable el contenido de pigmentos fotosintéticos (Lichtenthaler, 1995).

La producción de proteínas en hoja y raíz está íntimamente relacionada con el aporte de nitrógeno en la nutrición del maíz. El nitrógeno es un componente esencial en los

Tabla 4. Resultados de la producción de metabolitos en las plantas de maíz con la aplicación del biofertilizante: basal (directo al suelo), foliar (al follaje) y mixto (basal y foliar).

Table 4. Results of metabolite production in maize plants with the application of biofertilizer: basal (direct to the soil), foliar (to the foliage) and mixed (basal and foliar).

| Sitio | Clorofila a (g/g) | Clorofila total (g/g) | Proteína en raíz (mg/g) | Proteína en hoja (mg/g) | Altura de planta (cm) | Nitratos (mg/g) |
|--------|-------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------|
| Basal | 4.4 a ± 0.1 | 561.6 a ± 38 | 2.3 a ± 0.11 | 2.6 a ± 0.16 | 53.1 a ± 7.4 | 6.2 a ± 0.83 |
| Foliar | 4.6 a ± 0.0 | 601.4 a ± 41 | 2.2 a ± 0.10 | 2.8 a ± 0.18 | 51.2 a ± 6.7 | 9.3 a ± 1.32 |
| Mixto | 4.3 a ± 0.2 | 622.6 a ± 43 | 2.3 a ± 0.10 | 2.8 a ± 0.15 | 46.2 a ± 5.4 | 8.1 a ± 0.99 |

Los valores son el promedio de tres repeticiones para cada día y tratamiento ± desviación estándar; la letra a representa diferencia no significativa

Tabla 5. Resultados de la concentración de N en el suelo con los diferentes tratamientos: con biofertilizante (C/B), sin biofertilizante (C/B); con fertilizante químico (C/FQ), sin fertilizante químico (S/FQ).

Table 5. Results of soil N concentration with different treatments: with biofertilizer (C/B), without biofertilizer (C/B); with chemical fertilizer (C/FQ), without chemical fertilizer (S/FQ).

| | S/B | | C/B | |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | C/FQ | S/FQ | C/FQ | S/FQ |
| N total (%) | 0.118 a ± 0.009 | 0.097 a ± 0.008 | 0.049 b ± 0.008 | 0.053 b ± 0.022 |
| NH_4^+ (mg/kg) | 606.8 c ± 1.99 | 725.8 a ± 6.95 | 663.2 b ± 8.9 | 683.3 b ± 31.1 |
| NO_3^- (mg/kg) | 12.2 b ± 1.6 | 19.3 a ± 0.17 | 11.8 b ± 0.3 | 18.2 a ± 1.5 |
| NO_2^- (mg/kg) | ns | ns | ns | ns |

Los valores son el promedio de tres repeticiones para cada día y tratamiento ± desviación estándar; la letra diferente en cada columna representa diferencia significativa; ns (no significativa).



Tabla 6. Resultados de la concentración de N en el suelo con la aplicación del biofertilizante: basal (directo al suelo), foliar (al follaje) y mixto (basal y foliar). **Table 6.** Results of N concentration in the soil with the application of the biofertilizer: basal (direct to the soil), foliar (to the foliage) and mixed (basal and foliar).

| Sitio de aplicación | N total | NH ₄ ⁺ | NO ₂ ⁻ | NO ₃ ⁻ |
|---------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | (mg kg ⁻¹) | | | |
| Basal | 1104.9 a | 721.5 a | 3.4 a | 17.2 a |
| Foliar | 215.6 b | 645.6 b | 3.1 a | 15.7 b |
| Mixto | 224.5 b | 652.5 b | 3.3 a | 12.0 b |

Los valores son el promedio de tres repeticiones para cada día y tratamiento \pm desviación estándar; la letra diferente en cada columna representa diferencia significativa; ns (no significativa).

aminoácidos que forman las proteínas; los resultados de proteínas en hoja y raíz indican que no hubo inhibición en la síntesis de proteínas por deficiencia de nitrógeno en la nutrición de las plantas de maíz; como lo reportan Ding *et al.* (2005) en los tratamientos con menor aporte de nitrógeno, la concentración de proteínas fue menor.

La concentración de proteínas en la raíz de los tratamientos C/B fue ligeramente superior a los tratamientos con C/B-C/FQ (Tabla 2), a pesar de que este último tratamiento tuvo más aporte de nitrógeno; lo anterior indica que parte del nitrógeno pudo haberse perdido por lixiviación en forma de nitratos antes de ser absorbido por las plantas. Por otro lado, el nitrógeno aportado por el biofertilizante permitió a la planta asimilarlo adecuadamente; tal situación coincide con los resultados reportados por García y Espinosa (2008), y Fallah y Tadayyon (2010), en ambos trabajos reportaron que la eficiencia del nitrógeno por plantas de maíz forrajero fue menor en aquellos tratamientos con la mayor dosis de aplicación de nitrógeno.

A pesar de que estadísticamente no hubo diferencias significativas entre tratamientos con respecto a la altura de planta, se observó en las últimas etapas de desarrollo (días 65 y 80) que las plantas de los controles (S/B) superaron en aproximadamente 5 % a los tratamientos C/B, este comportamiento pudo deberse al *eu-estrés vegetal*, un tipo de estrés que estimula el metabolismo celular, aumentando la actividad fisiológica de la planta y favoreciendo un crecimiento acelerado, es parecido a un mecanismo de supervivencia que se activa en condiciones precarias para acelerar el desarrollo de la planta y procurar la reproducción, aunque dicho mecanismo no siempre garantiza alcanzar la madurez fisiológica si el factor que provoca el estrés no es corregido a tiempo (Lichtenthaler, 1995), el *eu-estrés* debió ser provocado por falta de nutrientes y se explica al considerar que los controles se desarrollaron con menor aporte de nitrógeno en comparación a los tratamientos con biofertilizante y fertilizante químico, pues a pesar de que las plantas del control superaron en talla a los demás tratamientos, no sucedió lo mismo con el resto de los parámetros estudiados (concentración de clorofila y proteínas).

Sitio de aplicación del biofertilizante: basal, foliar y mixto

En esta fase del experimento, nuestro interés fue saber cuál es el efecto en el maíz al aplicar el biofertilizante de forma basal (al suelo), foliar (a las hojas) y mixto (la combinación de

las anteriores); no se aplicó fertilizante químico. De los resultados obtenidos, no se encontraron diferencias significativas en los parámetros fisiológicos y morfológicos del maíz (Tabla 4) cuando se aplicó el biofertilizante en forma basal (S), foliar (H) y mixto (M); lo anterior infiere que, es indistinto el sitio de aplicación del biofertilizante en las condiciones del experimento reportado. En la agricultura tradicional, es común que el productor no cuente con mochila para aplicación foliar del biofertilizante, entonces, la aplicación basal del biofertilizante es una opción viable. Independientemente del sitio (basal o foliar) en donde se aplique el biofertilizante y en diferentes especies vegetales (cultivadas); se ha reportado un incremento en los parámetros evaluados en planta y suelo: en el crecimiento (tamaño de raíz, altura de planta, peso seco y área foliar) (Osman *et al.*, 2010), el porcentaje de germinación; así como en el contenido de clorofila y carbohidratos (Dineshkumar *et al.*, 2019), actividad enzimática: proteasa y amilasa -entre otras- (Nain *et al.*, 2010); en el contenido de N, P K y carbono orgánico del suelo (Maqubela *et al.*, 2009; Gheda y Ahmed, 2015). Bhuvaneshwari *et al.* (2011) probaron que la aplicación basal y foliar de cianobacterias (no mencionan género) en un cultivo de *Helianthus annuus* (girasol), fue mejor comparada con la fertilización química; las plantas con cianobacterias presentaron mejores características bioquímicas y morfológicas. Por otra parte, Osman *et al.*, (2010), compararon la actividad metabólica, crecimiento y rendimiento de plantas de *Pisum sativum* (chicharo) con dos especies de cianobacterias (*Nostoc entophyllum* y *Oscillatoria angustissima*) como biofertilizante vs fertilización química. El mejor resultado fue la combinación del biofertilizante más el fertilizante químico; sin embargo, con el uso de las cianobacterias como biofertilizante se redujo en un 50 % la dosis recomendada del fertilizante químico; resultados similares se obtuvieron en el presente trabajo. El éxito de las cianobacterias no solo como biofertilizantes sino también como mejoradores del suelo, se debe principalmente a la capacidad de llevar a cabo el metabolismo fotoautotrófico; mediante el cual, el CO₂ y N₂ fijado, son materia prima esencial, procesada a través de reacciones metabólicas primarias y secundarias impulsadas por energía química derivada de la luz (Noreña-Caro y Benton, 2018). Con la aplicación del biofertilizante (basal o foliar), además de proporcionar el nitrógeno para la nutrición de las plantas, deposita cianobacterias viables (incluidas en el biofertilizante); a partir de ellas se inicia la

cadena trófica en el suelo, incrementando la actividad de microorganismos heterotróficos, acelerando la descomposición de materia orgánica y transformándola en compuestos inorgánicos. Aunado a lo anterior, las cianobacterias, a través de la producción de exopolisacáridos (EPS) pueden conglomerar otros microorganismos (microalgas, microhongos, líquenes y biofitas) con materia orgánica y partículas del suelo para formar costras biológicas (no investigadas en este experimento); las cuales, son benéficas para la productividad del suelo y el crecimiento de las plantas (Lan *et al.*, 2013; Rossi *et al.*, 2017; Tiwari *et al.*, 2019).

Nitrógeno en suelo: Biofertilizante vs Fertilizante Químico

El nitrógeno (N) es el elemento que limita con mayor frecuencia la nutrición de las plantas en los ecosistemas terrestres; el maíz (*Zea mays*) es una planta que requiere una gran cantidad de nutrientes y de manera particular, el N en mayor cantidad (Shrestha *et al.*, 2018). Existen diversos factores relacionados con el aprovechamiento del N por las plantas: la dosis y fuente de N, época y método de siembra, densidad de plantas y la variedad utilizada, entre otros; sin embargo, la forma (orgánica o inorgánica) en que se encuentre el N en el suelo, es fundamental para la absorción por las raíces de las plantas. De acuerdo con nuestros resultados, en el tratamiento con F/Q el contenido de N total en el suelo fue mayor comparado con el tratamiento C/B, debido al mayor porcentaje de N contenido en la aplicación directa del fertilizante químico; sin embargo, esto no se vio reflejado en una mayor tasa de crecimiento de las plantas de maíz. Giacometti *et al.* (2013) y Do Nascimento *et al.* (2019), reportaron resultados similares, encontraron mayor contenido de N total después de aplicar urea al suelo, en comparación con el tratamiento de fertilización orgánica y *Nostoc*, respectivamente.

Con la fertilización química (inorgánica) el N aplicado es rápidamente hidrolizable y transformado a amonio (Agehara y Warncke, 2005); a su vez, el amonio en el suelo puede ser fijado a las arcillas del suelo, adsorbido en los coloides del suelo, o formar parte de los procesos de nitrificación, inmovilización o volatilización. La pérdida de N por volatilización del amoniaco (NH_3) a la atmósfera, representa entre 10-60 % del total del N aplicado (Sun *et al.*, 2020), debido principalmente a la alteración del equilibrio $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ con la aplicación del fertilizante químico (Hofman y Van Cleemput, 2004). La volatilización de NH_3 causada por la aplicación de fertilizantes químicos es la fuente antropogénica más importante de la emisión global y representa entre un 80-90 % del total (Xu *et al.*, 2019). El efecto negativo de la posterior deposición del N de la atmósfera es la acidificación del suelo, eutroficación de los cuerpos de agua y la pérdida de biodiversidad en los ecosistemas (Xi *et al.*, 2020). Por el contrario, con la aplicación del biofertilizante, la volatilización de NH_3 a la atmósfera es menor. Sun *et al.* (2020), reportaron una reducción de hasta el 70 % de volatilización de NH_3 en el tratamiento con biofertilizante (*Bacillus subtilis*) en comparación con la fertilización química. En el presente trabajo no cuantificamos la volatiliza-

ción de amonio; sin embargo, por el N reportado en nuestros resultados, obtuvimos un efecto positivo con la aplicación del biofertilizante.

Si bien, el contenido de N total es un indicador químico de la calidad del suelo (Bünemann *et al.*, 2018), no proporciona información de las formas del N disponible (NH_4^+ y NO_3^-) para las plantas. En el presente trabajo, la aplicación del biofertilizante (a base de cianobacterias fijadoras de N) el contenido de nitrógeno inorgánico (NH_4^+ y NO_3^-) fue mayor comparado con el fertilizante químico (Tabla 5); Maqubela *et al.* (2009), reportaron resultados similares cuando aplicaron una suspensión de *Nostoc* (cianobacteria) al suelo; el contenido de N inorgánico fue 6 % mayor comparado al suelo sin aplicación de *Nostoc*, los resultados indicaron claramente que la inoculación con *Nostoc* enriqueció el suelo con N como resultado de la fijación de N.

Con la aplicación del biofertilizante además del NH_4^+ , se incorporan lípidos, proteínas y polisacáridos (Tabla I), que pasan a formar parte de la materia orgánica del suelo. La mayor concentración de NH_4^+ y NO_3^- en el tratamiento C/B sin F/Q vs C/ B con F/Q, es debido a que parte del N orgánico incorporado con el biofertilizante se mineralizó a NH_4^+ y posteriormente entró al proceso de nitrificación: 1) se transformó a NO_2^- por la acción de un grupo de bacterias autótrofas obligadas del género *Nitrosomonas sp.*; y 2) a NO_3^- , por la actividad de bacterias autótrofas obligadas del género *Nitrobacter sp.* (Hofman y Van Cleemput, 2004). El proceso natural de la nitrificación se ve alterado por la frecuente aplicación de fertilizantes nitrogenados al suelo; además de modificar las propiedades fisicoquímicas del suelo, la diversidad y riqueza de los microorganismos del suelo (Zeng *et al.*, 2016; Shen *et al.*, 2016; Yu *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2019).

La capacidad de las cianobacterias de fijar nitrógeno atmosférico (CFN) es el inicio del ciclo del N en el suelo; el N fijado es reducido a NH_3 y liberado al suelo donde posteriormente se protona para convertirse en el catión NH_4^+ (Poffenbarger *et al.*, 2018). Por otra parte, en el presente trabajo, en el suelo control (sin biofertilizante y sin fertilizante químico) la concentración de NH_4^+ y NO_3^- fue mayor comparado con la aplicación del biofertilizante (C/B) y fertilizante químico (C/FQ); por el contrario, Maqubela *et al.* (2009), Dineshkumar *et al.* (2019) y Do Nascimento *et al.* (2019), reportaron resultados en donde, el contenido de nitrógeno inorgánico (NH_4^+ y NO_3^-) en el control (sin aplicación de fertilizante) fue menor y no significativo (estadísticamente) comparado con la aplicación de *Nostoc sp.* La diferencia de resultados se puede deber a factores relacionados con producción de NH_4^+ y la velocidad de nitrificación autótrófica ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$).

Con la aplicación del fertilizante N se modifican el pH del suelo y la concentración de NH_4^+ . Zeng *et al.* (2016), reportaron el efecto negativo directo del pH (correlación -0.48) y NH_4^+ (correlación -1.01) en la diversidad y la abundancia bacterianas, respectivamente. El cambio en el pH debido a la fertilización química provoca acidificación (pH 4) en el suelo, lo que trae como consecuencia el cambio en la diversidad

bacteriana (Acidobacteria) (Shen *et al.*, 2016), y en la disponibilidad de nutrientes, como calcio y magnesio; sin embargo, otros factores pueden contribuir a cambios en la comunidad microbiana del suelo, como el contenido de C orgánico, N disponible, C y N de la biomasa microbiana, entre otros (Yu *et al.*, 2019). La fertilización nitrogenada incrementa la disponibilidad de NH_4^+ en el suelo, lo que trae como consecuencia un efecto directo en la disminución de la diversidad bacteriana debido a la expansión o incremento de las especies nitrofilas, provocando una exclusión competitiva de otros microorganismos (Bobbink *et al.*, 2010). Además, los cambios en la composición de la comunidad bacteriana posterior a la fertilización con N pueden explicarse porque los grupos copiotróficos prosperan en condiciones ricas en nutrientes, mientras que los grupos oligotróficos sobreviven mejor en entornos con condiciones bajas de C. La descomposición del C recalcitrante del suelo por microorganismos del suelo disminuye en respuesta a un requerimiento más bajo de N, lo que conduce a un cambio a la descomposición de C lábil en un ambiente rico en N (Craine *et al.*, 2007). Pero el exceso de N no solo afecta a las bacterias, también tiene efecto en los hongos y protistas del suelo. Zhao *et al.* (2019), reportaron que con la aplicación de fertilizantes químicos afectó fuertemente a los protistas más que las comunidades de bacterias y hongos. Los protistas son predadores; su principal fuente de alimento son las bacterias y hongos; por lo tanto, la red trófica en el suelo se ve alterada, lo que tiene implicaciones en la funcionalidad y sustentabilidad del ecosistema de suelos agrícolas.

Contrario a la fertilización química, el aporte de N al suelo por el biofertilizante a base de CFN, además de ser mayor, representa una importante fuente de materia orgánica en el agroecosistema, ya que está directamente involucrado en la asimilación del CO_2 atmosférico a través de la fotosíntesis (Renuka *et al.*, 2018). Lassaletta *et al.* (2014) reportaron que más de la mitad del nitrógeno utilizado para la fertilización de los cultivos, se pierde en el ambiente, provocando una mayor alteración de los recursos naturales como el agua superficial y subterránea, la eutrofización costera, la contaminación del aire y suelo, y la generación de una mayor emisión de gases de efecto invernadero; por lo tanto, y de acuerdo a diferentes trabajos reportados acerca del uso de los biofertilizantes a base CFN, es claro que la efectividad de las cianobacterias (y microalgas) como un biofertilizante es evidente (Rossi *et al.*, 2017; Do Nascimento *et al.*, 2019) y representa una alternativa para la producción agrícola.

La fertilización química es una actividad que por muchos años ha permitido incrementar la producción agrícola; sin embargo, no es sostenible y ha traído consecuencias negativas, entre ellas la alteración del ecosistema suelo, como se discutió anteriormente. Por ello, la fertilización biológica es una alternativa a la fertilización química, más aún en esta época en donde la preocupación y el cuidado del ambiente se están convirtiendo en prioridad para gobiernos, agrupaciones y colectivos en México y el mundo.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se reportan resultados relevantes, debido a que al no encontrar diferencias significativas en las diferentes formas del nitrógeno cuando se aplicó el biofertilizante vs fertilizante químico, significa que es posible disminuir el uso del fertilizante químico y sustituirlo por el biofertilizante.

El consorcio de cianobacterias (fijadoras de N) como biofertilizante en el cultivo de maíz es viable, las plantas fertilizadas únicamente con biofertilizante no sufrieron ningún efecto negativo a causa de estrés por deficiencia de nitrógeno.

Con el uso del biofertilizante se redujo en un 50 % la dosis recomendada de fertilizante químico; de esta manera se promueve disminuir el uso y aplicación de fertilizantes químicos y contribuir con un menor impacto al ambiente.

El biofertilizante favoreció el crecimiento de las plantas de maíz de la variedad V-524, independientemente del sitio donde sea aplicado (suelo, foliar o mixto), lo que se vio reflejado en la tasa de crecimiento y la concentración de proteínas en raíz y hoja.

Si bien los resultados obtenidos son alentadores, es necesario en futuras investigaciones determinar la cantidad de biofertilizante y el número de aplicaciones para obtener la mejor eficiencia en el crecimiento y producción del maíz; además de encontrar una forma más práctica y económica de transportar y aplicar el biofertilizante, como el bioencapsulamiento (Alonso-Santos *et al.*, 2021).

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Mar, por facilitar los diferentes espacios (invernadero y laboratorios) para llevar a cabo el trabajo práctico.

CONFLICTO DE INTERES

Los autores de este trabajo declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- Alonso-Santos, E., Cervantes-Hernández, P., Trujillo-Tapia, Ma. N. y Ramirez-Fuentes, E. 2021. Bioencapsulado de *Fischerella* sp.: crecimiento, metabolismo y concentración de inóculo. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. 24: 1-9.
- Agehara, S. y Warncke, D.D. 2005. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources. Soil Sci. Soc. Am. J. 69: 1844-1855.
- Bhardwaj, D., Wahid. A.M., Kumar S.R. y Tuteja, N. 2014. Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. Microbial Cell Factories. 13 (66): 1-10.
- Bhuvaneshwari, B., Subramanian, V. y Malliga, P. 2011. Comparative studies cyanopith and cyanospray biofertilizer with chemical fertilizer on sunflowers (*Helianthus annuus* L.). International Journal of Environmental Sciences. 1(7): 1522-1532.



- Bobbink, R., Hicks, K., Galloway, J., Spranger, T., Alkemade, R., Ashmore, M., Bustamante, M., Cinderby, S., Davidson, E., Dentener, F., Emmett, B., Erisman, J., Fenn, M., Gilliam, F., Nordin, A., Pardo, L. y Vrie, W.D. 2010. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis. *Ecological Applications*. 20: 30-59.
- Bundy, L.G. y Meisinger, J.J. 1994. Nitrogen availability indices. In: Weaver, R. W.; Angle, J. S. and Bottomley, P. S. (eds.). *Methods of Soil Analysis: Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*. Soil Science Society of America, Inc. USA. 951-984 pp.
- Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., de Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W. y Brussaard, L. 2018. Soil quality –A critical review. *Soil Biol Biochem*. 120: 106-125.
- Colección de microorganismos del Centro Nacional de Recursos Genéticos (CM-CNRG). Tepatitlán de Morelos, Jal. México.
- Craine, J.M., Morrow, C. y Fiere, N. 2007. Microbial nitrogen limitation increases decomposition. *Ecology*. 88: 2105-2113.
- Dineshkumar, R., Subramanian, J., Gopalsamy, J., Jayasingam, P., Arumugam, A., Kannadasan, S. y Sapatkumar, P. 2019. The impact of using microalgae as biofertilizer in maize (*Zea mays* L.). *Waste Biomass Valor*. 10: 1101-1110.
- Ding, L., Wang, K.J., Jiang, G.M., Biswas, D.K., Xu, H., Li, F. y Li, Y.H. 2005. Effects of nitrogen deficiency on photosynthetic traits of maize hybrids released in different years. *Annals of Botany*. 96: 925-930.
- Do Nascimento, M., Battaglia, M.E., Sánchez, R.L., Ambrosio, R., Arruebarrena, Di P.A. y Curatti, L. 2019. Prospects of using biomass of N₂-fixing cyanobacteria as an organic fertilizer and soil conditioner. *Algal Research*. 43: 101652.
- Fallah, S. y Tadayyon, A. 2010. Uptake and nitrogen efficiency in forage maize: effects of nitrogen ad planta density. *Agrociencias*. 44: 549-560.
- Foster, J.C. 1995a. Soil sampling, handling, storage and analysis. In: "Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry. Kassem, A. and Nannipieri, P. (eds.). Academic Press, San Diego, CA. 49-51 pp.
- Foster, J.C. 1995b. Soil nitrogen. In: "Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry. Kassem, A. and Nannipieri, P. (eds.). Academic Press, San Diego, CA. 79-87 pp.
- García, J.P. y Espinosa, J. 2008. Relación del índice de verdor con la aplicación de nitrógeno en diez híbridos de maíz. *Informaciones Agronómicas*. 71: 9-14.
- Gheda, S.F. y Ahmed, D.A. 2015. Improved soil characteristics and wheat germination as influenced by inoculation of *Nostoc kihlmani* and *Anabaena cylindrical*. *Rend. Fis. Acc. Lincei*. 26: 121-131.
- Giacometti, C., Demyan, M.S., Cavani, L., Marzadori, C., Ciavatta, C. y Kandeler, E. 2013. Chemical and microbiological soil quality indicators and their potential to differentiate regimes in temperate agroecosystems. *Applied Soil Ecology*. 64: 32-48.
- Hofman, G. y Van Cleemput, O. 2004. Soil and plant nitrogen. International Fertilizer Industry Association. Paris, France. 48 pp.
- Hokmalipour, S. y Hamele, D.M. 2011. Physiological growth indices in corn (*Zea mays* L.) cultivars as affected by nitrogen fertilizer levels. *World Applied Sciences Journal*. 15(12): 1800-1805.
- Hunt, R. 2003. Growth analysis, individual plants. In: Thomas, B.; Murphy, D. J.; Murray, D. (eds.). *Encyclopedia of applied plant sciences*. London. Academic Press. 588-596 pp.
- Hussain, A. y Hasnain, S. 2011. Phytostimulation and biofertilization in wheat by cyanobacteria. *J. Ind Microbiol Biotechnol*. 38: 85-92.
- Hynes, R.K., Jans, D.C., Bremer, E., Lupwayi, N.Z., Rice, W.A., Clayton, G.W. y Collins, M.M. 2001. Rhizobium population dynamics in the pea rhizosphere of rhizobial inoculants strain applied in different formulations. *Can J. Microbiol*. 47: 595-600.
- INEGI. 1997. El maíz en el estado de Chiapas.
- Irisarri, P., Gonnet, S., Deambrosi, E. y Monza, J. 2006. Cyanobacterial inoculation and nitrogen fertilization in rice. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2: 237-242.
- Kuepper, G. 2003. Foliar fertilization. *Appropriate Technology Transfer for Rural Areas*. www.attra.ncat.org. Consultado 16 de mayo 2024
- Lan, Sh., Wu, L., Zhang, D. y Hu, Ch. 2013. Assessing level of development and successional stages in biological soil crusts with biological indicators. *Microb. Ecol*. 66: 394-403.
- Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Anglade, J. y Gamier, J. 2014. 50-year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environmental Research Letters*. 9: 1-9.
- Lichtenhaler, H.K., 1995. El estrés y la medida del estrés en plantas. In: *La Ecofisiología vegetal una ciencia de síntesis*. Reigosa, J. M.; Pedrol, N. y Sánchez, A. (comps.). Ed. Thomson. 59-107 pp.
- Lowry, O.H., Rosenbrough, N.J., Farr, A.L. y Randall, R.J. 1951. Protein measurement with the folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*. 193: 265-272. Downloaded from <http://www.jbc.org/>
- Lu, J., Bai, Z., Velthof, G.L., Wu, Z., Chadwick, D. y Ma, L. 2019. Accumulation and leaching of nitrate in soils in wheat-maize production in China. *Agricultural Water Management*. 212: 407-415.
- Mackinney, 1941. Absorption of light by chlorophyll solutions. *Journal of Biological Chemistry*. 140: 315-332. Downloaded from <http://www.jbc.org/>
- Maqubela, M.P., Mnkeni, P.N.S., Issa O.M., Pardo, M.T. y D'Acqui, L.P. 2009. Nostoc cyanobacterial inoculation in South African agricultural soils enhances soil structure, fertility, and maize growth. *Plant Soil*. 315: 79-92.
- Mendoza-Elos, M., Mosqueda-Villagómez, C., Rangel-Lucio, J.A., López-Benites, A., Rodríguez-Herrera, S.A., Latournerie-Moreno, L. y Moreno-Martínez, E. 2006. Densidad de población y fertilización nitrogenada en la clorofila, material seco y rendimiento de maíz normal y QPM. *Agricultura Técnica en México*. 32: 89-99.
- Miransari, M. 2010. Biological fertilization. In: *Current Research and Education Topics*. Méndez-Villa, A. (Ed). Applied Microbiology and Microbial Biotechnology. 168-176 pp.
- Nain, L., Rana, A., Joshi, M., Jadhav, S.D., Kumar, D., Shivay, Y.S., Paul, S. y Prasanna, R. 2010. Evaluation of synergistic effects of bacterial and cyanobacterial strains as biofertilizer for wheat. *Plant Soil*. 331: 217-230.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Secretaría del Medio

- Ambiente y Recursos Naturales. México. Diario Oficial de la Federación. México, 31 de diciembre 2002.
- Noreña-Caro, D. y Benton, M.G. 2018. Cyanobacteria as photoautotrophic biofactories of high-value chemicals. *Journal of CO₂ Utilization*. 28: 335-366.
- Osman, M.E.H., El-Sheekh, M.M., El-Naggar, A.H. y Gheda, S.F. 2010. Effect of two species of cyanobacteria as biofertilizer on some metabolic activities, growth and yield of pea plant. *Biol Fertil Soils*. 46: 861-875.
- Pereira, I., Ortega, R., Barrientos, L., Moya, M., Reyes, G. y Kramm, V. 2009. Development of biofertilizer based on filamentous nitrogen-fixing cyanobacteria for rice crops in Chile. *Journal of Applied Physiology*. 21: 135-144.
- Poffenbarger, H., Coyne, M.S. y Frye, W.W. 2018. Nitrogen in soils/ cycle. *Earth Systems and Environmental Sciences*. July 1-13.
- Prasanna, R., Joshi, M., Rana, A., Shivay, Y.S. y Nain, L. 2012. Influence of co-inoculation of bacteria-cyanobacteria on crop yield and C-N sequestration in soil under rice crop. *World J. Microbiol. Biotechnol*. 28(3): 1223-1235.
- Renuka, N., Guldhe, A., Prasanna, R., Singh, P. y Bux, F. 2018. Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects, and challenges. *Biotechnology Advances*. 36(4): 1255-1273.
- Rossi, F., Li, H., Liu, Y. y De Philippis, R. 2017. Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): Perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal. *Earth-Science Reviews*. 171: 28-43.
- Shen, W., Ni, Y., Gao, N., Bian, B., Zheng, S., Lin, X. y Chu, H. 2016. Bacterial community composition is shaped by soil secondary salinization and acidification brought on by high nitrogen fertilization. *Applied Soil Ecology*. 108: 76-83.
- Schulz, T.J. y Thelen, K.D. 2008. Soybean seed inoculants and fungicidal seed treatment effects on soybean. *Crop Sci*. 48: 1975-1983.
- Shrestha, J., Chaudhary, A. y Pokhrel, D. 2018. Application of nitrogen fertilizer in maize in Southern Asia: a review. *Peruvian journal of Agronomy*. 2(2): 22-26.
- Singh, J.S., Pandey, V.C. y Singh, D.P. 2011. Efficient soil microorganisms: A new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agriculture, Ecosystems and Environmental*. 140: 339-353.
- Subramanian, V., Krishna, S.M. y Malliga, P. 2012. Analysis of biochemical and yield parameters of *Zea mays* (corn) cultivated in the field supplement with coir pith based cyanobacterial biofertilizer. *Journal of Algal Biomass Utilization*. 3(3): 54-57.
- Sun, B., Bai, Z., Xue, L., Zhang, S., Wei, Y., Zhang, Z., Zhuang, G. y Zhuang, X. 2020. *Bacillus subtilis* biofertilizer mitigating agricultural ammonia emission and shifting soil nitrogen cycling microbiomes. *Environmental International*. 144: 105989.
- Tiwari, O.N., Bhunia, B., Mondal, A., Gopikrishna, K. y Indrama, T. 2019. System metabolic engineering of exopolysaccharide-producing cyanobacteria in soil rehabilitation by inducing the formation of biological soil crusts: A review. *Journal of Cleaner Production*. 211: 70-82.
- Trishna, M., Surajit, B., Madhurankhi, G., Purnita, B., Bannhi, D., Abhrajyoti, G. y Prosun, T. 2017. Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. *Environ Sci Pollut Res*. 24: 3315-3335.
- Trujillo-Tapia, M.N. y Ramírez-Fuentes, E. 2015. Biofertilizer: An alternative to reduce chemical fertilizer in agriculture. *Journal of Global Agriculture and Ecology*. 42(2): 99-103.
- Trujillo-Tapia, M.N., Ramírez-Fuentes, E. y Cervantes-Hernández, P. 2016. Presence and variation of cyanobacteria related to the physical properties of soil on the coast of Oaxaca, México. *Tropical Ecology*. 57(3): 503-511.
- Vessey, J.K. 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil*. 255: 571-586.
- Xu, R., Tian, H., Pan, S., Prior, S.A., Feng, Y., Batchelor, W.D., Chen, J. y Yang, J. 2019. Global ammonia emissions from synthetic nitrogen fertilizer applications in agricultural systems: Empirical and process-based estimates and uncertainty. *Glob. Change Biol*. 25: 314-326.
- Xi, D., Zhao, B., Wang, S. y Duan, L. 2020. Benefit of China's reduction in nitrogen oxides emission to natural ecosystems in East Asia with respect to critical load exceedance. *Environ. Int*. 136: 105468.
- Yu, H., Ling, N., Wang, T., Zhu, C., Wang, Y., Wang, S. y Gao, Q. 2019. Response of soil biological traits and bacterial communities to nitrogen fertilization mediate maize yields across three soil types. *Soil & Tillage Research*. 185: 61-69.
- Zeng, J., Liu, X., Song, L., Lin, X., Zhang, H., Shen, C. y Chu, H. 2016. Nitrogen fertilization directly affects soil bacterial diversity and indirectly affects bacterial community composition. *Soil Biol Biochem*. 97: 41-49.
- Zhao, Z.B., He, J.Z., Geisen, S., Han, L.L., Wang, J.T., Shen, J.P., Wei, W.X., Fang, Y.T., Li, P.P. y Zhang, L.M. 2019. Protist communities are more sensitive to nitrogen fertilization than other microorganisms in diverse agricultural soils. *Microbiome*. 7-33.