

*Artículo Original*

**Uso potencial de cianobacterias como biofertilizante  
para el cultivo de maíz azul en la Ciudad de México**

**Hernández-Reyes B.M.<sup>1</sup>; Rodríguez-Palacio M.C.<sup>2</sup>; Castilla-Hernández P.<sup>1\*</sup>; Sánchez-Robles J.<sup>1</sup>; Vela-Correa G.<sup>1</sup>; Schettino-Bermúdez B.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Metropolitana - Xochimilco. Departamento de El Hombre y su Ambiente. Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, C. P. 04960. Ciudad de México  
(\*Autor de Correspondencia: castilla@correo.xoc.uam.mx)

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa. Departamento de Hidrobiología. Av. San Rafael Atlixco 189, Col. Vicentina, C. P. 09340. Ciudad de México.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma Metropolitana - Xochimilco. Departamento de Producción Agrícola y Animal. Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, C. P. 04960. Ciudad de México.

**Resumen**

El maíz azul contiene más proteínas y una menor cantidad de almidón que el maíz blanco; mayor cantidad de antocianinas y compuestos fenólicos que lo hacen más resistente a plagas y lo protegen del estrés biótico y abiótico. Entre las prácticas agronómicas que se realizan para su cultivo se encuentra la aplicación de fertilizantes químicos, a fin de garantizar la producción, aunque pueden presentarse problemas asociados a su uso, como la pérdida de nutrientes, de humus y de la actividad microbiana, provocando una baja productividad y contaminación ambiental. El objetivo de este estudio fue evaluar la aplicación de cianobacterias como biofertilizante para el cultivo de maíz azul en un predio de la Ciudad de México. Se consideraron cuatro tratamientos: el primero, un consorcio de cianobacterias aisladas de suelo agrícola; el segundo, un fertilizante químico; el tercero un biofertilizante comercial derivado de *Azospirillum*; y el cuarto la cianobacteria *Nostoc commune*. Durante la investigación se monitoreó la altura de la planta, el diámetro del tallo, el número de hojas por planta; se determinó el rendimiento y contenido nutrimental del grano y del forraje; se analizaron algunas propiedades físicas y químicas del suelo antes de la siembra y después de la cosecha, lo mismo que la permanencia de microorganismos fotosintéticos. La mayor altura de planta y número de hojas se presentó en el tratamiento correspondiente al consorcio de cianobacterias (305 cm y 18.3 hojas), lo que se reflejó en la cantidad de forraje (12.5 t/ha). El rendimiento de grano del consorcio de cianobacterias fue similar al del fertilizante químico (1.76 y 2.07 t/ha). La mayor cantidad de proteína en los granos de maíz, correspondió al tratamiento del consorcio de cianobacterias (9.78%). En este tratamiento, en el forraje el contenido de fibra detergente neutro y fibra detergente ácido fue de 68.01 y 40.08%, respectivamente. Se observó una mejora en las características del suelo donde se utilizó el consorcio de cianobacterias, seguido del tratamiento con *Azospirillum*. Las cianobacterias permanecieron en el suelo y se incrementó la biodiversidad de microorganismos fotosintéticos. En conclusión, el empleo de biofertilizantes a base de consorcios de cianobacterias abre un campo de oportunidades enfocadas en mejorar los suelos con rendimientos similares a los obtenidos por la aplicación de fertilizantes.

**Palabras clave:** *Cianobacterias; Biofertilizantes; Maíz; Suelo; México.*

## Abstract

Blue maize has more proteins and a lower starch content than white maize. Likewise, it contains a major amount of anthocyanin and phenolic compounds, which render it more resistant to plagues and to biotic and abiotic stress. The application of chemical fertilizers is among the agronomic practices carried out, although there may be problems associated with their use, such as nutrients, humus, and microbial activity lost, giving rise to low productivity and environmental pollution. The aim of this work was to evaluate the application of cyanobacteria as a biofertilizer for blue-maize crops in an area of Mexico City. For this, we proposed four treatments: the first consisted of the application of a cyanobacterial consortium isolated from agricultural soil; in the second, a chemical fertilizer was used; in the third, a commercial biofertilizer derived from *Azospirillum* was applied, and in the fourth, the cyanobacterium *Nostoc commune* was utilized. During the investigation, plant height, stem diameter and leaf number per plant were monitored. Also, the yield and nutritional content of the grain and the forage were determined. Additionally, some physical and chemical properties of the soil prior to sowing and after the harvest were analyzed, as was the permanency of the photosynthetic microorganisms. Among the results, we found the highest plant height and number of leaves was presented in the treatment corresponding to the cyanobacteria consortium (305 cm and 18.3 leaf), which was reflected in the amount of forage (12.5 t/ha). Grain yield was similar between the cyanobacterial consortium and that of the chemical-fertilizer treatment (1.76 and 2.07 t/ha). The greater protein amount corresponded to the cyanobacterial-consortium treatment (9.78%). Neutral detergent and acid detergent fiber content in this treatment was of 68.01 and 40.08%, respectively. An improvement in soil characteristics was observed in the treatment with the cyanobacterial-consortium, followed by that of the *Azospirillum* treatment. The cyanobacteria remained in the soil and the diversity of the photosynthetic microorganisms increased. In conclusion, the use of biofertilizer based on cyanobacterial consortia opens a field of opportunities focused on improving the soil, with similar yields to those obtained by the application of fertilizer.

**Key words:** *Cyanobacteria; Biofertilizer; Maize; Soil; Mexico.*

## 1. Introducción

A nivel mundial el maíz (*Zea mays* L.) representa el tercer lugar en cultivo de cereales; con una producción estimada para el año 2018/19 de 1,087.5 MT (Obid *et al.*, 2016; SAGARPA-ASERCA-CIMA, 2018). En México es de gran importancia alimentaria y socioeconómica, en 2017 se destinaron para su siembra 7.5 millones de hectáreas, alcanzando una producción de 27.8 millones de toneladas (ASCDMA, 2018); el maíz producido en mayor cantidad es blanco (85.9%), seguido de amarillo (13.6%) y sólo un 0.5% de otro tipo de maíz,

entre estos se encuentra el de grano azul (FIRA, 2016).

El maíz azul presenta diversas ventajas tanto a nivel planta como para consumo humano, por ejemplo, produce más proteínas y menor cantidad de almidón que el maíz blanco, lo que favorece a personas diabéticas o con obesidad; tiene una alta cantidad de antocianinas, compuestos fenólicos que lo hacen más resistente a plagas y lo protegen de estrés biótico y abiótico. Además, en humanos la presencia de estas sustancias ayuda a prevenir enfermedades cardiovasculares y cancerígenas (Mutlu *et*

*al.*, 2017; Nankar *et al.*, 2017; Salinas *et al.*, 2012).

Entre las prácticas agronómicas que se realizan durante el cultivo de maíz, se lleva a cabo la fertilización química con compuestos inorgánicos, elaborados a partir de rocas y derivados del petróleo (Larqués-Saavedra *et al.*, 2017). Y aunque este tipo de fertilización garantiza la producción, varios son los problemas asociados a su uso en los suelos, ya que han ocasionado impactos negativos como desgaste físico, pérdida de nutrientes, de humus y de la actividad microbiana, lo anterior provoca bajas en la productividad de la mayoría de los cultivos, desbalances en los ecosistemas y contaminación ambiental, con una afectación a los agricultores y a los consumidores finales (Suquilanda, 2008; Morales-Avedaño *et al.*, 2014; Saurabh y Kumar, 2014). Por lo que es necesario implementar nuevas prácticas que satisfagan las necesidades de producción y que promuevan un equilibrio en los ecosistemas. Esto se puede lograr por medio de prácticas ecológicamente sanas, como el uso de biofertilizantes.

Obid *et al.* (2016) definen a los biofertilizantes como sustancias compuestas por microorganismos vivos que pueden aplicarse directamente en las semillas, superficie de plantas o suelos, que colonizan la rizosfera o el interior de las plantas y promueven el crecimiento por favorecer el aporte o la viabilidad de nutrientes primarios. La biofertilización además de coadyuvar en la nutrición y sanidad de los cultivos, ayuda a que la producción agrícola sea sostenible, además reduce el uso de fertilizantes químicos (Díaz-Franco *et al.*, 2015; Saurabh y Kumar, 2014).

La aplicación de hongos micorrizicos arbusculares y rizobacterias es considerada una técnica apropiada de biofertilización ya que son promotores del crecimiento vegetal y bioestimulantes. Entre los más comunes se

encuentran los géneros *Rhizobium*, *Azospirillum* y *Glomus*. Especialmente en el caso de *Azospirillum*, la respuesta de los cultivos es frecuentemente exitosa, pues se han reportado incrementos significativos mayores al 30%, en la producción de grano y materia seca de cultivos como maíz, frijol y trigo (Holguin *et al.*, 2003; Aguirre-Medina, 2004; García-Olivares *et al.*, 2012). También se han empleado como biofertilizantes las cianobacterias que son un pequeño grupo de procariontes fotosintéticos, con capacidad de fijar N<sub>2</sub> estas desempeñan un papel vital en mantener a largo plazo la fertilidad de los suelos. Además de mejorar la estructura del suelo, que influye en su permeabilidad y capacidad de retención de agua (Mohan *et al.*, 2015). Estos microorganismos durante su ciclo de vida incrementan la materia orgánica y segregan compuestos bioactivos (fitohormonas, vitaminas, aminoácidos, etc.), los cuales promueven el crecimiento y desarrollo de las plantas; igualmente liberan metabolitos secundarios que ayudan al control biológico de enfermedades bacterianas y fúngicas en los cultivos. Además, se ha reportado que las cianobacterias contribuyen en la conversión de formas de fósforo insolubles a formas asimilables por las plantas (Sahu *et al.*, 2012; Khadatare y Suryawanshi, 2016). Las cianobacterias de los géneros *Nostoc*, *Tolypothrix*, *Anabaena* y *Aulosira* han demostrado múltiples beneficios en arrozales (Sahu *et al.*, 2012). Otros estudios destacan la inoculación de cianobacterias en cebada, trigo, avena, rábano, pepino, tomate, calabaza, algodón, caña de azúcar, chile y lechuga (Sayed *et al.*, 2013; Khadatare y Suryawanshi, 2016). Sin embargo, pocos son los estudios reportados en maíz, donde resaltan un aumento en el porcentaje de germinación y longitud de brotes y raíces, contenido de nitrógeno total y actividad de la nitrogenasa, así como en el

rendimiento de grano (Mohan *et al.*, 2015). Asimismo, las especies *Tolypothrix tenuis*, *Microchaete tenera* y *Nostoc* sp. lograron un aumento en algunas actividades enzimáticas del suelo y en el crecimiento y rendimiento de maíz (De Cano *et al.*, 2002; Maqubela *et al.*, 2009). Otros autores confieren buenos resultados en mejora de suelo, mayor porcentaje de germinación y producción cuando se emplean consorcios de cianobacterias, o de cianobacterias y microalgas (Hegazi *et al.*, 2010; Morales-Avendaño *et al.*, 2014).

El uso de cianobacterias como biofertilizantes para cultivos de maíz se posiciona como una alternativa ecológicamente positiva, que podría sustentarse ya que para producir este tipo de biofertilizante se puede utilizar agua no potable, lixiviados orgánicos, CO<sub>2</sub> atmosférico y trabajarlo en espacios reducidos en sistemas de fotobiorreactores (Saurabh y Kumar, 2014; Prasad y Prasad, 2001; Sahu *et al.*, 2012; Borowitzka, 2005). Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar la aplicación de cianobacterias como biofertilizantes para el cultivo de maíz azul de la raza Chalqueño en un predio de la Ciudad de México, determinando algunas características morfológicas de las plantas de maíz, el rendimiento y producción de proteínas en grano, así como cantidad de forraje e influencia en algunas propiedades de los suelos por la aplicación de los biofertilizantes.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Origen y aplicación del biofertilizante

Se tomaron muestras de suelo agrícola y se colocaron en columnas Winogradsky (Rodríguez-Palacio *et al.*, 2018), una vez que se presentaron cambios en coloración en la columna, se revisaron al microscopio óptico y se aislaron las cianobacterias (con las que formamos el consorcio), de manera

clonal, para esto se utilizó la técnica de aislamiento con micropipetas de punta adelgazada. La cepa de *Nostoc commune* fue obtenida de la colección de cultivos de microalgas y cianobacterias del laboratorio de Ficología Aplicada UAM-I. Los cultivos se fueron escalando de manera unialgal partiendo de tubos de 10 mL, matraces Erlenmeyer de 100 y 1000 mL, hasta escalar a fotobiorreactores de vidrio cilíndricos de 16 L empleando siempre un inóculo del 10%. Para el crecimiento en ambos casos se utilizó medio de cultivo ácido húmico de lombricomposta comercial en una concentración de 5 mL/L.

Para la aplicación de los biofertilizantes al cultivo de maíz, el *Azospirillum* marca BiofertiBuap, se preparó a razón de  $1.47 \times 10^6$  células por semilla, como lo marca el fabricante e igualmente se concentró el cultivo de *N. commune* en la misma proporción celular. Para preparar el biofertilizante que denominamos consorcio, se mezclaron los cultivos de las cianobacterias *Anabaena*, *Leptolyngbya* y *Synechocystis* en proporciones 2:2:1, quedando una concentración celular por semilla de  $0.588 \times 10^6$ ,  $0.588 \times 10^6$  y  $0.294 \times 10^6$ , respectivamente; la cantidad de células conocida fue adicionada al suelo donde se encontraba la semilla. Para el tratamiento con fertilizante químico, este se adicionó para obtener 120N-60P-0K, según las especificaciones del fabricante, empleándose urea (CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O) y fosfato monoamónico soluble [(NH<sub>4</sub>)H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>].

### 2.2 Diseño experimental, condiciones de cultivo y seguimiento

Para el estudio se utilizó maíz azul de la raza Chalqueño. La siembra se llevó a cabo en el Centro de Educación Ambiental Mario Molina ubicado en la Ciudad de México, perteneciente a la Asociación Civil ESPIGA-CDMX, bajo condiciones de temporal en los meses correspondientes a

primavera-verano en el ciclo agrícola 2017; a una altitud de 2235 msnm, una temperatura anual de 24.6°C y una precipitación media de 488 mm (CONAGUA, 2017). Para el cultivo se siguieron las prácticas agronómicas habituales de barbecho y rastro, así como la delimitación de parcelas. El arreglo espacial de los tratamientos fue al azar. Cada tratamiento constó de treintinueve matas distribuidas en tres surcos. La distancia entre surcos fue de 75 cm y entre matas de 20 cm. El seguimiento en cada tratamiento se realizó a nueve ejemplares del surco central para evitar el efecto de borde.

Se determinaron las características morfológicas de los ejemplares (altura y diámetro de tallo; número de hojas). La cosecha se realizó a los 231 días. El rendimiento del grano se estimó de acuerdo a la siguiente ecuación:  $RG = [(Plantas/ha) (Mazorcas/planta) (g \text{ grano/mazorca}) (factor \text{ de conversión gramo a tonelada})]$ , modificada de LG (2018), expresado en toneladas por hectárea y estandarizado a un nivel de humedad del 14%.

### **2.3 Análisis nutricional del grano y forraje**

Al momento de la cosecha se colectaron dos plantas por tratamiento para conocer el contenido nutricional del forraje; se secaron a 80°C y de ambas plantas se hizo una muestra compuesta, que se analizó por espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRSystems modelo NIR 6500, marca FOSS) en un intervalo de espectro de luz entre 400 y 2500 nm, módulo detector de reflectancia y software ISIscan versión 4.2 (Infrasoft International LLC, State College, PA, USA) (Egesel y Kahrıman, 2012). El resultado fue el promedio de 20 escaneos. La curva de calibración para heno y forraje fresco (IC-0904FE) fue empleada para las mediciones de proteína, fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido

(FDA), fósforo y potasio. Asimismo, por este método se llevó a cabo el análisis del grano cosechado, a partir de una muestra compuesta por tratamiento, empleándose la curva de calibración de grano de maíz (IC-0909FE) para la medición de proteína, grasa y fibra cruda.

### **2.4 Análisis físico y químico del suelo y permanencia de microorganismos**

Antes de la siembra y después de la cosecha se colectaron muestras de suelo en cada una de las parcelas; el muestreo, análisis e interpretación se realizó apegado a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). Por otra parte, se tomaron muestras al azar de raíces de tres ejemplares cosechados de cada tratamiento, las cuáles se cortaron y colocaron en columnas de Winogradsky, asimismo se tomaron muestras de suelo adyacente a la raíz de cada tratamiento, por triplicado y también se colocaron en columnas, esto para analizar la permanencia de las cianobacterias empleadas para la biofertilización, así como de *Azospirillum* y otros microorganismos fotosintéticos. Cada semana durante dos meses, se realizó observación de las columnas y revisión a microscopio óptico (marca Olympus). Los microorganismos que proliferaron en las mismas se separaron e identificaron taxonómicamente.

### **2.5 Análisis estadístico**

Para evaluar las diferencias en las medias de los tratamientos de las variables morfométricas y de rendimiento, se aplicó un modelo de análisis de la varianza de una vía y cuando se encontraron diferencias significativas, se realizó la comparación de medias múltiples de Tukey. La significancia que se consideró en todas las pruebas estadísticas fue de 0.05. Los análisis se realizaron con el programa Systat 9.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Características morfológicas de las plantas de maíz

De las características morfológicas, la altura de planta fue mayor en el tratamiento con el consorcio desde las primeras semanas de cultivo, y este comportamiento se observó hasta el final de la experimentación alcanzando 305 cm (Tabla 1); el análisis de varianza mostró diferencias significativas entre los tratamientos ( $p = 0.003$ ), mientras que el análisis post-hoc reflejó una similitud entre el consorcio y el fertilizante químico. La altura alcanzada con el consorcio podría deberse a que las cianobacterias producen sustancias adhesivas, excreción de sustancias que promueven el crecimiento, como hormonas (auxina, giberelina), vitamina B<sub>12</sub>, aminoácidos, aumento de la

capacidad de retención de agua a través de la estructura de los exopolisacáridos; se mejora la superficie radicular (Figura 1), lo cual ayuda a aumentar el rendimiento del cultivo en un 10-25% (Saurabh y Kumar, 2014).

La altura de planta con el consorcio superó lo reportado por Arellano *et al.* (2014) y Arellano *et al.* (2013), 283-188 cm y 227-240 cm respectivamente, en maíz azul fertilizado químicamente. El número de hojas por planta en este tratamiento fue 18.3 y únicamente se observaron diferencias con el tratamiento de *N. commune*. Los resultados en ambas características se reflejan en la producción de forraje. Por su parte, las plantas que mostraron un tallo más robusto fueron las fertilizadas químicamente, con el tratamiento del consorcio y con el de *Azospirillum*.

**Tabla 1.** Comparación de las variables evaluadas en los cultivos con los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Morfología de la planta de maíz				Rendimiento	
	*Altura cm	*Cantidad de hojas Núm	**Diámetro de tallo cm	MPP Núm	Grano t ha <sup>-1</sup>	Forraje t ha <sup>-1</sup>
1. Consorcio	305±24.3 <sup>ac</sup>	18.3±0.9 <sup>abc</sup>	2.88±0.17 <sup>ab</sup>	0.57	1.76±0.28 <sup>a</sup>	12.5±2.3 <sup>ac</sup>
2. Fertilizante químico	255±11.6 <sup>abc</sup>	17.4±0.3 <sup>ab</sup>	3.24±0.1 <sup>abc</sup>	0.57	2.07±0.57 <sup>a</sup>	8.1±0.96 <sup>ac</sup>
3. <i>Azospirillum</i>	245±6.6 <sup>ab</sup>	17.4±0.4 <sup>ab</sup>	2.87±0.1 <sup>ab</sup>	0.43	0.44±0.001 <sup>a</sup>	5.5±0.98 <sup>bd</sup>
4. <i>Nostoc commune</i>	205±15.1 <sup>ab</sup>	15.3±0.7 <sup>abd</sup>	2.58±0.12 <sup>abd</sup>	0.65	0.66±0.19 <sup>a</sup>	6.6±1.13 <sup>bd</sup>

\*Datos semana veintidós; \*\*Datos semana nueve.

MPP = Mazorcas por planta. <sup>a</sup>Representa el error estándar. Medias con la misma letra en cada columna indican que los tratamientos son estadísticamente iguales.

En rendimiento de grano no hubo diferencias significativas entre los tratamientos ( $p = 0.096$ ), pero evidentemente con el consorcio y el fertilizante químico el rendimiento fue más alto; la producción se encuentra en el intervalo de 1.02-3.5 t/ha reportado por otros autores para maíz azul (Miguel *et al.*, 2004; Salinas *et al.*, 2012; Arellano *et al.*, 2013; FIRA, 2016); con una proporción de mazorcas por planta similar a aquella

reportada por Miguel *et al.* (2004). Cabe destacar que la aplicación del consorcio de cianobacterias al cultivo favoreció el buen desarrollo y producción tal como reportan Mohan *et al.* (2015). Los tratamientos con *N. commune* y *Azospirillum* mostraron un bajo rendimiento a pesar de que el segundo ya ha sido probado como biofertilizante en cultivos de maíz con buenos resultados (Irizar *et al.*, 2003; García-Olivares *et al.*, 2012).



**Figura 1.** Raíces de plantas de maíz tomadas de diferentes tratamientos. a) Consorcio; b) Fertilizante químico; c) *Azospirillum*; d) *Nostoc commune*.

### 3.2 Contenido nutricional del grano

El contenido nutricional del grano cosechado fue más alto que el que se obtuvo de las semillas iniciales utilizadas para la siembra, estas presentaron un porcentaje de 7.35% de proteína mientras que las producidas con los tratamientos alcanzaron de 9.52 a 9.78%, siendo el más alto en el consorcio (Figura 2). Estos porcentajes fueron mayores a los reportados para maíz azul Chalqueño (Agama-Acevedo *et al.*, 2011; Navarro *et al.*, 2016) y en el caso del consorcio muy cercano al 10.6% mencionado por Nankar *et al.* (2017), así como al 10.8% por Navarro *et al.* (2016) para granos de endospermo duro. La escasa diferencia entre los tratamientos podría indicar que el contenido de proteína pudo variar tanto por la disponibilidad de nutrientes, como por otros aspectos entre los que reportan el tipo de endospermo, tipo de suelo, condiciones climáticas (Agama-Acevedo *et al.*, 2011). En cuanto a cenizas se obtuvo un mayor contenido en todos los tratamientos, sin embargo, fueron cercanas a los 0.05 g/g de muestra seca que Agama-Acevedo *et al.* (2011) reportan para maíces de buena calidad. El porcentaje de fibra cruda y grasa fue más bajo que en las semillas iniciales, aspectos que favorecen el grano para consumo humano. La producción de

maíz para los mexicanos es importante para su nutrición debido al aporte proteico.

### 3.3 Contenido nutricional del forraje

La producción de forraje con el consorcio fue alta comparado con los rendimientos obtenidos para este fin, 9.7-15 t/ha (Elizondo y Boschini, 2001), sin observarse diferencias significativas entre este y el tratamiento con fertilizante químico. Con relación a los análisis para conocer el contenido nutricional en los tallos de las plantas, se tuvieron resultados similares en fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN) para el tratamiento con el consorcio y con el fertilizante químico (Tabla 2), encontrándose dentro de los reportados para forraje (Elizondo y Boschini, 2001). La fibra en rumiantes ayuda a moderar el pH del rumen, estimula la producción de saliva y la función ruminal (Cruz y Sánchez, 2000). La FDA y FDN se emplean para estimar la calidad de los forrajes, la ingestión de materia seca, la digestibilidad y el valor energético de los alimentos (Hernández, 2010). En este estudio las plantas de maíz colectadas podrían ser utilizadas como forraje para ganado poligástrico. Esto se confirma al analizar el contenido de las mismas fibras, pero en hoja (Tabla 3).

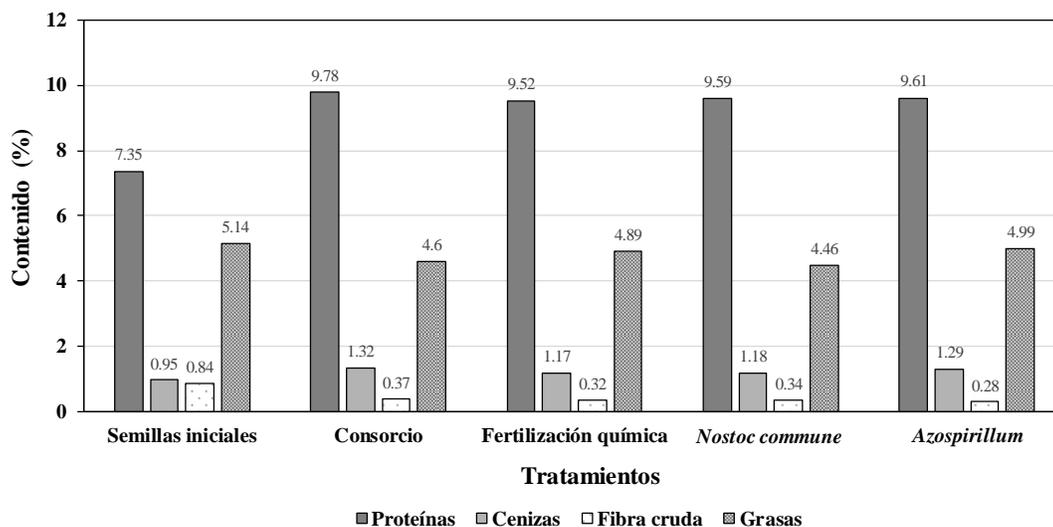


Figura 2. Contenido nutricional de las semillas de maíz.

Tabla 2. Contenido nutricional del tallo de la planta de maíz.

Tratamiento	%					
	Proteína	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	FDA	FDN
1. Consorcio	5.49	0.88	0.12	0.58	40.08	68.01
2. Fertilizante químico	9.00	1.44	0.08	2.49	39.65	68.65
3. <i>Azospirillum</i>	8.50	1.36	0.20	2.28	27.39	49.33
4. <i>Nostoc commune</i>	6.45	1.03	0.21	2.47	32.03	52.18

Tabla 3. Contenido nutricional de las hojas de la planta de maíz.

Tratamiento	%					
	Proteína	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	FDA	FDN
1. Consorcio	11.26	1.80	0.21	3.33	43.03	67.38
2. Fertilizante químico	17.24	2.75	0.27	2.67	23.88	40.37
3. <i>Azospirillum</i>	12.49	1.99	0.22	2.76	36.62	59.87
4. <i>Nostoc commune</i>	10.99	1.75	0	3.57	43.40	70.82

Elizondo y Boschini (2001) refieren que los tallos y forraje provenientes de cultivos de maíz destinados a la producción de granos, pueden ser empleados para la alimentación de ganado; sin embargo, su calidad es baja, conteniendo entre 3.5 y 4% de proteína bruta, pero como se observa en las Tablas 3 y 4 tanto el tallo como el follaje superan estos niveles.

Además, los niveles bajos de nitrógeno en tallo y hoja, así como de fósforo en hojas del tratamiento con el consorcio de cianobacterias con respecto al fertilizante químico pueden resultar en un beneficio ambiental, dado que estos elementos se han reportado como generadores de alto impacto en sistemas de producción de leche bovina al verterlos a suelos a través de las heces y la orina (Jaimes-Cruz y Correa-Cardona, 2016).

### **3.4 Propiedades físicas y químicas del suelo en los diferentes tratamientos**

Otro de los resultados de este estudio fue la evaluación del suelo, antes y después de aplicados los tratamientos, ya que el suelo es el sistema ecológico que se emplea para lograr cubrir a satisfacción las necesidades de alimentación (Ferrera y Alarcón, 2001). Todos los tratamientos incluyendo el suelo inicial tuvieron una densidad aparente menor a la unidad, lo que implica una elevada porosidad constituida por poros de tamaño grande y medio, particularmente en el suelo inicial, que fue ligeramente más arenoso en comparación con las fracciones minerales de los tratamientos (Tabla 4). Este también fue ligeramente más ácido en comparación con los tratamientos utilizados, debido a que existe un predominio de la fracción gruesa (arenas) que favorece las condiciones de drenaje y a su vez presente un mayor lavado de bases, mientras que los tratamientos fueron más alcalinos, especialmente en el que se aplicó el consorcio de cianobacterias. En general, el suelo inicial y la mayoría de los tratamientos tuvieron un contenido medio de materia orgánica (MO), pero el tratamiento con el consorcio se considera rico por tener el mayor aporte, situación que se ve reflejada con el contenido de nitrógeno total (Nt).

El fósforo disponible pasó de un contenido alto a bajo mayormente en el tratamiento con el consorcio, como respuesta a la incorporación por las plantas del cultivo, seguido por *Azospirillum*. Por el contrario, *N. commune* benefició de manera significativa la disponibilidad de este nutriente, aunque esto no se reflejó en el rendimiento de grano, pero sí en el contenido en el tallo de las plantas. En cuanto a la saturación de bases intercambiables, el calcio se encontró en un nivel medio, que ligeramente disminuyó en todos los tratamientos, con excepción *N. commune* en el que se mantuvo muy cercano al del suelo inicial, en cianobacterias Pandey *et al.* (2002) señalan la importancia de este catión en la

regulación de varios procesos celulares. En todos los tratamientos el magnesio se encontró en una concentración alta, al igual que el potasio ( $> 0.6 \text{ Meq } 100 \text{ g}^{-1}$ ), observándose que en los tratamientos con biofertilizante aumentó la concentración de este último, quizá al estimular la propagación de microorganismos solubilizadores de potasio (Wu *et al.*, 2005). Además, la alta concentración de este nutriente probablemente evitó que las plantas presentaran acame, inclinación del tallo con respecto a la vertical de la planta, deformación asociada a la deficiencia de este nutriente (Maya y Ramírez, 2002).

### **3.5 Permanencia de microorganismos en suelo y raíces**

En el análisis de las muestras de suelo se observa la permanencia en el mismo de las especies utilizadas como biofertilizantes y un aumento de microorganismos fotosintéticos tanto en la tierra biofertilizada con el consorcio, como en la biofertilizada con *N. commune* (Tabla 5), lo cual pudo ser favorecido por el inóculo de cianobacterias, ya que estos microorganismos son colonizadores primarios que crean condiciones ideales para que lleguen nuevos colonizadores como algas eucariontes u otras cianobacterias que vemos en el análisis. Además de esto ayudan a la formación de materia orgánica, enriqueciendo el suelo e incrementando su fertilidad dado que retienen agua y nutrientes esenciales que se requieren para el crecimiento adecuado de una planta. La presencia de *Leptolyngbya* y *Synechocystis* que fueron parte del consorcio y que se encontraron en el tratamiento con *N. commune* se explica ya que pudieron formar parte de la biota del suelo, o ser transportados por aire, agua, insectos, aves, etc., sin embargo, es probable que por el bajo número de células en comparación con las inoculadas en el tratamiento consorcio no influyeran en el crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz.

**Tabla 4.** Propiedades físicas y químicas del suelo inicial y en los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Da	Partículas del suelo			pH	MO	Corg.	Nt	P	Iones intercambiables			
		arenas	limos	arcillas						Ca	Mg	Na	K
	g cm <sup>-3</sup>		%			%		mg kg <sup>-1</sup>		Meq 100 g <sup>-1</sup>			
0. Suelo inicial	0.89	63	19	18	6.8	6.6	3.8	0.33	58.2	7.68	7.54	6.29	2.78
1. Consorcio	0.86	56	26	18	7.6	9.7	5.6	0.485	16.6	6.84	6.71	6.61	3.10
2. Fertilizante químico	0.86	55	29	16	7.2	5.0	2.9	0.25	50.9	6.87	7.76	5.53	2.90
3. <i>Azospirillum</i>	0.89	53	37	10	7.4	6.7	2.7	0.235	22.2	6.62	8.04	5.64	3.35
4. <i>Nostoc commune</i>	0.87	55	27	18	7.5	4.7	3.9	0.335	73.5	7.55	8.01	7.59	4.37

**Tabla 5.** Microorganismos fotosintéticos en el suelo después de los tratamientos.

Consorcio		<i>Nostoc commune</i>	
Raíz	Suelo	Raíz	Suelo
<i>Anabaena</i>	<i>Anabaena</i>	<i>Leptolyngbya</i>	<i>Leptolyngbya</i>
<i>Leptolyngbya</i>	<i>Leptolyngbya</i>	<i>Synechocystis</i>	<i>Nostoc commune</i>
<i>Synechocystis</i>	<i>Synechocystis</i>	<i>Nostoc commune</i>	<i>Chlamydomonas</i>
<i>Nostoc</i> sp. 1	<i>Nostoc</i> sp. 1		<i>Criptomonas</i>
<i>Nostoc</i> sp. 2	<i>Pseudanabaena</i>		<i>Pandorina</i>
	<i>Nitzschia</i>		

Saurabh y Kumar (2014) mencionan que, el empleo de algas como acondicionadores de suelos en cultivos de cereales llevaron a un aumento en el rendimiento del cultivo, una mejor absorción de nutrientes y resistencia a plagas. Morales-Avedaño *et al.* (2014), reportan que las cianobacterias *Anabaena* sp., *Calothrix* sp., y *Nostoc* sp. pueden contribuir a la fertilidad del suelo, principalmente por fijación de N<sub>2</sub>. En general para evaluar la fertilidad de un suelo además de analizar las características físicas, químicas se toman en cuenta las biológicas, entre mayor diversidad se presente, se producen mayores interacciones entre las características mencionadas, con cambios significativos en los ciclos biogeoquímicos del suelo y en la disponibilidad de los nutrientes para las plantas (Ferrera y Alarcón, 2001; de-Bashan *et al.*, 2007). Por lo que la biodiversidad de microorganismos se traduce en ventajas en el agroecosistema.

En el caso de las columnas de Winogradsky con las muestras de suelo y raíces de los tratamientos con fertilizante químico y *Azospirillum*, luego de dos meses de monitoreo, no presentaron crecimiento de microorganismos fotosintéticos. En el primer caso podría deberse a problemas de toxicidad por exceso de algún nutriente, salinización, erosión del suelo, cambios en el pH (Suquilanda, 2008; Morales-Avedaño *et al.*, 2014; Saurabh y Kumar, 2014). En el segundo caso se sabe que muchas especies de *Azospirillum* producen bacteriocinas, las cuales, persisten en suelos con bajo contenido de materia orgánica y minerales de arcilla e inhiben temporalmente la microflora natural competidora, lo que le confiere ventaja significativa sobre otros organismos en la colonización radicular (de-Bashan *et al.*, 2007).

### **3.6. Perspectivas y retos del uso de biofertilizantes**

En tiempos pasados los subsidios para comprar fertilizantes, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, hicieron que se pasara a segundo plano el uso de los biofertilizantes, por lo cual las investigaciones aplicadas en este campo eran escasas. Sin embargo, al desaparecer estos subsidios y al aumentar los problemas ambientales como cambio climático, contaminación de acuíferos, deterioro de suelos agrícolas, crecimiento demográfico; estamos viviendo el momento más favorable para el desarrollo de las investigaciones básicas y aplicadas sobre los microorganismos con características como biofertilizantes y para su utilización. La producción masiva de estos biofertilizantes, por personal capacitado, en el caso de las cianobacterias es un proceso relativamente económico comparado con la producción de fertilizantes químicos y es de fácil manejo, se requiere como en cualquier otro cultivo de algas, tierras no fértiles, luz solar, agua, sistemas de cultivo controlados y los inóculos que pueden ser donados o vendidos por las instituciones de investigación. Y aunque tenemos escases de recursos para hacerlo masivo al campo mexicano o internacional, si se ocupara en el proceso de producción lixiviados orgánicos y la captación de CO<sub>2</sub> atmosférico, se podría traducir para empresarios como bonos de carbono, logrando así reducir costos de producción por el beneficio ambiental que se genera y tener una producción sustentable.

Sin embargo, nos enfrentamos a algunos retos como son el educar, entrenar e inclusive motivar a los productores agrícolas para la producción y uso de estos. Que conozcan los beneficios que pueden lograr al utilizar biofertilizantes tanto para las cosechas como para su economía y salud. Por otro lado, y como una manera de disminuir el reto que implica para ellos la obtención de biofertilizantes, sensibilizar a

los gobiernos para el subsidio, como se hacía para la fertilización química.

A todo esto, como parte fundamental, se debe enfatizar en los centros de investigación y universidades en la formación y el entrenamiento de personal especializado, para que sean capaces de responder a los modernos esquemas de producción agrícola que se basan en la sustentabilidad y la protección ambiental, lo que demanda alternativas biológicas para sustituir a los fertilizantes químicos.

#### **4. Conclusiones**

Las cianobacterias pueden ser utilizadas como biofertilizante para el cultivo de maíz azul, sobre todo cuando son aplicadas en consorcios, con beneficios en las características morfológicas de las plantas; así como en el rendimiento del grano y en su calidad nutricional. Además, con la aplicación de cianobacterias, el maíz tuvo una alta producción de forraje, destacando por su contenido de fibra detergente neutro y fibra detergente ácido, en comparación con los demás tratamientos estudiados. Positivamente, las cianobacterias empleadas como biofertilizantes incrementaron el contenido de materia orgánica y disminuyeron la acidez de los suelos en relación con los demás tratamientos evaluados. La permanencia de las cianobacterias después de la cosecha incrementó la biodiversidad de microorganismos fotosintéticos que tienen un papel fundamental como acondicionadores de suelos.

#### **5. Reconocimientos**

Al Proyecto “Cultivos de Microalgas, Usos Potenciales. Caribe y Golfo de México” de la DCBS, UAM Iztapalapa; al proyecto “Calidad del Agua del Río Zahuapan y Biotratamientos” de la DCBS, UAM

Xochimilco; a la Maestría en Ecología Aplicada, UAM Xochimilco. Asimismo a la Biól. E. Raquel Rodríguez Miranda, CEAMM, Delegación Iztacalco. Al Ing. Agrónomo Luis Raúl García Moreno. A los Técnicos Q.F.B. Norma Noguera Hernández y al Biól. Oscar Cano Flores.

Open Access: *This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0) which permits any use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and the source are credited.*

#### **6. Referencias**

- Agama-Acevedo, E., Salinas-Moreno, Y., Pacheco-Vargas, G., Bello-Pérez, L.A. 2011. Características físicas y químicas de dos razas de maíz azul: morfología del almidón. *Rev. Mex. Ciencias Agr.* 2(3):317-329.
- Aguirre-Medina, J.F. 2004. Biofertilizantes Microbianos: Antecedentes del Programa y Resultados de Validación en México. *In: Díaz-Franco A, Mayek-Pérez N, Mendoza A, Maldonado-Moreno N (Eds.). Memoria del Simposio de Biofertilización. INIFAP-Río Bravo, Tamaulipas, México. pp:135-141.*
- Arellano, V.J.L. Rojas, M.I., Gutiérrez, H.G.F. 2013. Híbridos y variedades sintéticas de maíz azul para el Altiplano Central de México: potencial agronómico y estabilidad del rendimiento. *Rev. Mex. Ciencias Agr.* 4(7):999-1011.
- Arellano, V.J.L. Rojas, M.I., Gutiérrez, H.G.F. 2014. Variedades de maíz azul Chalqueño seleccionadas por múltiples caracteres y estabilidad del rendimiento. *Revista Mex. Ciencias Agr.* 5(12):469-1480.

- ASCDMA. (2018). Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios. Gobierno de México. En línea: <https://www.gob.mx/aserca/es/articulos/maiz-grano-cultivo-representativo-de-mexico?idiom=es>. Fecha de Consulta. 25/03/2019.
- Borowitzka, M.A. 2005. Culturing Microalgae in Outdoor Ponds. In: Andersen R.A. (Ed). Algal Culturing Techniques. Elsevier Academic Press, San Diego, California. pp.205-219.
- CONAGUA 2017. Comisión Nacional del Agua. Resúmenes mensuales de temperaturas y lluvia, 2017. En línea: <http://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/TMAX/2017.pdf>. Fecha de Consulta. 10/02/2018.
- Cruz, C.M., Sánchez, M.J. 2000. La fibra en la alimentación del ganado lechero. *Nutr. Anim. Trop.* 6(1):39-74.
- De Cano, M.M.S., De Caire, G.Z., De Mulé, M.C.Z., Palma, R.M. 2002. Effect of *Tolypothrix tenuis* and *Microchaete tenera* on biochemical soil properties and maize growth. *J. Plant Nutr.* 25:2421-2431.
- de-Bashan, L.E., Holguin, G., Glick, B.R., Bashan, Y. 2007. Bacterias Promotoras de Crecimiento en Plantas para Propósitos Agrícolas y Ambientales. In: Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A. (Eds.) Microbiología Agrícola: Hongos, Bacterias, Micro y Macrofauna, Control Biológico, Planta-Microorganismo. Trillas, Ciudad de México. pp.170-224.
- Díaz-Franco, A, Gálvez-López, D., Ortiz-Cháirez, F.E. 2015. Bioinoculación y fertilización química reducida asociadas con el crecimiento de planta y productividad de sorgo. *Rev. Int. Cont. Amb.* 31(3):245-252.
- DOF. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. 31/12/2002.
- Egesel, C.Ö., Kahrıman, F. 2012. Determination of quality parameters in maize grain by NIR reflectance spectroscopy. *Tar. Bil. Der.* 18(1):31-42.
- Elizondo, J., Boschini, C. 2001. Efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento y calidad del forraje de maíz. *Agro. Mesoamer.* 12(2):181-187.
- Ferrera, C.R., Alarcón A. 2001. La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. *Ciencia Ergo Sum* 8(2):175-183.
- FIRA. 2016. Panorama Agroalimentario. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. Maíz 2016. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). México. 40p.
- García-Olivares, JG., Mendoza-Herrera, A., Mayek-Pérez, N. 2012. Efecto de *Azospirillum brasilense* en el rendimiento del maíz en el norte de Tamaulipas, México. *Univ. Ciencia Tróp. Húm.* 28(1):79-84.
- Hegazi, A., Mostafa, S., Ahmed, H. 2010. Influence of different cyanobacterial application methods on growth and seed production of common bean under various levels of mineral nitrogen fertilization. *Nature and Science* 8(11):183-194.
- Hernández, G.S. 2010. Importancia de la fibra en la alimentación de los bovinos. Tesis de Licenciatura (Medicina Veterinaria y Zootecnia). Facultad de Medicina

- Veterinaria y Zootecnia. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich. México. 55p.
- Holguin, G., Bashan, Y. Puente, E., Carrillo, A., Bethlenfalvay, G., Rojas, A., Vázquez, P., Toledo, G., Bacilio, J.M., Glick, B.R., González, B.L., Lebsky, V., Moreno, M., Hernández, J.P. 2003. Promoción del crecimiento en plantas por bacterias de la rizosfera. *Agr. Téc. Méx.* 29:201-211.
- Irizar, G.M.B., Vargas, V.P., Garza, G.D., Tut y Couoh, C., Rojas, M.I., Trujillo, C.A., García, S.R., Aguirre, M.D., Martínez, G.J.C., Alvarado, M.S., Grageda, C.O., Valero, G.J., Aguirre, M.J.F. 2003. Respuesta de cultivos agrícolas los biofertilizantes en la región central de México. *Agr. Téc. Méx.* 29(2):213-225.
- Jaimes-Cruz, L.J., Correa-Cardona H.J. 2016. Balance de nitrógeno, fósforo y potasio en vacas Holstein pastando praderas de kikuyo (*Cenchrus clandestinus*) en el norte de Antioquia. *Rev. CES Med. Zootec.* 11(2):18-41.
- Khadatara, S., Suryawanshi, D.S. 2016. Isolation blue green algae from maize fields of Mohol Tahasil in Solapur. *IJSR* 5(6):1597-1599.
- Larqué-Saavedra, B.S., Limón-Ortega, A., Irizar-Garza, M.B.G., Díaz-Valasis, M. 2017. Fertilización química del maíz, su impacto en el rendimiento y en los costos de producción. Folleto técnico No. 2. SAGARPA-INIFAP. Centro de Investigación Regional Centro. Texcoco, Estado de México. 36p.
- LG. 2018. Limagrain Ibérica. Apuntes técnicos. Estimación del potencial de rendimiento. *En línea:* <https://www.lgseeds.es/media/AT-05-Estimaci%C3%B3n-de-potencial-de-rendimiento.pdf>. Fecha de Consulta 23/03/2018.
- Maqubela, M.P., Mkeni, P.N.S., Malam Issa, O., Pardo, M.T., 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.
- Maya, L.J.B., Ramírez, D.J.L. 2002. Respuesta de híbridos de maíz a la aplicación de potasio en diferentes densidades de población. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(4):333-338.
- Miguel, M.A., Arellano J.L., García G., Miranda S., Mejía J.A., González F.V. 2004. Variedades criollas de maíz azul raza Chalqueño. Características agronómicas y calidad de semilla. *Rev. Fitotec. Mex.* 27(1):9-15.
- Mohan, A., Kumar, B., Nath, D. 2015. Cyanobacterial consortium in the improvement of maize crop. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 4(3):264-274.
- Morales-Avedaño, E., Martínez-Pérez, R., Suárez-Rodríguez, G. 2014. Aislamiento, cultivo, viabilidad y evaluación de un consorcio cianobacteria-microalga como acondicionador de suelos. *REMCA* 35(1 y 2):51-71.
- Mutlu, C., Arslan-Tontul, S., Candal, C., Kilic, O., Erbas, M. 2017. Physicochemical, thermal, and sensory properties of blue corn (*Zea Mays* L.). *JFDS* 83(1):53-59.
- Nankar, A., Holguin, F.O., Scott, M.P., Pratt, R.C. (2017). Grain and nutritional quality traits of Southwestern U.S. blue maize landraces. *Cereal Chem.* 94(6):950-955.
- Navarro, C.R.O., Gómez-Aldapa, C.A., Aguilar-Palazuelos, E., Delgado-Licon, E., Castro, R.J., Hernández-Ávila, J., Solís-Soto, A., Ochoa-Martínez, L.A., Medrano-Roldán, H. 2016. Blue corn (*Zea mays* L.) with added orange

- (*Citrus sinensis*) fruit bagasse: novel ingredients for extruded snacks. *CyTA J. Food* 14(2):349-358.
- Obid, S.A., Idris, A.E., Ahmed, B.E.A.M. 2016. Effect of bio-fertilizer on growth and yield of two maize (*Zea mays* L.) Cultivars at Shambat, Sudan. *Sch. J. Agric. Vet. Sci.* 3(4):313-317.
- Pandey, P.K., Saxena R.K., Bisen P.S. 2002. Immobilization results in sustained calcium Transport in *Nostoc calcicola* Bréb. *Curr. Microbiol.* 44:173-177.
- Prasad, R.C., Prasad, B.N. 2001. Cyanobacteria as a source biofertilizer for sustainable agriculture in Nepal. *J. Plant Sci. Bot. Orient.* 127-133.
- Rodríguez-Palacio, M.C., Álvarez-Hernández, S.H., Lozano-Ramírez, C. 2018. Manual de Ficología Aplicada. DCBS. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. México. 58p.
- SAGARPA-ASERCA-CIMA. 2018. Reporte del mercado de maíz. En línea: <http://online.anyflip.com/ppin/awxa/mobile/index.html#p=18>. Fecha de Consulta. 25/03/2019.
- Sahu, D., Priyadarshani, I., Rath, B. 2012. Cyanobacteria - as potential biofertilizer. *CIBTech J. Microbiol.* 1(2-3): 20-26.
- Salinas, M.Y., Cruz, C. F.J., Díaz, O.S.A., Castillo, G.F. 2012. Granos de maíces pigmentados de Chiapas, características físicas, contenido de antocianinas y valor nutracéutico. *Rev. Fitotec. Mex.* 35(1):33-41.
- Saurabh, P., Kumar, N. 2014. Algae as a soil conditioner. *IJETR* 2(4):68-70.
- Seyed, H.M., Ghassempour, A., Riahi H., Shariatmadari, Z., Khanjir, M. 2013. Endogenous auxins in plant growth-promoting Cyanobacteria—*Anabaena vaginicola* and *Nostoc calcicola*. *J. Appl. Phycol.* 25:379-386.
- Suquilanda, M. 2008. El Deterioro de los Suelos en Ecuador y la Producción Agrícola, XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Quito, Universidad Central del Ecuador. Santo Domingo 17-19 de noviembre. pp:1-56.
- Wu, S.C., Cao Z.H., Li, Z.G., Cheung, K.C., Wong, M.H. 2005. Effects of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: a greenhouse trial. *Geoderma* 125(1-2):155-156.