



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE CIENCIAS  
LICENCIATURA BIOLÓGIA



**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES BIOLÓGICAS Y ENZIMÁTICAS  
ADICIONANDO SUSTRATO DE ALGA EN EL SUELO DE CULTIVO  
DE MAÍZ (*Zea mays*) EN EL EJIDO DE SAN MARCOS  
YACHIHUACALTEPEC TOLUCA ESTADO DE MÉXICO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
BIÓLOGA**

**PRESENTA**

**LUCERO HERNÁNDEZ HUITRÓN**

**DIRECTORES**

**DRA. NADIA DE LA PORTILLA LÓPEZ**

**DR. PEDRO DEL AGUILA JUAREZ**

**El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México 2026**

## RESUMEN

A través de algunas propiedades químicas y bioquímicas del suelo, se evaluó el efecto de la adición del extracto de alga *Dunaliella salina* en un suelo cultivado con maíz (*Zea mays*) perteneciente al Ejido de San Marcos Yachihuacaltepec, Toluca, Estado de México. Se tuvieron dos tratamientos que consistieron en fertilizante urea (U) y urea mezclada con extracto del alga *Dunaliella salina* (UA) utilizando un diseño de parcelas con bloques alternados. Se aplicaron al suelo dos dosis del extracto de alga y fertilizante en diferentes etapas de crecimiento de la planta (al salir las primeras hojas y antes de la cosecha). Se realizaron análisis de parámetros químicos y bioquímicos del suelo que incluyeron pH, conductividad eléctrica y contenido de materia orgánica, así como actividad respiratoria y enzimática de la catalasa. Los resultados revelaron un pH ácido con un valor de 4.85 y una conductividad eléctrica baja de 0.17 dS/cm, esta última se encuentra por debajo del umbral de 3 dS/cm establecido por la NOM-021-RECNAT-2000 lo que indica efectos despreciables de salinidad. El contenido de materia orgánica fue de clase medio de acuerdo con el valor obtenido que fue de 3.20 %. En cuanto a la actividad respiratoria, 22 días después de la aplicación de los tratamientos se observó un aumento en la producción de CO<sub>2</sub> registrando para el tratamiento UA 496.3 mg de CO<sub>2</sub> por cada 100 g de suelo y para U 345.7 mg de CO<sub>2</sub> por cada 100 g de suelo. A los 49 días después de la aplicación de los tratamientos del experimento, el

contenido de CO<sub>2</sub> disminuyó presentándose valores de 422.5 mg de CO<sub>2</sub> por cada 100 g de suelo para UA y 399.2 mg de CO<sub>2</sub> por cada 100 g de suelo para U. En cuanto a biomasa microbiana, inicialmente se reportó un valor de 540.2 µg/g para el tratamiento U y 397.3 µg/g para el tratamiento UA. En el tiempo final se tuvo un aumento de biomasa teniendo 839 µg/g para U y 1862.2 µg/g para UA. La actividad enzimática de la catalasa mostró diferencias entre los tratamientos y los tiempos. Al inicio, para UA fue de 0.220 mol de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por cada gramo de suelo por hora, en comparación con el tratamiento U que registró 0.107 mol de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por cada gramo de suelo por hora. Sin embargo, al final del proceso, la actividad enzimática fue mayor en U mostrando valores de 0.062 mol de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por cada gramo de suelo por hora en comparación con UA donde se obtuvo un valor de 0.318 mol de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por cada gramo de suelo por hora. Los resultados proporcionaron información relevante sobre cómo la adición de este extracto de alga puede influir en la salud del suelo y en el rendimiento de los cultivos de maíz en la región estudiada. De esta manera se sugiere la aplicación de una mezcla de extracto de alga y fertilizante para mejorar las propiedades del suelo y favorecer el crecimiento del maíz.

## ABSTRACT

Through some chemical and biochemical properties of the soil, the effect of the addition of *Dunaliella salina* seaweed extract was evaluated in a soil cultivated with corn (*Zea mays*) belonging to the Ejido de San Marcos Yachihuacaltepec, Toluca, State of Mexico. There were two treatments consisting of urea fertilizer (U) and urea mixed with *Dunaliella salina* algae extract (UA) using an alternating block plot design. Two doses of the seaweed extract and fertilizer were applied to the soil at different stages of plant growth. Chemical and biochemical parameters and biochemical and biochemical analyses were performed. Analyses of soil chemical and biochemical parameters were performed including pH, electrical conductivity and organic matter content as well as respiratory and catalase enzymatic activity. The results revealed an acid pH value of 4.85 and a low electrical conductivity of 0.17 dS/cm, the latter being below the 3 dS/cm threshold established by NOM-021-RECNAT-2000, indicating negligible salinity effects. The organic matter content was of medium class according to the value obtained, which was 3.20%. Regarding respiratory activity, initially an increase in CO<sub>2</sub> production was observed, registering for treatment UA 496.3 mg of CO<sub>2</sub> per 100 g of soil and for U 345.7 mg of CO<sub>2</sub> per 100 g of soil. At the end of the experiment, the CO<sub>2</sub> content decreased, presenting values of 422.5 mg of CO<sub>2</sub> per 100 g of soil per 100 g of soil. Regarding microbial biomass, initially a value of 540.2 µg/g was reported for the U treatment and 397.3 µg/g for the UA

treatment. In the final time there was an increase in biomass having 839  $\mu\text{g/g}$  for U and 1862.2  $\mu\text{g/g}$  for UA. The enzymatic activity of catalase showed differences between treatments and times. At the beginning, for UA it was 0.220 mol  $\text{H}_2\text{O}_2$  per gram of soil per hour, compared to treatment U which recorded 0.107 mol  $\text{H}_2\text{O}_2$  per gram of soil per hour. However, at the end of the process, the enzymatic activity was higher in U showing values of 0.062 mol of  $\text{H}_2\text{O}_2$  per gram of soil per hour compared to UA where a value of 0.318 mol of  $\text{H}_2\text{O}_2$  per gram of soil per hour was obtained. The results provided relevant information on how the addition of this seaweed extract can influence soil health and yield of corn crops in the region studied. Thus, the application of a mixture of algae extract and fertilizer is suggested to improve soil properties and favor corn growth.

# INDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	11
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	15
<b>2.1 Maíz</b> .....	15
2.1.1    Requerimientos nutricionales del cultivo de maíz .....	17
2.1.3    Taxonomía del maíz.....	22
<b>2.2 Suelo</b> .....	23
<b>2.3 Propiedades físicas del suelo</b> .....	26
2.3.1    Textura.....	26
<b>2.4 Propiedades químicas del suelo</b> .....	28
2.4.1    pH .....	29
2.4.2    Conductividad eléctrica (CE) .....	30
2.4.3    Materia orgánica (MO) .....	31
<b>2.5 Propiedades biológicas</b> .....	33
2.5.1    Respiración basal (RB) .....	35
2.5.2    Coeficiente metabólico ( $qCO_2$ ) .....	36
2.5.3    Carbono de la biomasa microbiana (CBM).....	37
<b>2.6 Actividades enzimáticas</b> .....	39

2.6.1	Catalasa.....	41
2.7	Fertilizantes.....	41
2.8	Biofertilizantes.....	45
2.9	Bioestimulantes.....	47
2.10	Algas.....	49
2.11	Microalgas.....	50
2.12	<i>Dunaliella salina</i> .....	52
2.13	Extracto de alga.....	54
2.14	Las algas como bioestimulantes.....	56
3.	JUSTIFICACIÓN.....	59
4.	HIPÓTESIS.....	60
5.	OBJETIVOS.....	61
5.1	General.....	61
5.2	Específicos.....	61
6.	MATERIALES Y MÉTODO.....	62
6.1	Zona de Estudio.....	62
6.1.1	Ubicación del sitio experimental.....	62
6.2	Diseño experimental.....	63
6.3	Muestreo del suelo de cultivo de maíz.....	64

6.4	Análisis de Laboratorio .....	65
6.4.1	Propiedades fisicoquímicas del suelo .....	65
6.4.2	Propiedades biológicas del suelo .....	66
6.5	Análisis estadístico .....	67
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	67
7.1	Propiedades fisicoquímicas .....	67
7.2	Actividad respiratoria .....	69
7.3	Carbono de la biomasa microbiana, actividad respiratoria y qCO <sub>2</sub> .....	72
7.4	Catalasa .....	75
8.	CONCLUSIONES .....	78
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	79

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Caracterización fisicoquímica del suelo..... 69

Tabla 2. Propiedades biológicas de un suelo cultivado con maíz después de 20 y 49 días de la aplicación de los tratamientos U (Urea) y U+A (Urea + Alga)..... 75

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Triángulo de texturas del suelo (Buol <i>et al.</i> , 2013). .....	28
Figura 2. Ventajas y desventajas de la Urea como fertilizante (Márquez, 2020)...	45
Figura 3. Diseño esquemático del sitio de muestreo con 8 cuadrantes para el cultivo de maíz. U= Urea al 100%; U + A= urea al 50% + alga al 50%. .....	63
Figura 6. Actividad enzimática de la catalasa en un suelo cultivado con maíz después de 22 y 49 días de la aplicación de los tratamientos U (urea) y U+A (Urea + Alga).....	77

# 1. INTRODUCCIÓN

Los fertilizantes químicos son un factor crítico en el mantenimiento de la fertilidad del suelo y el aumento de los rendimientos en la agricultura moderna intensiva. Sin embargo, la extensa producción y el uso persistente de fertilizantes químicos han generado numerosos problemas (Zhang *et al.*, 2024).

La utilización prolongada de fertilizantes químicos no solo impacta negativamente en la calidad general del suelo, sino que también contribuye a una amplia gama de problemas ecológicos, incluyendo la lixiviación de nutrientes, la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, la eutrofización, las emisiones de gases de efecto invernadero y la disminución de la biodiversidad acuática (Zhang *et al.*, 2024).

Por lo tanto, se ha vuelto imperativo utilizar fertilizantes orgánicos y biofertilizantes para abordar los desafíos ambientales asociados con el uso de fertilizantes químicos en la agricultura (Zhang *et al.*, 2024).

Aunado a la problemática ambiental por parte de los fertilizantes químicos, en donde México es uno de los principales países consumidores de maíz (*Zea mays L.*) a nivel mundial, ya que éste es la base de su alimentación al ser el cultivo más producido y ocupar el cuarto lugar como productor en el mundo (Luna *et al.*, 2012).

Desde el punto de vista alimentario, económico, político y social, este grano se produce en dos ciclos agrícolas: primavera–verano y otoño–invierno, bajo diversas

condiciones agroclimáticas de humedad: seco (temporal), punta de riego y riego (González y Ávila, 2014).

La producción de maíz en condiciones de cultivo temporal constituye una de las principales actividades del sector rural, dado su significativa importancia económica y social. Este cultivo abarca más de 8 millones de hectáreas, lo que representa el 39% de la superficie agrícola nacional y el 63% de la superficie sembrada con granos y oleaginosas. Además, contribuye con el 8% del producto interno de la agricultura y es el cultivo que emplea la mayor cantidad de mano de obra. Sin embargo, a pesar de su relevancia, México ha experimentado un aumento en las importaciones de maíz en años recientes (Luna *et al.*, 2012).

En 2006 se importaron 8 millones de toneladas de grano de maíz, cifra que se elevó a 10 millones de toneladas en 2010, situando a este alimento a la cabeza de las importaciones de productos agrícolas mexicanos (Uzcanga *et al.*, 2015).

Durante varios años, los agricultores han optado por el uso de fertilizantes para mejorar el crecimiento de los cultivos y aumentar su producción. Sin embargo, el empleo de agroquímicos en la agricultura convencional ha acarreado una serie de efectos negativos, tales como erosión del suelo, disminución de su fertilidad, agotamiento de los nutrientes, salinización y alcalinización, contaminación de los sistemas de agua, reducción de la biodiversidad agrícola y de los recursos

genéticos, eliminación de los enemigos naturales, resurgimiento de plagas, desarrollo de resistencia genética a los plaguicidas y alteración de los mecanismos de control natural (Altieri *et al.*, 2000).

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del suelo agrícola se ven significativamente influenciadas por las prácticas de campo, que incluyen los métodos de fertilización, riego y cultivo (Li *et al.*, 2017).

Esta realidad ha impulsado el surgimiento de la agricultura alternativa, la cual hace uso de biofertilizantes preparados a partir de microorganismos aplicados al suelo y/o a las plantas. El propósito principal de estos biofertilizantes es reemplazar parcial o totalmente la fertilización sintética, reducir la contaminación derivada de los agroquímicos y brindar al suelo un descanso frente a la exposición a productos químicos agrícolas (Armenta *et al.*, 2010).

Hoy en día, el cultivo de maíz demanda un enfoque más sustentable que incluya el uso de fertilizantes orgánicos en el suelo, dado que estos promueven el crecimiento del cultivo y aumentan su rendimiento (Sayed *et al.*, 2015).

El empleo de biofertilizantes en cultivos básicos ha demostrado ser eficaz, ya que favorece la velocidad de absorción de nutrientes por parte de las plantas, tanto directamente a través de las raíces como al hacer más eficiente su absorción (Zermeño *et al.*, 2015).

Además de los biofertilizantes, otra opción para los cultivos son los bioestimulantes, cuyo uso en la agricultura está siendo cada vez más frecuente debido a la demanda nutricional de los cultivos de alto rendimiento. El propósito principal de los bioestimulantes es suplir los requerimientos nutricionales de las plantas, ya sea activando o retardando procesos fisiológicos específicos, principalmente relacionados con el crecimiento de las raíces, ápices foliares y yemas, o para contrarrestar las demandas energéticas (Hurtado *et al.*, 2019).

Estos productos varían en su composición, pero comparten la característica de contener principios activos que actúan sobre la fisiología de las plantas, promoviendo su desarrollo y mejorando su productividad, así como la calidad de los frutos. Además, contribuyen a aumentar la resistencia de las especies vegetales frente a diversas enfermedades (Hurtado *et al.*, 2019).

La incorporación de bioestimulantes como los extractos de microalgas ha demostrado favorecer la mejora en el rendimiento y la calidad de la cosecha en diversos cultivos. Esto se debe a que estos bioestimulantes están asociados con un aumento en la tasa de fotosíntesis en las hojas de las plantas, lo que resulta en una mayor captación de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Zermeño *et al.*, 2015).

Además, la aplicación de microalgas en los cultivos beneficia el contenido nutricional del producto al mejorar su composición química, gracias a una mayor absorción de los nutrientes por parte de las plantas (Díaz *et al.*, 2009).

Por lo que el objetivo de este estudio fue investigar el efecto de una mezcla compuesta por un bioestimulante (extracto de la microalga *Dunaliella salina*) y un fertilizante químico evaluando las propiedades biológicas de un suelo cultivado con maíz como una alternativa adicional a los fertilizantes convencionales, con el fin de beneficiar tanto al cultivo como al suelo.

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1 Maíz**

En México, el maíz (*Zea mays L.*) es un cultivo básico para la alimentación humana y animal, su aportación es de 32.8% del valor de la producción del sector agrícola nacional, ocupando el primer lugar en superficie cultivada. A pesar de su importancia sociocultural a escala nacional, el proceso de producción fundamentado en los principios de la agricultura campesina atraviesa desde hace algunas décadas una difícil situación, debido principalmente al incremento del costo de los insumos, en especial, el de los fertilizantes químicos, los cuales representan entre el 40 y 50 % de los costos totales de producción (Martínez *et al.*, 2018).

El maíz ocupa una posición central en la alimentación, siendo considerado un elemento estratégico para la soberanía y seguridad alimentaria en México. Su importancia va más allá de su utilidad como alimento, ya que tiene diversos usos y valores socioculturales, especialmente en el medio rural (González *et al.*, 2016).

Este cereal, domesticado y venerado por las culturas prehispánicas, continúa siendo la piedra angular de la alimentación mexicana. En el país, el maíz se consume de diversas formas, incluyendo elotes, tlaxcales, tamales y bebidas fermentadas, siendo la tortilla su presentación más predominante (González *et al.*, 2016).

El maíz se cultiva en dos ciclos agrícolas, primavera-verano y otoño-invierno, bajo diferentes condiciones agroclimáticas de humedad, que incluyen secano (temporal), punta de riego y riego. Desde una perspectiva económica, el maíz se siembra en más de 8 millones de hectáreas, lo que representa el 39% de la superficie agrícola nacional y el 63% de la superficie sembrada con granos y oleaginosas. Además, contribuye con el 8% del producto interno de la agricultura y es el cultivo que emplea la mayor cantidad de mano de obra (Luna *et al.*, 2012).

A nivel global, México ocupa entre el quinto y el séptimo lugar como productor de maíz; sin embargo, se sitúa como el tercer país importador de este cereal para satisfacer la demanda interna. Aproximadamente 35% de la superficie cultivable en

el país se destina a la producción de maíz; sin embargo, debido a las temperaturas más elevadas atribuidas al calentamiento global, el rendimiento global del maíz se ha reducido en un 3.8%, lo que equivale a aproximadamente una quinta parte de las reservas mundiales actuales (González *et al.*, 2016).

### 2.1.1 Requerimientos nutricionales del cultivo de maíz

Los nutrientes del suelo son generalmente limitantes para la productividad de los cultivos, de modo que el de sus requerimientos y dinámicas de acumulación es clave para lograr altos rendimientos con un uso eficiente de insumos (Álvarez, 2015)

Entre los elementos minerales esenciales, el nitrógeno (N) es el que con más frecuencia limita el crecimiento y el rendimiento del maíz. Esta condición ocurre porque las plantas requieren cantidades relativamente grandes de N (de 1.5 a 3.5% de peso seco de la planta) y porque la mayoría de los suelos no tienen suficiente N en forma disponible para mantener los niveles deseados de producción (Below, 2002).

La planta de maíz requiere nitrógeno (N) a lo largo de todo su ciclo de crecimiento, ya que este elemento desempeña un papel crucial como promotor del crecimiento, facilita la fotosíntesis y nutre a la planta. Un cultivo bien fertilizado con nitrógeno

tiende a producir mejores rendimientos. Durante los primeros 20 días de desarrollo de la planta, el nitrógeno y el potasio (K) son absorbidos en cantidades reducidas. En este período inicial, el nitrógeno se utiliza para sintetizar aminoácidos, los cuales son los bloques de construcción de las proteínas que componen las células y son componentes esenciales del ADN (Díaz, 2019).

La absorción de nitrógeno por la planta de maíz ocurre en tres fases distintas: la primera fase se extiende desde la germinación hasta antes de la aparición de las barbas o inflorescencias femeninas; la segunda fase comienza cuando aparecen las dos primeras hojas (V2); y la tercera fase, que marca el final de este período, se completa alrededor del 10% de las necesidades totales de nitrógeno (Díaz, 2019).

El crecimiento del cultivo de maíz está estrechamente ligado a la eficiencia en la captación de la radiación solar incidente y su posterior conversión en materia seca. En condiciones de baja disponibilidad de nitrógeno, el crecimiento se ve afectado debido a una menor capacidad para interceptar la radiación solar incidente. Esto se debe a una reducción en el área foliar, causada por hojas más pequeñas y una senescencia prematura. Las deficiencias de nitrógeno no son fácilmente detectables en las primeras etapas del ciclo del cultivo, pero los síntomas graves pueden aparecer a partir de la formación de seis o siete hojas (Álvarez, 2015).

El estrés por falta de nitrógeno ocasiona un cambio en el color de las hojas, pasando de verde claro a amarillento, debido a la disminución en el contenido de clorofila y la senescencia prematura. Estas deficiencias comienzan en las hojas más bajas, ya que el nitrógeno es un elemento móvil en la planta. El amarillamiento avanza desde la punta hacia la base de la hoja, adoptando una forma característica de "V" invertida (Álvarez, 2015).

Después del nitrógeno, el fósforo (P) es el segundo elemento más importante para el crecimiento de las plantas, la producción de cultivos y su calidad (Cordell *et al.*, 2009). El fósforo desempeña un papel fundamental en una serie de procesos vitales para las plantas, incluyendo la fotosíntesis, respiración, almacenamiento y transferencia de energía, división celular, alargamiento celular, entre otros (Díaz, 2019).

Además, promueve la formación temprana y el crecimiento de las raíces, siendo esencial para la formación de semillas, cuya concentración de fósforo es más alta que en cualquier otra parte de la planta madura (Díaz, 2019).

En condiciones de deficiencia de fósforo, el área foliar es reducida, al igual que la tasa de expansión de las hojas. Las deficiencias de fósforo pueden manifestarse mediante tonalidades moradas a púrpuras en hojas y tallos, comenzando por las

hojas basales. La relación entre el fósforo y los contenidos de clorofila explica los tonos verdes más oscuros observados en plantas deficientes (Álvarez, 2015).

Un cuarto nutriente crucial para el cultivo de maíz es el potasio, altamente demandado por la planta. Su mayor absorción por las raíces ocurre durante el primer mes de cultivo y desempeña un papel vital en la regulación de funciones en la planta, concentrándose en tejidos jóvenes en pleno crecimiento, mientras que las hojas más viejas contienen menos potasio. Además, participa en la fotosíntesis, promoviendo la síntesis de carbohidratos; los síntomas de deficiencia de potasio incluyen una reducción significativa del crecimiento, amarillamiento de los márgenes de las hojas que pueden llegar a secarse, especialmente en las hojas más viejas. En algunos casos, pueden aparecer manchas en las hojas y los tallos pueden volverse débiles. En general, la planta muestra menor resistencia y vigor, lo que afecta la calidad y la conservación del producto final (Díaz, 2019).

Los micronutrientes son elementos que las plantas absorben en cantidades mínimas, medidas en miligramos o microgramos por litro de solución nutritiva. A pesar de su baja concentración, desempeñan un papel esencial en diversas reacciones bioquímicas dentro de la planta. Entre los micronutrientes vegetales más relevantes se encuentran el hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), boro (B) y molibdeno (Mo) (Díaz, 2019).

Aunque también se consideran micronutrientes el níquel (Ni) y el cobalto (Co), su importancia universal aún no ha sido confirmado. Por otro lado, elementos como el cromo (Cr), vanadio (Va), silicio (Si), flúor (F) e yodo (I) son cruciales únicamente para ciertos cultivos específicos, y no pueden considerarse esenciales hasta que su relevancia sea demostrada para todos los cultivos (Ratto, 2014).

El zinc (Zn) se posiciona como el quinto elemento más importante para la nutrición del maíz, después del nitrógeno, fósforo, potasio y azufre. La insuficiencia de zinc puede afectar las funciones fisiológicas de manera significativa, provocando alteraciones en el crecimiento, especialmente en el maíz, una especie altamente vulnerable a su deficiencia. La falta de zinc reduce el crecimiento de las plantas, dando lugar a entrenudos cortos. Además, las hojas suelen mostrar clorosis intervenal, es decir, una coloración amarillenta anormal que sigue el patrón de las nervaduras (Selva, 2011; Álvarez 2015).

### 2.1.2 Clasificación Morfológica

El maíz es una planta anual de la familia de las gramíneas, caracterizada por tener raíces fasciculadas robustas que le proporcionan alimentación y anclaje en el suelo. Además, se refuerza con la presencia de raíces adventicias. Su tallo es erecto y

puede alcanzar una altura de hasta 4 metros, con una apariencia similar a la caña de azúcar. Las hojas, que son alternas y tienen nervaduras paralelas, se distribuyen en un total de 15 y están provistas de una vaina que nace de cada nudo. El maíz es una planta monoica, lo que significa que presenta flores tanto masculinas como femeninas. Las flores masculinas se encuentran ubicadas en el ápice de la planta en forma de panícula, mientras que las flores femeninas, que son consideradas como futuras mazorcas, se sitúan en la mitad de la planta (Álvarez, 2015).

### 2.1.3 Taxonomía del maíz

Al principio, los taxónomos clasificaron los géneros *Zea* y *Euchlaena*, como dos géneros separados, sin embargo, debido al estudio realizado por Reeves y Mangelsdorf en 1942 se los considera como un único género, basándose en la compatibilidad entre esos grupos de plantas y los estudios citogenéticos. Entre las Maydeas orientales existen diversos géneros como *Schleracne*, *Polytoca*, *Chionachne*, *Trilobachne* y *Coix*, siendo este último el único que tiene cierta importancia económica en el sudeste de Asia. En general, solo *Zea mays* se considera como una especie de gran importancia económica dentro de las Maydeas (PALIWAL, 2001).

Su clasificación taxonómica está bien estudiada (GBIF, 2013; Guacho, 2014; Sánchez, 2015):

**Reino** Plantae

**División** Magnoliophyta Cronquist, Takhtajan y W.Zimmermann, 1966.

**Clase** Liliopsida

**Orden** Poales Small 1903

**Familia** Poaceae Barnhar

**Género** *Zea* Linnaeus, 1753

**Especie:** *Zea Mays*

## 2.2 Suelo

La síntesis del proceso de formación del suelo destaca su naturaleza como un sistema esencial y complejo, estructurado a partir de una combinación de materia orgánica, mineral y nutriente. Este proceso implica una serie de cambios físicos, químicos y biológicos en la roca madre. Los cambios físicos incluyen la reducción del tamaño de las partículas sin alterar su composición, mientras que los cambios químicos resultan de la separación de las partículas minerales de las rocas, su alteración o destrucción, y la resistencia a compuestos sólidos estables. Ambos tipos de cambios están influenciados por factores ambientales como la acción del

agua, la temperatura, el oxígeno, el dióxido de carbono y los compuestos orgánicos (García *et al.*, 2012).

En resumen, el suelo se forma a través de un proceso dinámico que involucra interacciones complejas entre diversos factores físicos, químicos y biológicos, siendo esencial para sustentar la vida vegetal y microbiana en el ecosistema terrestre (García *et al.*, 2012).

Los cambios biológicos en el suelo son llevados a cabo por una diversa comunidad de organismos que lo habitan, incluyendo plantas, invertebrados, artrópodos, anélidos, nematodos, moluscos, protozoos, bacterias, actinomicetos, hongos y algas. Estos organismos desempeñan varias funciones clave, como la degradación y aporte de materia orgánica, la producción de dióxido de carbono a través de la respiración, la influencia en la movilidad de los ciclos biogeoquímicos de los elementos, y efectos mecánicos como el fraccionamiento de las rocas por las raíces de las plantas, entre otros (García *et al.*, 2012).

En conjunto, esta comunidad biológica juega un papel fundamental en la formación y la salud del suelo, contribuyendo a su fertilidad y sustentando los ciclos vitales en los ecosistemas terrestres (García *et al.*, 2012).

Entre las funciones del suelo (pero no solo se limitan a ello) se incluyen (Paz Ferreiro, 2012):

- Regular procesos bióticos, incluyendo los aportes de agua y nutrientes minerales para construir la biomasa que será luego utilizada para iniciar una nueva cadena trófica.
- Construir una interfase entre la biósfera y la geósfera manteniendo, regulando y controlando algunos flujos y el cambio de sustancias.
- Regular el intercambio de gases entre la atmósfera y la fase porosa del suelo por absorción de O<sub>2</sub>, liberación de CO<sub>2</sub> y otros gases tales como CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> y NO.
- Actúa como redistribuidor de algunos de los flujos del ciclo hidrológico, transformando la precipitación e infiltración, escurrimiento superficial y subsuperficial.
- Generar un manto específico y estratificado de la superficie de la tierra protegiéndola de impactos destructivos.

El suelo constituye uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta, ya que es la base fundamental para la explotación agropecuaria y forestal. La producción de alimentos depende en un alto porcentaje del uso que se les dé a los suelos (García *et al.*, 2012).

## 2.3 Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo son aquellas que afectan la capacidad del suelo para interactuar con el agua y las raíces de las plantas, así como su capacidad para permitir el movimiento del agua a través del perfil del suelo. Estas propiedades están relacionadas con la disposición de las partículas del suelo y los poros dentro de él (Bautista *et al.*, 2004).

Algunas de estas propiedades incluyen la estructura del suelo, la densidad aparente, la estabilidad de los agregados, la capacidad de infiltración, la profundidad del suelo, la capacidad de retención de agua y la conductividad hidráulica saturada. Estas características físicas son fundamentales para comprender la capacidad del suelo para sustentar el crecimiento de las plantas y la salud del ecosistema en general (Bautista *et al.*, 2004).

### 2.3.1 Textura

Se define a la textura del suelo como: la proporción (en porcentaje de peso) de las partículas menores a 2 mm de diámetro (arena, arcilla y limo) existentes en los horizontes del suelo (Gisbert *et al.*, 2010).

En edafología las partículas de un suelo se clasifican en elementos gruesos (tamaño de diámetro superior a 2 mm) y elementos finos (tamaño inferior a 2 mm). Estos últimos son los utilizados para definir la textura de un suelo (Gisbert *et al.*, 2010).

Siguiendo la terminología establecida por la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América), se tienen las siguientes clases de partículas inferiores a 2 mm de diámetro (Gisbert *et al.*, 2010):

Arena  $2 \text{ mm} > \emptyset > 0,05 \text{ mm}$

Limo  $0,05 \text{ mm} > \emptyset > 0,002 \text{ mm}$

Arcilla  $\emptyset < 0.002 \text{ mm}$

Existen 2 métodos para determinar la textura de un suelo, sea cual sea el que se utilice la finalidad de ambos métodos es conocer la clase textural del horizonte, la cual se obtiene mediante los porcentajes de cada una de las clases de partículas (arena, limo y arcilla) conocidas, las cuales se encuentran en el diagrama triangular de la USDA (Figura 1) (Gisbert *et al.*, 2010).

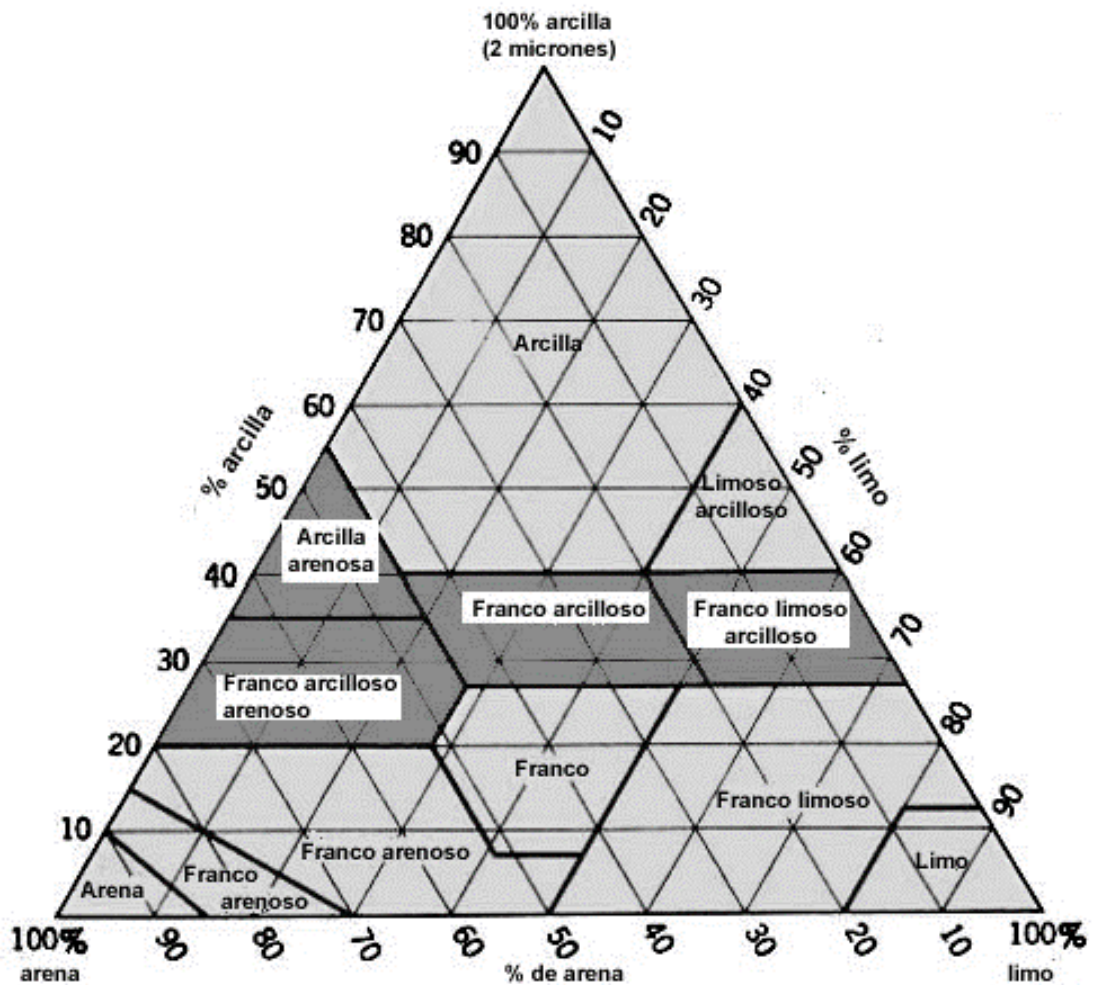


Figura 1. Triángulo de texturas del suelo (Buol *et al.*, 2013)

## 2.4 Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo son fundamentales para entender las interacciones entre el suelo, las plantas y los microorganismos, así como para evaluar la calidad del agua y la capacidad del suelo para mantener un equilibrio adecuado. Estas propiedades incluyen el pH del suelo, la conductividad eléctrica, el

contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, la capacidad de adsorción de fosfatos y otros nutrientes, así como el contenido total de carbono orgánico y carbono orgánico lábil. Estos parámetros químicos son indicadores importantes de la fertilidad y salud del suelo, y afectan la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas y otros organismos del suelo (Bautista *et al.*, 2004).

#### 2.4.1 pH

El pH es una propiedad química que mide el grado de acidez o alcalinidad de las soluciones acuosas. Por definición se considera que el pH es el logaritmo negativo de la actividad de los protones ( $H^+$ ) en una solución acuosa. En los suelos el pH es una propiedad química de gran importancia ya que indica que tan ácida o alcalina es la solución del suelo, que es de donde las raíces y los microorganismos toman sus nutrientes (Osorio, 2012)

Considerado como un indicador clave de las propiedades químicas del suelo, esta medida del hidrógeno disociado ( $H^+$ ) en la solución del suelo directamente impacta en su acidez y alcalinidad, influenciando una amplia variedad en las condiciones del suelo y a su vez, esta propiedad puede verse afectada por procesos tales como uso y deposición ácida; además, puede perturbar los procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en el suelo (Cheng *et al.*, 2013; Sharma *et al.*, 2014).

Un exceso de acidez o alcalinidad cambia los nutrientes disponibles y provoca un desequilibrio de elementos presentes en las plantas (Mao *et al.*, 2014). El pH, tiene una gran influencia en la disponibilidad relativa de los nutrientes en las plantas; condiciones ligeramente ácidas generalmente se consideran óptimas para la disponibilidad de macro y micronutrientes (Sharma *et al.*, 2014).

En general el pH óptimo de los suelos agrícolas debe de encontrarse entre 6.5 y 7.5 para obtener mejores rendimientos y una mayor productividad (Ibarra *et al.*, 2009).

#### 2.4.2 Conductividad eléctrica (CE)

Es el parámetro más utilizado para describir la salinidad del medio edáfico, se caracteriza por estimar la concentración de iones en el suelo y consiste predominantemente en los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ . La CE generalmente se expresa en dS/m (1dS/m aproximadamente equivalente a 10meq/L) (Friedman, 2005; He *et al.*, 2012).

Para suelos salinos, se encuentra ampliamente relacionada con la concentración de sal, para suelos no salinos, es una herramienta muy valiosa que proporciona información sobre la evaluación de la calidad del suelo y en aplicaciones agrícolas precisas debido a que es principalmente una función de la textura del suelo,

contenido de agua, cantidad de materia orgánica, porosidad del suelo, densidad aparente y capacidad de intercambio catiónico (Hu *et al.*, 2014; Naderi-Boldaji *et al.*, 2014).

La salinidad de los suelos es un problema que restringe las actividades agrícolas, sin importar si son grandes o pequeñas extensiones de tierra, ya que provoca la disminución de la capacidad productiva de los suelos y rendimiento de los cultivos, dando como resultados una baja calidad en el medio edáfico y ecológico (Mata *et al.*, 2014).

La salinización y sodificación de los suelos agrícolas son consecuencias directas de prácticas agrícolas inapropiadas y una gestión deficiente del riego. Estas prácticas permiten que las sales se movilicen dentro del suelo y sean transportadas a nuevas áreas. La acumulación de sales compromete la calidad del suelo y reduce su capacidad para sustentar cultivos saludables y productivos (Lamz y González, 2013).

### 2.4.3 Materia orgánica (MO)

Se define como una combinación de compuestos orgánicos que típicamente contienen carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), y a menudo nitrógeno (N), fósforo (P), y azufre (S), los cuales provienen de la descomposición de residuos

orgánicos en el suelo. Estos materiales son incorporados al suelo a través de prácticas agronómicas, lo que incluye restos de plantas y animales, exudados de raíces, organismos del suelo y sus productos metabólicos, así como también aportes externos de materia orgánica, como estiércol y compost (Córdova *et al.*, 2014).

Es un componente vital en los suelos, constituyendo entre el 95 y el 99% del peso seco de los seres vivos; sin embargo, su presencia en el suelo suele ser limitada, siendo raro encontrarla por encima del 2%. Se considera que un nivel deseable de materia orgánica en suelos arcillosos medios es del 2%, pudiendo variar desde un mínimo de 1.65% en suelos pesados hasta un máximo de 2.5% en suelos arenosos. La MO no solo contiene aproximadamente el 5% del nitrógeno total, sino que también proporciona otros elementos esenciales para las plantas, como fósforo, magnesio, calcio, azufre y micronutrientes (Julca *et al.*, 2006).

Desempeña un papel crucial en una variedad de procesos del suelo, incluida la formación y estabilización de agregados, el ciclo biogeoquímico de nutrientes y el equilibrio de agua y energía. Su capacidad para retener la humedad, influir en la densidad aparente y la estructura del suelo y regular los equilibrios de óxido-reducción de diversos elementos químicos son aspectos fundamentales. Es particularmente destacable su función como regulador en las transformaciones del ciclo del nitrógeno. Además, la MO participa en el transporte de agua y solutos,

incluida la adsorción y desorción de pesticidas, hidrocarburos aromáticos y óxidos, lo que subraya su importancia en múltiples aspectos del funcionamiento del suelo (Prieto *et al.*, 2014).

La cantidad de humus en el suelo está influenciada por diversos factores, como la incorporación de nuevos restos orgánicos y su velocidad de oxidación química y biológica, la tasa de descomposición de la materia orgánica existente, la textura del suelo, la aireación, la humedad y las condiciones climáticas. Las prácticas agrícolas, como el uso de fertilizantes minerales, pueden acelerar la descomposición de la materia orgánica en el suelo, lo que refleja un aumento en la actividad biológica y, en consecuencia, mejora la fertilidad y los rendimientos. La MO se considera un indicador crucial de la fertilidad y calidad del suelo, ya que afecta sus propiedades físicas, químicas y biológicas, y tiene un impacto directo en la productividad agrícola (Qiyong *et al.*, 2014; St. Luce *et al.*, 2014).

## **2.5 Propiedades biológicas**

La evaluación de las propiedades biológicas del suelo es fundamental para determinar su calidad, especialmente porque estas propiedades, junto con las actividades enzimáticas, son sensibles al estrés ambiental. Estas características biológicas del suelo están estrechamente relacionadas con la descomposición de la

materia orgánica derivada de residuos vegetales y animales, así como con el reciclaje de la misma. Los subproductos de esta actividad biológica tienen un impacto directo en las propiedades físicas y químicas del suelo. Por lo general, la evaluación se centra en la abundancia y los subproductos de organismos como bacterias, hongos, nematodos, lombrices, anélidos y artrópodos (Segueda, 2011).

Los parámetros como biomasa microbiana, respiración, coeficiente metabólico ( $q\text{CO}_2$ ) y actividades enzimáticas se consideran indicadores clave para evaluar cambios en la calidad del suelo. Esto se debe a que los microorganismos responsables de la descomposición y mineralización de la materia orgánica utilizan los compuestos presentes en los residuos como fuente de nutrientes y energía para su metabolismo y crecimiento (Fernandes *et al.*, 2005).

Los estudios centrados en las propiedades bioquímicas del suelo son altamente sensibles y pueden ofrecer información precisa y rápida sobre los cambios que ocurren en el suelo. A diferencia de las propiedades físicas y químicas, que cambian más lentamente y requieren muchos años para mostrar resultados significativos (Tejada y Benítez, 2020).

### 2.5.1 Respiración basal (RB)

Se define como la velocidad constante de la respiración en el suelo, que se origina a partir de la mineralización de la materia orgánica, y se estima a partir de la evolución del CO<sub>2</sub> o por medio de la captación de O<sub>2</sub>. Comprende tanto la respiración heterotrófica por microorganismos que descomponen los residuos orgánicos y las sustancias húmicas mineralizables, y la respiración autótrofa, que representa la producción de CO<sub>2</sub> asociada con el crecimiento y metabolismo de las raíces (Creamer *et al.*, 2014).

La medición de la RB ha sido ampliamente utilizada en diversos estudios de investigación, y tanto la respiración como la mineralización de la materia orgánica son consideradas como indicadores clave para evaluar los cambios en la calidad del suelo (Creamer *et al.*, 2014).

La respiración basal es el principal componente del ciclo del carbono en el suelo y su valor depende del tipo de ecosistema. Por lo general, el promedio de la respiración del suelo varía entre 1.4 y 2.6 µg C-CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> de suelo por hora. Esta medida refleja la cantidad de carbono potencialmente mineralizable en el suelo y representa la actividad global o energía consumida por el pool microbiano, lo que proporciona una estimación de la actividad descomponedora de los microorganismos del suelo (Paz-Ferreiro, 2006; Prolingheuer *et al.*, 2014).

### 2.5.2 Coeficiente metabólico ( $qCO_2$ )

La relación entre la respiración del suelo y la biomasa microbiana puede ser expresada como  $qCO_2$ . El cual es considerado como un indicador de la perturbación ambiental de la población microbiana (Selivanovskaya *et al.*, 2001).

El  $qCO_2$  relaciona la actividad microbiana a través de la respiración microbiana y la cantidad de biomasa microbiana por unidad de tiempo; éste fue descrito por primera vez por Anderson y Domsch (1990) como un índice sencillo de la actividad biológica del suelo; está basado en la hipótesis de la optimización energética de los ecosistemas, derivada de la teoría ecológica de Odum sobre la sucesión de los ecosistemas y la eficiencia metabólica de la microflora edáfica. Así, en ecosistemas jóvenes (inmaduros) el valor de  $qCO_2$  debe ser elevado y es bajo al referirse a ecosistemas maduros; es decir, la relación entre la respiración y la biomasa total de un ecosistema debe disminuir progresivamente a medida que el ecosistema alcanza el estado de equilibrio o de estabilidad, salvo que las condiciones sean adversas para el buen funcionamiento del mismo (De la Portilla, 2021).

Se calcula a partir de la respiración basal y la biomasa microbiana del carbono y es una medida de la eficiencia en el uso del carbono por los microorganismos; valores

bajos de este parámetro indican un uso más eficiente del recurso (Pardo *et al.*, 2019).

### 2.5.3 Carbono de la biomasa microbiana (CBM)

Un componente crucial para evaluar y monitorear la evolución de áreas degradadas y los cambios inducidos por el manejo es el carbono de la biomasa microbiana (CBM). Esta biomasa se refiere al componente funcional de los microbiomas del suelo, siendo principalmente responsables de la descomposición de la materia orgánica y del reciclaje de nutrientes. En otras palabras, la biomasa microbiana del suelo constituye una medida del carbono contenido en el componente vivo de la materia orgánica, que incluye bacterias y hongos. Debido a su naturaleza, esta fracción es altamente susceptible a responder rápidamente a los efectos de perturbación o recuperación del suelo (Pérez *et al.*, 2020).

Este parámetro ha sido frecuentemente estudiado por su alta y rápida sensibilidad a los cambios que se producen en el sistema, y además porque es uno de los pocos que controla gran parte de los procesos que involucran la transformación y el ciclado de nutrientes, así como la macroagregación favoreciendo la retención de agua y la aireación del suelo, por lo tanto, su mantenimiento ha sido altamente favorable, principalmente en sistemas productivos conservacionistas (Pérez *et al.*, 2020).

La biomasa microbiana se caracteriza por ser la parte más activa en los procesos de transformación de la materia orgánica del suelo; además, es importante en el ciclo de nutrientes y su liberación, también es considerada como un indicador sensible y temprano ante el estrés que se produce en el suelo y estabilización de este (Gispert *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2014; Wen *et al.*, 2014).

La importancia de la determinación del carbono en la biomasa microbiana se debe al papel principal de los microorganismos del suelo en la retención como en la liberación de nutrientes y energía del sistema. Este parámetro ha sido empleado como bioindicador de los cambios en la materia orgánica del suelo, por representar un índice más sensible que el carbono orgánico total (Sotelo *et al.*, 2022).

Además, es importante mencionar que CBM es importante en el ciclo de nutrientes, ya que participa en los ciclos de C, N, y refleja el estado de la fertilidad del suelo debido a que los microorganismos presentes en el medio edáfico responden rápidamente a los factores de estrés ya que presentan ajustadas tasas de actividad; por lo tanto, puede ser útil para la evaluación de la calidad del suelo (Andrés *et al.*, 2011; Wen *et al.*, 2014).

Las alteraciones, como el descenso de la misma, parecen estar determinadas por propiedades de las comunidades microbianas, su tipología y actividad, así como por

las condiciones climáticas a las que se ve sometido el suelo, más que a sus características edáficas (Iglesias, 2008; Chen *et al.*, 2013).

## **2.6 Actividades enzimáticas**

Las enzimas en el suelo son proteínas cuyo papel es la transformación de energía ya que catalizan las reacciones químicas en los sistemas vivos, actúan sobre sustratos específicos transformándolos en productos necesarios para los ciclos biológicos minerales (Henríquez *et al.*, 2014; De la Portilla, 2021).

La mineralización de la materia orgánica es llevada a cabo por una gran comunidad de organismos del suelo que implica una amplia gama de procesos metabólicos mediados por actividades enzimáticas que favorecen la formación de compuestos orgánicos estables (Gispert *et al.*, 2013).

Los organismos y las plantas liberan enzimas al suelo por secreción y por lisis celular después de su muerte; un bajo porcentaje de estas proteínas quedan inmovilizadas y estabilizadas en interacción con los diferentes componentes de la

fase sólida del suelo, como las arcillas, moléculas orgánicas y complejos órganominerales (De la Portilla, 2021).

El crecimiento de las plantas se ve directamente beneficiado por los nutrientes liberados durante las reacciones catalizadas por enzimas, las cuales son secretadas por microorganismos y plantas en el suelo. Esta interacción estrecha entre la población microbiana y el ambiente del suelo es crucial, especialmente considerando que la actividad de las enzimas extracelulares desempeña un papel fundamental en las transformaciones de carbono, nitrógeno, fósforo y azufre, aspectos clave en los ciclos de nutrientes.

Por tanto, las enzimas han sido propuestas como indicadores sensibles para evaluar la calidad del suelo y sus propiedades fisicoquímicas. Diversas mediciones de actividades enzimáticas se han utilizado para establecer índices de fertilidad del suelo (De la Portilla, 2021).

La acción de las enzimas como catalizadores depende de factores como: pH, temperatura y la presencia (o ausencia) de inhibidores. El clima, el tipo de enmienda, las técnicas de cultivo, el tipo de cultivo y las propiedades edáficas también tienen un efecto en dichas reacciones (De la Portilla, 2021).

### 2.6.1 Catalasa

Es una enzima intracelular clasificada dentro de la familia de las oxidoreductasas. Su función principal radica en ser un componente crucial del sistema de defensa celular contra el estrés oxidativo, neutralizando el peróxido de hidrógeno para evitar daños celulares causados por especies reactivas de oxígeno. Esta enzima descompone el peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno molecular (Brown *et al.*, 2004)

La catalasa se encuentra presente en una amplia gama de organismos, incluyendo plantas, animales y microorganismos, y su actividad se relaciona estrechamente con organismos aeróbicos. Por lo tanto, se ha utilizado como un indicador de la fertilidad del suelo debido a su vínculo con la actividad biológica en dicho entorno (De la Portilla, 2021).

## 2.7 Fertilizantes

El crecimiento de la población mundial ha generado una creciente demanda por una mayor producción agrícola. Ante esta necesidad, existen dos opciones principales: expandir las áreas de cultivo o mejorar la fertilidad del suelo proporcionándole nutrientes adicionales de manera asimilable por las plantas. La segunda opción se logra mediante la aplicación racional de fertilizantes, los cuales han demostrado

incrementar los rendimientos de los cultivos de manera significativa. Además de aumentar la productividad, el uso adecuado de fertilizantes puede contribuir a mitigar la erosión del suelo al acelerar la cobertura vegetal y protegerlo de los agentes climáticos adversos (García *et al.*, 2014).

Según el Código Alimentario Español, los fertilizantes son sustancias añadidas al suelo o a las plantas con el propósito de promover su desarrollo. Estos productos, utilizados en agricultura o jardinería, tienen como función principal proporcionar nutrientes a las plantas para favorecer su crecimiento, aumentar su rendimiento y mejorar la calidad de las cosechas. Además, los fertilizantes pueden modificar la fertilidad del suelo o sus características físicas, químicas o biológicas de acuerdo a las necesidades específicas de los cultivos (García *et al.*, 2014).

Los minerales son el resultado de procesos de síntesis química o encontrarse en depósitos naturales. Principalmente, están compuestos por nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Cuando un mineral contiene un solo elemento, se le denomina mineral simple, mientras que aquellos que contienen más de un elemento se conocen como minerales compuestos (Guzmán, 2018).

El uso indiscriminado de fertilizantes químicos ha resultado en pérdidas de productividad en los suelos debido a prácticas agrícolas incorrectas. Estas prácticas conducen a la degradación de las propiedades biológicas, físicas y químicas del

suelo. Como consecuencia, los efectos negativos en el medio ambiente son innegables, ya que los productos químicos presentes en los fertilizantes, como los nitratos y fosfatos, contaminan los acuíferos y cuerpos de agua superficiales (Orozco *et al.*, 2016).

La labranza excesiva, la pérdida de cubiertas vegetales y el uso indiscriminado de fertilizantes y plaguicidas pueden inhibir la formación natural del humus en el suelo. Este escenario conduce a una disminución en la fertilidad del suelo, la cual puede intentar ser compensada mediante el uso de fertilizantes químicos o la aplicación de fertilizantes orgánicos (Guzmán, 2018).

En los últimos 50 años, la utilización de fertilizantes nitrogenados se ha elevado, alrededor de 20 veces y se pronostica que su utilización se intensifique a 180 millones de toneladas para el año 2030 (Márquez, 2020).

La urea se ha convertido en la forma principal de fertilizante nitrogenado a nivel mundial. Este compuesto, que puede encontrarse en la naturaleza o ser producido mediante una reacción química entre dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) a alta temperatura y presión, es valorado por su alto contenido de nitrógeno (N) del 46% y su costo económico en producción, transporte y aplicación directa en el campo (Mikkelsen, 2007).

Una ventaja significativa de la urea es su capacidad para ser absorbida por las plantas a través del follaje, gracias a su baja fitotoxicidad, alta solubilidad y naturaleza no polar. Esto facilita una gestión eficiente del nitrógeno al minimizar las pérdidas ambientales. Además, las células vegetales tienden a absorber rápidamente la urea aplicada foliarmente, donde se hidroliza en el citosol para su conversión en aminoácidos, que luego son transportados desde las hojas hacia otras partes de la planta. Este proceso de asimilación directa del nitrógeno de la urea optimiza la eficiencia fotosintética al evitar la pérdida de energía en la síntesis de productos intermedios (Trejo *et al.*, 2005).

Se menciona en la figura 2 las ventajas y desventajas que tiene la urea como fertilizante.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alta concentración de N, 46%	Perdidas de N, en forma de NH <sub>3</sub>
Alta solubilidad: incorporación rápida al suelo	Daño en la germinación por aplicación localizada, en suelos con poca humedad y altas temperaturas. El amoníaco puede dañar la germinación

Precio atractivo	Acidificación del suelo por uso continuo
------------------	---

**Figura 2.** Ventajas y desventajas de la Urea como fertilizante (Márquez, 2020).

## 2.8 Biofertilizantes

La definición del término "biofertilizante" es amplia y abarca una variedad de productos, que van desde microorganismos y abonos verdes hasta extractos de plantas. En resumen, los biofertilizantes son productos que contienen microorganismos que, al ser inoculados, pueden vivir asociados o en simbiosis con las plantas, contribuyendo a su nutrición y protección. Estos microorganismos se encuentran naturalmente en el suelo y comprenden diversos grupos, si bien su población puede ser afectada por el manejo del suelo y el uso excesivo de agroquímicos (Granada *et al.*, 2012).

Es importante destacar que, en principio, los biofertilizantes son menos costosos y más ecológicos que los fertilizantes químicos, y pueden influir en la absorción de nutrientes por parte de las plantas, como es el caso del fósforo (El-Sayed *et al.*, 2015).

La biofertilización es una tecnología en expansión que está vinculada con la inclusión de microorganismos al suelo, siendo de gran importancia para el desarrollo de cultivos obteniendo mayores rendimientos, inocuos, de mejor calidad fitosanitaria, y a su vez aumenta el contenido de materia orgánica del suelo (Orozco *et al.*, 2016).

El uso de biofertilizantes ha tomado cada vez más fuerza, ya que originan procesos rápidos, consumen poca energía, no contaminan el medio ambiente, incrementan la fertilidad del suelo y proporcionan protección frente a microorganismos fitopatógenos, al aportar microorganismos benéficos que ayudan a mantener un equilibrio ecológico por medio de la liberación de nutrientes inorgánicos aumentando la fertilidad de los suelos cultivados (Orozco *et al.*, 2016).

La sustentabilidad en la agricultura a largo plazo implica el uso eficiente de los recursos naturales. En este contexto, los biofertilizantes se destacan como una opción clave para reducir la dependencia de los fertilizantes químicos y mejorar la calidad de los recursos naturales. Estos productos ofrecen una alternativa económicamente viable y respetuosa con el medio ambiente para suministrar nutrientes a los cultivos, especialmente a través de biofertilizantes líquidos. Esta estrategia promueve prácticas agrícolas sostenibles, contrarrestando los impactos negativos de los métodos tradicionales y la Revolución Verde en la salud humana, animal y ambiental (Orozco *et al.*, 2016).

## 2.9 Bioestimulantes

En los últimos años, se han planteado diversas definiciones para los bioestimulantes. Una de ellas, propuesta por Saborío (2002), ofrece una visión amplia del término al describirlos como sustancias que, aunque no son nutrientes, pesticidas ni reguladores del crecimiento, tienen un efecto positivo en varios aspectos del ciclo de vida de las plantas. Esto incluye la germinación, el desarrollo vegetativo, la floración, el cuajado y el crecimiento de los frutos.

Además del concepto presentado anteriormente, los bioestimulantes se distinguen de los biofertilizantes por contener sustancias y/o microorganismos que tienen el potencial de estimular procesos naturales en el suelo o en las plantas, lo que resulta en una variedad de beneficios agrícolas. La composición de los bioestimulantes se ha categorizado ampliamente según grupos químicos como aminoácidos, quitosano, extractos de algas marinas, sustancias húmicas y otros agentes potencialmente bioactivos (Abbott *et al.*, 2018).

Entre los beneficios potenciales de los bioestimulantes se encuentran la reducción de enfermedades (por ejemplo, con quitosano), el aumento de la tolerancia al estrés (por ejemplo, con productos que contienen aminoácidos), el fortalecimiento de la estabilidad de los agregados del suelo (por ejemplo, con sustancias húmicas) y la mejora de la absorción de nutrientes (por ejemplo, con extractos de algas marinas) (Abbott *et al.*, 2018).

Uno de los principales mecanismos en los que se basa el funcionamiento de los bioestimulantes es el ahorro energético. Cuando se aplican bioestimulantes a base de aminoácidos, se proporcionan a la planta proteínas que promueven el ahorro de energía, ya que la planta no requiere sintetizarlas. Esto le permite dirigir su metabolismo hacia otros procesos como la floración, el cuajado y la producción de frutos. Este ahorro de energía se vuelve crucial cuando la planta enfrenta condiciones de estrés hídrico, heladas, ataques de plagas o enfermedades (Abbott *et al.*, 2018).

Los bioestimulantes son productos que se aplican a las plantas para mejorar la productividad y la calidad de estas. Suelen ser de origen natural, tales como extractos de algas, hidrolizados de proteínas y ácidos húmicos, que actúan sobre la fisiología de la planta, aunque también puede tratarse de inóculos microbianos. Su función no es suministrar nutrientes ni proteger la planta contra plagas y patógenos, sino modular las funciones de la planta de manera que se beneficie su nutrición, la tolerancia al estrés ambiental y la calidad de los productos (du Jardín, 2019).

Los biofertilizantes y bioestimulantes ofrecen un potencial para mejorar la producción y calidad de las cosechas. Se recomienda que los bioestimulantes se apliquen en las etapas del crecimiento del vegetal para aprovechar al máximo sus compuestos (Quintero *et al.*, 2018).

## 2.10 Algas

Son plantas talofitas, unicelulares o pluricelulares, que viven perfectamente en el agua, tanto dulce como marina y que en general contienen grandes cantidades de clorofila, en ocasiones otros pigmentos de colores variados, y es común encontrarlas en distintos ambientes y en lugares con poca luz a grandes profundidades (López, 2015).

Presentan un efecto positivo sobre la actividad biológica del suelo en la respiración y movilización del nitrógeno, ya que promueven la diversidad microbiana, creando así un medio ambiente adecuado para el crecimiento de la raíz (Zermeño *et al.*, 2015). También hidrolizan enzimáticamente los compuestos no solubles del suelo, desmineralizándolo, desintoxicándolo y desalinizándolo.

En los carbonatos libera el anhídrido carbónico, lo que sucede así mismo al coagular las arcillas silíceas, descompactándolo; todo, en forma paulatina, de esta manera se logra el mejoramiento físico, químico y biológico del suelo, haciendo del mismo un medio propicio para que las plantas se desarrollen (Canales, 1999).

La incorporación de algas al suelo incrementa las cosechas y favorece la calidad de los frutos básicamente porque se administra a los cultivos no sólo todos los macro y micro nutrimentos que requiere la planta, que junto con otras sustancias son similares a los reguladores de crecimiento. Dentro de los compuestos ya

identificados en las algas se tienen agentes quelatantes como ácidos algínicos, fúlvicos y manitol, así como vitaminas, cerca de 5000 enzimas y algunos compuestos biocidas que controlan algunas plagas y enfermedades de las plantas (Canales, 1999).

Hernández et al. (2018) enumeran varias algas empleadas como bioestimulantes en cultivos, pero no incluyen a *Dunaliella salina*. Esta omisión resalta la relevancia de investigar y experimentar con esta especie de alga para su potencial uso como bioestimulante.

## 2.11 Microalgas

Las microalgas son un grupo diverso de microorganismos fotosintéticos procariontes y eucariontes que pueden habitar una amplia variedad de condiciones ambientales. Han ganado atención en las últimas décadas debido a su capacidad para producir grandes cantidades de diversos biocombustibles e intermediarios químicos. Además, investigaciones recientes han revelado que las microalgas tienen el potencial de actuar como biofertilizantes orgánicos, mejorando la calidad y el rendimiento de los cultivos. Estos microorganismos pueden tener un contenido sustancial de nitrógeno (N), que varía entre 6 y 8 %, y de fósforo (P), que varía entre 1 y 3 %, en peso seco (Zhang *et al.*, 2024).

Además, la biomasa de microalgas cultivada durante el proceso de tratamiento puede ser utilizada para la producción de bioproductos como pigmentos, bioplásticos, biocombustibles o biogás. Se han realizado varios estudios sobre biofertilizantes, que van desde especies vegetales hasta microalgas cultivadas en numerosos tipos de aguas residuales. Estudios sobre la liberación de N de microalgas cultivadas en estiércol de vaca digerido anaeróbicamente. Descubrieron que después de 21 días, solo el 33% del N total se convirtió en N disponible para las plantas, lo que convierte a las microalgas en un fertilizante de liberación lenta cultivos (Alvarez-González *et al.*, 2023).

El estudio de microalgas cultivadas en aguas residuales de acuicultura como biofertilizante en cultivos de tomate. Obtuvieron un crecimiento comparable de las plantas e incluso un contenido de azúcar y carotenoides más altos en los tomates fertilizados con microalgas en comparación con aquellos fertilizados con un fertilizante orgánico comercial. Además, investigaciones recientes han revelado que las microalgas tienen el potencial de actuar como biofertilizantes orgánicos, mejorando la calidad y el rendimiento de los cultivos (Alvarez-González *et al.*, 2023).

El uso de microalgas como biofertilizantes también confiere numerosos beneficios ambientales. Especies de microalgas como las microalgas verdes y las cianobacterias pueden aumentar el contenido de carbono orgánico del suelo al secuestrar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico y utilizar el CO<sub>2</sub> a través de la

fotosíntesis para generar biomasa rica en nutrientes. Este proceso contribuye a reducir el efecto invernadero, el calentamiento global y el cambio climático.

Además, la biomasa microalgal puede capturar activamente otros gases de efecto invernadero, como el óxido nitroso, mejorando aún más el cambio climático. Las microalgas han despertado un enorme interés debido a que son microorganismos fotosintéticos que se caracterizan por su rápido crecimiento, las células se duplican en un periodo de 1 a 10 días y utilizan menos superficie para su cultivo (Zhang *et al.*, 2024).

### ***2.12 Dunaliella salina***

*Dunaliella salina* pertenece a un género de algas unicelulares de la familia Dunaliellaceae, es un alga verde unicelular de 8-25 micrones de longitud y de 5-15 micrones de ancho, se desplaza en el agua por medio de dos flagelos situados en la parte apical de la célula (López, 2008).

Contiene cloroplasto, pirenoide, núcleo, mitocondria, vacuolas pequeñas y aparato de Golgi, carece de una pared rígida, se reproducen por división longitudinal de la célula móvil o por fusión de dos células móviles para formar un cigoto, se desarrolla en depósitos de agua salada en zonas de condiciones climáticas rigurosas, siendo una especie que tolera la salinidad (López, 2008).

## Taxonomía de *Dunaliella salina*

Reino: Plantae

División: Chlorophyta

Clase: Chlorophyceae

Orden: Chlamydomonadales

Familia: Dunaliellaceae

Género: *Dunaliella*

Especie: *Dunaliella salina*

Las microalgas marinas están ampliamente distribuidas en lagos y mares interiores.

*D. salina*, un miembro halófilo del filo Chlorophyta, es una especie de interés creciente. Hasta ahora, la investigación se ha centrado en la capacidad de *D. salina* para producir compuestos de interés industrial, como carotenoides, lípidos, glicerol, proteínas y compuestos farmacéuticos. El potencial de *D. salina* no se limita a la generación de bioproductos. También se ha aplicado para recuperar nutrientes, metales pesados y para secuestrar dióxido de carbono (de Souza *et al.*, 2024).

### 2.13 Extracto de alga

Son materiales bioactivos naturales solubles en agua que promueven la germinación de semillas, incrementan el desarrollo y rendimiento de los cultivos. Los extractos de algas pueden ser utilizados como suplementos nutricionales, bioestimulantes o fertilizantes en la agricultura y horticultura, y se pueden aplicar vía foliar o directamente al suelo (Zermeño *et al.*, 2015).

Además, las algas, organismos similares a las plantas, pueden servir como alimento para una amplia gama de animales de acuicultura, domésticos y de granja. Además, la biomasa concentrada atribuida a moléculas de alto valor puede sintetizar productos beneficiosos como ácidos grasos, pigmentos y bioquímicos de isótopos estables. Los extractos de microalgas se utilizan comercialmente en productos cosméticos (por ejemplo, productos antienviejecimiento y reafirmantes para la piel) y colorantes alimentarios naturales (Kelin *et al.*, 2023).

Las microalgas pueden ser opciones prometedoras para capturar y fijar CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Además, debido a su necesidad continua de nutrientes para el crecimiento, las microalgas desempeñan un papel eficaz en la eliminación de nutrientes de las aguas residuales (Kelin *et al.*, 2023).

Las algas marinas se aplican en la agricultura tal cual, en forma de harina, extractos o polvos solubles. Si los derivados son elaborados en forma apropiada, los

organismos vivos que contienen se conservan en estado viable y se propagan por un tiempo donde se aplican potenciando su acción, lo que hace posible la aplicación de dosis muy bajas (Canales, 1999).

La aplicación de extractos de algas se considera únicamente en cultivos de riego y buen temporal, dado que las principales reacciones enzimáticas que se dan son de hidrólisis que, sin agua, no tienen lugar o, con escasez de la misma, su actividad es menor. La aplicación de extractos de algas marinas a los cultivos es al suelo, foliar y suelo más foliar. El último es el que más rendimiento extra proporciona (López, 1999).

Se han informado muchos efectos beneficiosos sobre el uso de extractos de algas. Las respuestas positivas incluyen mejoras en la germinación, desarrollo de raíces, calidad de la hoja, vigor general de la planta y resistencia a patógenos (Khan *et al.*, 2009).

Además de esto, las plantas tratadas con extractos de algas tienen un mayor contenido de constituyentes bioquímicos como clorofila, carotenoides, proteínas y amilasas (Hernández *et al.*, 2018).

Dado que estos efectos beneficiosos se obtienen con pequeñas dosis de extractos de algas, se sugiere que los compuestos activos podrían ser hormonas de

crecimiento que se producen de forma natural en las algas, como auxinas, citoquininas, giberelinas u otros componentes de bajo peso molecular (poliaminas y brasinoesteroides) que también son efectivos a bajas concentraciones (Hernández *et al.*, 2018).

Al aplicar foliarmente extractos de algas marinas, las enzimas que éstas contienen refuerzan en las plantas su sistema inmunitario (más defensa) y su sistema alimentario (más nutrición) y activan sus funciones fisiológicas (más vigor) (Canales, 1999).

#### **2.14 Las algas como bioestimulantes**

Los bioestimulantes son definidos por el Consejo Europeo de la Industria de los Bioestimulantes (EBIC, por sus siglas en inglés) como "una sustancia o microorganismo que, cuando se aplica a semillas, plantas o a la rizosfera, estimula procesos naturales para mejorar o beneficiar la absorción de nutrientes, la eficiencia en el uso de nutrientes, la tolerancia al estrés abiótico, o la calidad y rendimiento de los cultivos" (EBIC, 2019). La regulación actual de la Unión Europea (UE) diferencia entre bioestimulantes vegetales microbianos (CFP6-A) y bioestimulantes vegetales no microbianos (CFP6-B).

En particular, los bioestimulantes de extractos de microalgas se refieren al segundo grupo, CFP6-B, que contiene elementos de la categoría de material componente 2 (CMC 2 - plantas, partes de plantas o extractos vegetales). Los bioestimulantes vegetales no microbianos comprenden extractos de macroalgas, sustancias húmicas e hidrolizados de proteínas (Kapoor *et al.*, 2021). Es importante destacar que los bioestimulantes vegetales óptimos no solo deben ser duraderos y efectivos, sino también estar compuestos de moléculas bioactivas capaces de promover el cierre de los ciclos de nutrientes en la agricultura (Sánchez-Quintero *et al.*, 2023).

El uso de algas como bioestimulantes en la agricultura es un tema que ha tomado importancia en los últimos años, razón por la cual se hace necesario conocer sus efectos y aplicaciones en la agricultura, debido a que traen múltiples beneficios. Dentro de estas aplicaciones se han utilizado los extractos de algas marinas, como acondicionadores del suelo para mejorar la productividad de los cultivos (Abdel-Raouf *et al.*, 2013).

Las algas tienen la capacidad de producir moléculas bioactivas con potencial bioestimulante para las plantas, como fitohormonas, oligosacáridos y compuestos fenólicos. Las algas marinas han sido utilizadas durante mucho tiempo en la industria de los bioestimulantes, con algunos productos disponibles comercialmente como Phyter®, Kelpak®, Seamac® y Plagron®.

Aunque la producción y extracción de estas moléculas a partir de microalgas y cianobacterias presentan ciertas ventajas, como el control del entorno en el que se cultivan las microalgas, lo que no está limitado por variaciones estacionales, y evita la contaminación potencial del agua (Sánchez-Quintero *et al.*, 2023).

Los extractos de algas marinas son conocidos como estimulantes del crecimiento de plantas. Se han aplicado por aspersión foliar y al sustrato para mejorar el crecimiento de la planta en condiciones extremas de congelación, sequía y alta salinidad. Adicionalmente, las plantas tratadas con extractos de algas marinas han mostrado una notable resistencia a enfermedades causadas por hongos, bacterias y virus (Kaplan *et al.*, 1987).

Es posible combinar los extractos de microalgas con fertilizantes inorgánicos y orgánicos permitiendo alcanzar una productividad agrícola sostenible ya que contienen nutrientes mayores y menores tales como aminoácidos, vitaminas, citoquininas, auxinas, ácido abscísico los cuales son sustancias que ayudan al crecimiento de las plantas y el rendimiento del cultivo. Se pueden aplicar de diferentes formas: aplicaciones foliares, enmiendas del suelo y sobre semillas (Zhang *et al.*, 2014).

### 3. JUSTIFICACIÓN

El maíz es un cultivo básico en México, tanto para consumo humano, animal e incluso en el mercado industrial; por lo que en los últimos años se ha buscado incrementar su producción (aumentar el rendimiento del cultivo) para abastecer su demanda, esto ha sido posible mediante el uso de fertilizantes, sin embargo, estos afectan directamente al suelo ocasionado principalmente daño a la salud del suelo, acumulación de sales y posibles tóxicos y exposición en la salud humana. Todo esto lleva a buscar nuevas alternativas y una de ellas es la combinación de bioestimulantes más fertilizantes químicos, lo cual puede brindar grandes ventajas dentro de las cuales está evitar el impacto al ambiente, estimular los procesos naturales del suelo, mejorar la producción y calidad de las cosechas, entre otras.

## 4. HIPÓTESIS

La adición del bioestimulante (extracto de alga, *Dunaliella salina*) al suelo del cultivo de maíz provocará un aumento en la actividad respiratoria, biomasa microbiana y catalasa con respecto a un suelo fertilizado químicamente.

## 5. OBJETIVOS

### 5.1 General

Evaluar el efecto de un suelo fertilizado químicamente (urea) o con una mezcla de fertilizante más *Dunaliella salina* en un suelo cultivado con maíz (*Zea mays*) mediante propiedades biológicas y enzimáticas como una alternativa adicional a los fertilizantes convencionales, con el fin de beneficiar tanto al cultivo como al suelo.

### 5.2 Específicos

- Evaluar el efecto de la aplicación de un fertilizante químico (urea) y una mezcla de fertilizante químico más un bioestimulante a base de extracto de *Dunaliella salina* sobre la actividad respiratoria y el carbono de la biomasa microbiana de un suelo cultivado con maíz (*Zea mays*).
- Conocer el grado de estrés a través del  $qCO_2$  de un suelo cultivado con maíz (*Zea mays*) al que se le aplicó fertilizante químico (urea) y una mezcla de fertilizante más *Dunaliella salina*
- Comparar la actividad enzimática de la catalasa de un suelo con fertilizante químico y otro con fertilizante más extracto *Dunaliella salina*.

## 6. MATERIALES Y MÉTODO

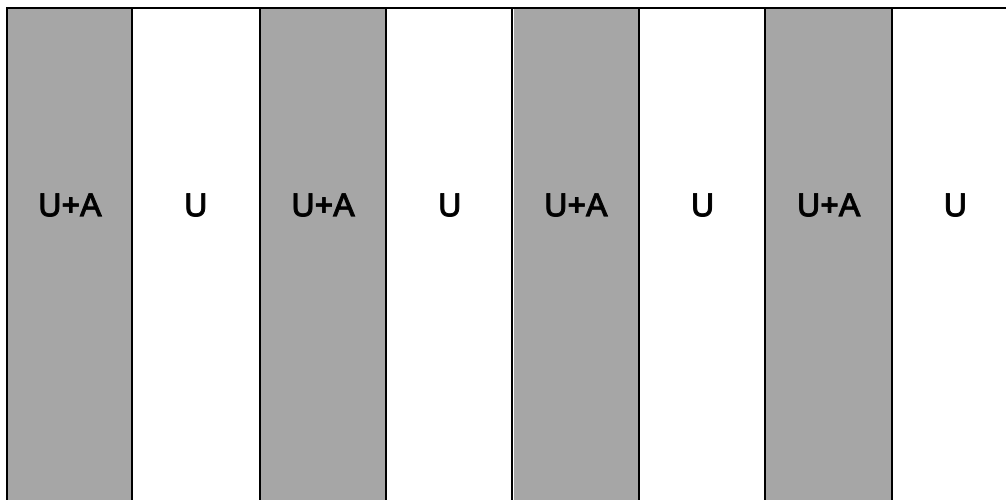
### 6.1 Zona de Estudio

#### 6.1.1 Ubicación del sitio experimental

El estudio se llevó a cabo en el Ejido de San Marcos Yachihuacaltepec, del Municipio de Toluca, Estado de México y se ubica en las coordenadas: 19° 28´ 79” N, 99° 65´ 32” W, Altitud: 2667m, (INEGI, 2020). El clima es templado con una temperatura entre 12 y 18°C, la concentración pluvial se concentra durante los meses de verano y los inviernos son secos, presentando una precipitación de 800mm, favoreciendo la agricultura de temporal (INEGI, 2001). El suelo de la zona corresponde a un andosol y se caracteriza por presentar alta fijación de fosfatos, baja densidad aparente y un pH medianamente ácido (Jaramillo, 2002).

## 6.2 Diseño experimental

El estudio se realizó en una parcela de 45 m<sup>2</sup> cultivada con maíz (*Zea mays*) dividida en 8 cuadrantes, los cuales contaron con dos tratamientos U (urea al 100%) y U + A (urea al 50% + *Dunaliella salina* al 50%). Cada tratamiento tuvo 4 repeticiones como se observa en la siguiente figura:



**Figura 3.** Diseño esquemático del sitio de muestreo con 8 cuadrantes para el cultivo de maíz. U= Urea al 100%; U + A= urea al 50% + alga al 50%.

### 6.2.1 Preparación del bioestimulante y aplicación de tratamientos.

El bioestimulante (extracto de alga *Dunaliella salina*), se preparó en una proporción de 1gr/1L y se adicionó en un recipiente de plástico, para su posterior aplicación a la planta y suelo.

A cada cuadrante que correspondió al tratamiento U+A se le adicionó 1 puño de urea por plántula (equivalente a aproximadamente 100 g) + 50 mL de bioestimulante (*Dunaliella salina*). En el tratamiento U solo se adicionó 1 puño de urea por plántula y así uno y uno de manera sucesiva hasta completar los 8 cuadrantes. Cabe mencionar que dichos tratamientos fueron aplicados a los 22 días después de la siembra lo cual corresponde al inicio vegetativo de la planta.

### 6.3 Muestreo del suelo de cultivo de maíz

Se tomaron muestras del suelo de los primeros 0-20 cm mediante un muestreo de “zig- zag”, para abarcar el área de estudio. Posteriormente, las muestras se colocaron en bolsas de polietileno y se llevaron al laboratorio de Edafología y Ambiente de la UAEMEX donde fueron secadas a temperatura ambiente, molidas y tamizadas para determinar las propiedades fisicoquímicas.

Después de 22 días de la primera aplicación de los tratamientos se llevó a cabo la toma de muestra de suelo considerando solo 4 cuadrantes de la parcela, para cada cuadrante se tuvieron 4 repeticiones contando con un total de 16 muestras.

Una vez finalizado el primer muestreo se hizo una segunda adición solo del tratamiento U+A (urea al 50% + *Dunaliella salina* al 50%) y después de 49 días se llevó a cabo un segundo muestreo de la misma manera que el primero.

Cabe mencionar que las muestras recolectadas en estos dos últimos muestreos se colocaron en bolsas de plástico y se etiquetaron para su traslado al laboratorio de edafología de la UAEMEX donde se mantuvieron en refrigeración a -3°C hasta que fueron utilizadas para obtener las propiedades biológicas.

## **6.4 Análisis de Laboratorio**

### **6.4.1 Propiedades fisicoquímicas del suelo**

Los parámetros químicos analizados se realizaron de acuerdo con la Norma Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 estos fueron: Textura por el método de Bouyoucos AS-09, pH en agua relación 1:2.5 método AS-02, Conductividad

eléctrica (CE) método AS-18, Materia orgánica (MO) método AS-07, de Walkley y Black 1947.

#### 6.4.2 Propiedades biológicas del suelo

Los análisis bioquímicos realizados fueron: carbono de la biomasa microbiana por el método de fumigación-extracción de Vance et al. (1987), respiración basal del suelo mediante la determinación de la emisión de CO<sub>2</sub> por el método de Kassem y Nannipieri (1995). Asimismo, se calculó el coeficiente metabólico (qCO<sub>2</sub>) como la cantidad de C-CO<sub>2</sub> emitido por unidad de biomasa por hora reportado para 24 días. Este se calcula dividiendo la actividad respiratoria entre la biomasa microbiana por el número de horas equivalentes a los días en los que se midió la actividad respiratoria (Anderson y Domsch, 1993) y finalmente se determinó la actividad de la Catalasa (Johnson-Temple, 1964).

## **6.5 Análisis estadístico**

En este estudio se realizaron pruebas estadísticas descriptivas para todas las variables, para comparar las diferencias estadísticas entre los dos tratamientos (U y U+A) aplicando la prueba de t-student con un nivel de confianza de 95% utilizando el paquete estadístico STATGRAPHICS CENTURION.

## **7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **7.1 Propiedades fisicoquímicas**

Como se observa en la Tabla 1, la textura del suelo se clasificó como franco arenoso. De acuerdo con Díaz (2019), aunque el maíz puede adaptarse fácilmente a condiciones desfavorables, para lograr un rendimiento óptimo en la producción, es necesario cumplir con ciertas exigencias, entre las cuales se encuentra la presencia de suelos con textura franco-arenosa. Por consiguiente, el suelo utilizado en el presente estudio se considera adecuado para este cultivo

El pH del suelo tuvo un valor de 4.85 considerado como fuertemente ácido de acuerdo con la clasificación de la NOM-021-RECNAT-2001. Así también se sabe que, en el mundo, el 30-40% de los suelos cultivables y hasta el 70% de los considerados potencialmente cultivables son ácidos (Cruz-Macías *et al.*, 2020).

De acuerdo con lo anterior, los suelos ácidos se caracterizan por presentar toxicidad por  $Al^{+3}$ , toxicidad por manganeso y deficiencia de  $Ca^{+2}$  o  $Mg^{+2}$  particularmente (Tasistro, 2012).

También el pH del complejo suelo-rizosfera depende de la solubilidad y la disponibilidad de P, tanto en los suelos alcalinos como en los ácidos, donde, en estos últimos, se presentan problemas de fijación de fosfatos vía adsorción química en sólidos insolubles de Ca, Fe y A sin embargo, esto no es un impedimento para que el cultivo pueda desarrollarse (Cruz-Flores, 2007). Respecto a la conductividad eléctrica, el suelo presentó un valor de 0.17 considerado como muy ligeramente salino (NOM-021-RECNAT- 2000). El cual se encuentra libre de sales en exceso.

La materia orgánica fue de clase media con un porcentaje de 3.20, estudios de Julca *et al.* (2006) mencionan que se encuentra dentro de un rango óptimo e idóneo para el cultivo de maíz (Tabla1). Es importante mencionar que la dinámica de mineralización de la materia orgánica y el efecto sobre los microorganismos del suelo, así como la formación de agregados, está relacionada con el manejo del suelo en los agrosistemas (Guadarrama-Nonato *et al.*, 2018).

Tabla 1: Caracterización fisicoquímica del suelo

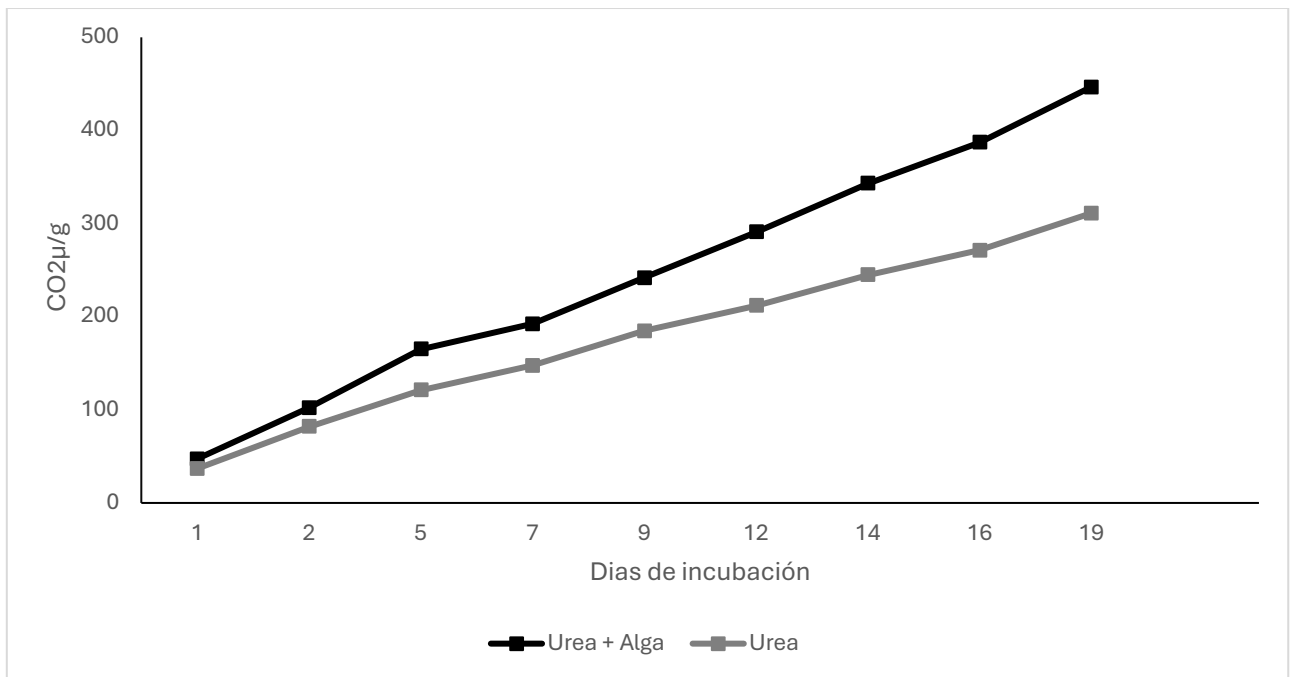
Parámetro	Suelo
Clase Textural	Franco arenoso
Arena (%)	68.01
Limo (%)	16.55
Arcilla (%)	15.43
pH	4.85 ± 0.05
CE (ds/cm)	0.17 ± 0.02
MO (%)	3.20 ± 0.19

Promedio ± error estándar, CE: Conductividad eléctrica; MO: Materia orgánica.

## 7.2 Actividad respiratoria

En la Figura 4 se observa que la actividad respiratoria fue mayor en el tratamiento que contenía Urea más extracto de alga (U+A) con respecto al tratamiento que solo presentaba Urea (U) a los 22 días de su aplicación. El orden en la actividad respiratoria para los dos tratamientos fue el siguiente: 496.3±10.2 mg CO<sub>2</sub>/100g de suelo para UA y para U 345.7± 6.6 mg CO<sub>2</sub>/100g de suelo.

Cabe mencionar que el papel del bioestimulante en el suelo según la FAO es estimular los procesos nutrimentales y tiene como objetivo mejorar el crecimiento de la planta, está presente en la zona de la rizósfera, y en el suelo participa en la disponibilidad de nutrientes, donde se llevan a cabo procesos como la mineralización, humificación y degradación de compuestos orgánicos del suelo (Qu *et al.*, 2022; Anton-Herro-2023).



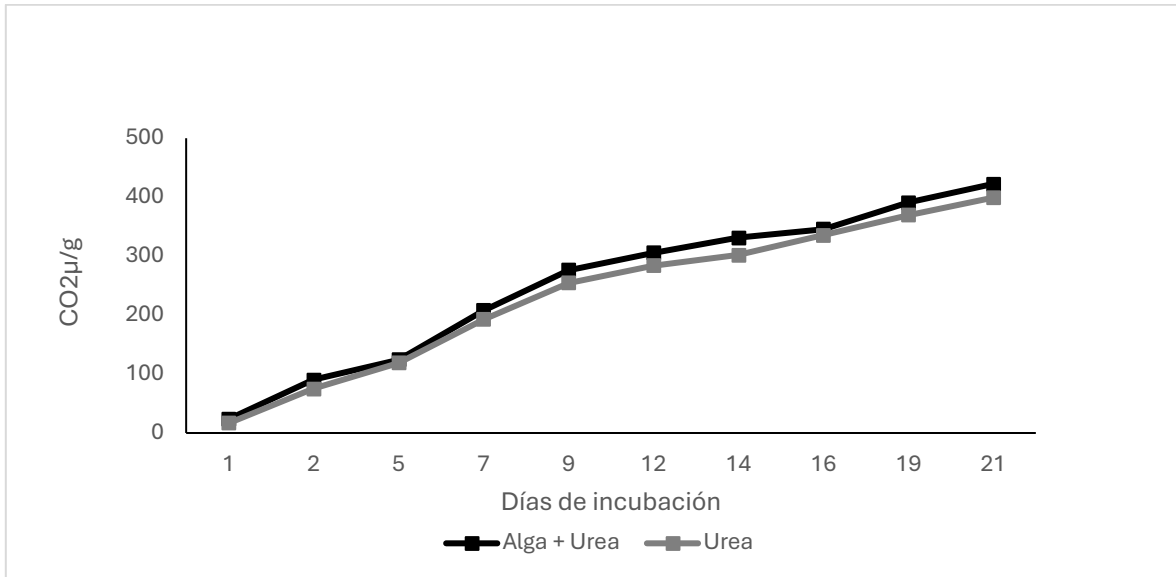
**Figura 4.** Evolución de la producción de CO<sub>2</sub> en el suelo de cultivo de maíz 22 días después de la aplicación de los tratamientos U (urea) y U+A (urea + alga).

En la Figura 5 se muestra la actividad respiratoria 49 días después de la aplicación de los tratamientos U+A y U de igual manera la producción de CO<sub>2</sub> fue mayor en el tratamiento que contenía U+A con respecto a U. El orden en la actividad respiratoria para los dos tratamientos fue para UA 422.5±22.9mg CO<sub>2</sub>/100g de suelo y 399.2 ±19.1 mg CO<sub>2</sub>/100g de suelo para U.

Como se observa el comportamiento se repite en ambos tiempo en donde de acuerdo a Liu et al. (2022) reportaron que las medidas de gestión agrícola se utilizan para aumentar la productividad de los cultivos en tierras agrícolas, como labranza, riego, fertilización y cobertura que afectan profundamente a la respiración del suelo de tierras agrícolas; por lo que el estudio de la respiración del suelo en los ecosistemas agrícolas es esencial para predecir el ciclo global del carbono y su retroalimentación al cambio climático y además considerar las emisiones de CO<sub>2</sub> del suelo las cuales están estrechamente relacionadas con el crecimiento y la distribución de la biomasa aérea y las raíces de las plantas subterráneas, en donde la participación del bioestimulante queda patente por lo comentado por Anton-Herrero et al. (2023) que la adición de bioestimulantes húmicos producen la bioactivación de bacterias y hongos en el suelo y se potencializa cuando se adicionan con otros bioestimulantes en forma de extracto de algas.

La baja actividad respiratoria para el tratamiento U obedece posiblemente a que la adición de la Urea sin el bioestimulante enriquece el contenido de N y altera el

entorno del suelo, lo que afecta la pérdida de carbono a través de la respiración del suelo (Anton-Herro *et al.*, 2023) y, además, durante el proceso de descomposición de la materia orgánica se generó una gran cantidad de CO<sub>2</sub>, lo que resultó en la formación de ácido carbónico débil (Das *et al.*, 2022).



**Figura 5.** Evolución de la producción de CO<sub>2</sub> en el suelo de cultivo de maíz 49 días después de la aplicación de los tratamientos U (urea) y U+A (urea + alga).

### 7.3 Carbono de la biomasa microbiana, actividad respiratoria y $q\text{CO}_2$

La biomasa microbiana es la masa viva de la materia orgánica del suelo y la mitad se encuentra en la parte superior del suelo (15 cm), que contiene un valor menor del 4 % de materia orgánica y juega un papel importante en la descomposición y la formación de depósitos de carbono en el suelo (Das *et al.*, 2023).

De esta manera, en la Tabla 2 se muestra el contenido de carbono de la biomasa microbiana después de 22 días de la aplicación de los respectivos tratamientos, donde se observa que CBM es mayor en el tratamiento U+A con  $1862.2 \pm 21.14 \mu\text{g g}^{-1}$  con relación al tratamiento U con  $397.3 \pm 22.53 \mu\text{g g}^{-1}$  esto puede deberse a que los microorganismos descomponen materia orgánica y liberan formas disponibles de compuestos que pueden ser absorbidos por las plantas, además de especializarse en formar compuestos ricos en C y N útiles para la fertilidad del suelo y lo que hace que aumente el carbono de la biomasa microbiana a través de las interacciones entre las condiciones ambientales del suelo y el crecimiento de las plantas (Anton-Herro *et al.*, 2023).

Cabe mencionar que el comportamiento se repite a los 49 días después de la adición de los tratamientos, es decir el tratamiento U+A tiene un mayor contenido de carbono de la biomasa microbiana con  $839.0 \pm 14.35 \mu\text{g g}^{-1}$  y con respecto a U contiene  $540.2 \pm 13.99 \mu\text{g g}^{-1}$ .

Es importante mencionar que la estimación de las existencias de carbono en la biomasa microbiana del suelo y su relación con las variables climáticas, ambientales y bioquímicas del suelo puede ayudar con la gestión del suelo, la adaptación al cambio climático y la mitigación de este, por lo que la biomasa microbiana del suelo se correlaciona con el C orgánico almacenado en el suelo y la respiración basal del suelo (Das *et al.*, 2023).

El  $q\text{CO}_2$  es la respiración por unidad de biomasa microbiana y es un parámetro de cambios bioenergéticos en un ecosistema en desarrollo (Odum, 1969). Con este indicador, a los 22 días después de la aplicación de los tratamientos, se observó que para U+A el valor de  $q\text{CO}_2$  (9.0  $\mu\text{g}$ ) fue mayor que en U con respecto al tratamiento U (5.6  $\mu\text{g}$ ).

A los 49 días después de la aplicación de los respectivos tratamientos, sucede lo contrario, presentándose un valor mayor de  $q\text{CO}_2$  (2.5  $\mu\text{g}$ ) en U con respecto a U+A (1.2  $\mu\text{g}$ ); estos cambios pueden deberse a que un valor menor de  $q\text{CO}_2$  implica un menor consumo de C por parte de los microorganismos para el mantenimiento y de ahí que se presentan un incremento para el valor de  $q\text{CO}_2$  que indica un estrés en la población microbiana y los microorganismos continúan accediendo a fuentes de C lábil para mantenimiento y crecimiento (Das *et al.*, 2022).

**Tabla 2.** Propiedades biológicas de un suelo cultivado con maíz después de 20 y 49 días de la aplicación de los tratamientos U (Urea) y U+A (urea + alga).

Tratamientos	Carbono de la	Respiración	$qCO_2$	Carbono de la	Respiración del	$qCO_2$
	biomasa	del suelo ( $\mu g$	( $\mu g$ )	biomasa	suelo ( $\mu g CO_2 / g$	( $\mu g$ )
	microbiana	$CO_2 / g$ suelo		microbiana	suelo	
	( $\mu g g^{-1}$ )			( $\mu g g^{-1}$ )		
	(22 días)			(49 días)		
U	$397.3 \pm 22.53$	$345.7 \pm 6.6$	5.6	$540.2 \pm 13.99$	$399.2 \pm 19.1$	2.5
U+A	$1862.2 \pm 21.14$	$496.3 \pm 10.2$	9.0	$839.0 \pm 14.35$	$422.5 \pm 22.9$	1.2

Promedio  $\pm$  error estándar.  $qCO_2$  Coeficiente metabólico

#### 7.4 Catalasa

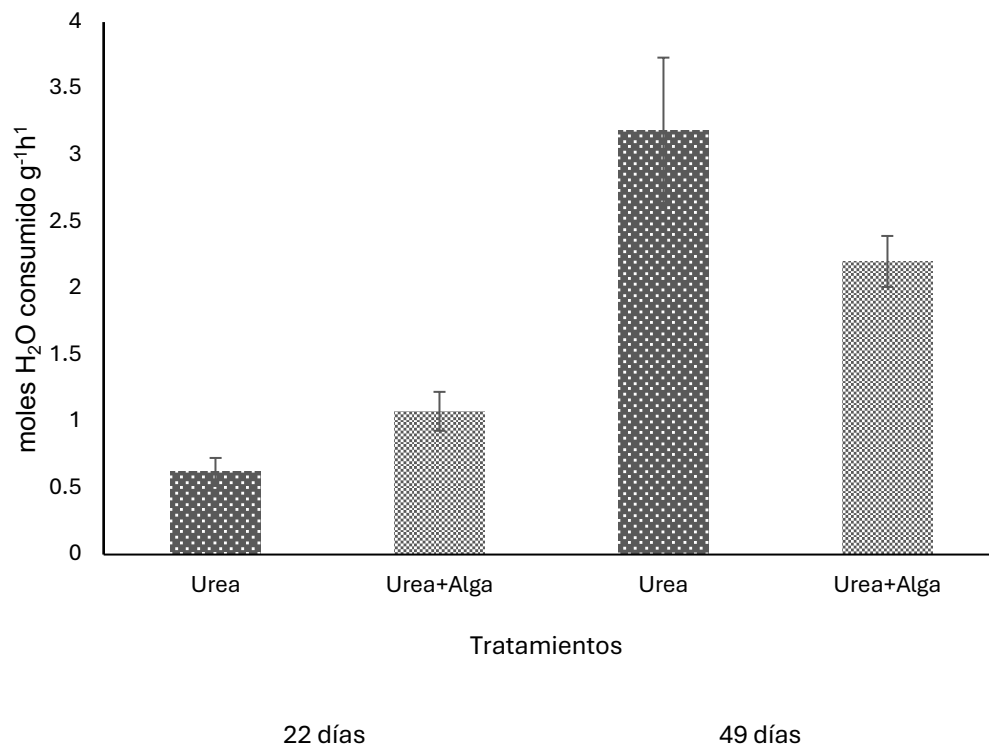
Con respecto a la enzima catalasa a los 22 días se observa una actividad mayor en el tratamiento que contiene U+A ( $0.220 \pm 0.04 \text{ mol H}_2\text{O}_2 \text{ g}^{-1}\text{h}^{-1}$ ) con relación al tratamiento U ( $0.107 \pm 0.03 \text{ mol H}_2\text{O}_2 \text{ g}^{-1}\text{h}^{-1}$ ) (Figura 6).

Para el día 49 las condiciones cambian ya que se presenta mayor actividad enzimática en U ( $0.062 \pm 0.02 \text{ mol H}_2\text{O}_2 \text{ g}^{-1}\text{h}^{-1}$ ) con respecto al tratamiento U+A ( $0.318 \pm 0.13 \text{ mol H}_2\text{O}_2 \text{ g}^{-1}\text{h}^{-1}$ ).

Estos cambios en la enzima pueden deberse a que se presenta una inhibición de la catalasa cuando se encuentran fertilizantes inorgánicos (NPK). La catalasa es un componente clave de la defensa celular contra el estrés oxidativo resultante de las especies nocivas de oxígeno reactivo producidas durante el metabolismo aeróbico (Miyatake y Iwabuchi, 2006).

Medir la actividad de la catalasa, ayuda a conocer y proponer medidas de mitigación por la contaminación de diversos compuestos inorgánicos y orgánicos en el suelo (Tejada *et al.*, 2015). Así también la actividad de la catalasa se ve reflejada en los dos tiempos, en donde se debe de considerar el papel que juega el bioestimulante a base del extracto algas marinas que contienen sustancias inorgánicas y orgánicas en cantidades variables en relación con las especies de algas y el método de extracción. En los compuestos inorgánicos se incluye N, P, K, Fe, Mg, Zn, Ca, Na y S, y en los compuestos orgánicos se tienen osmolitos (p. ej., manitol, betaínas y análogos de betaína), aminoácidos, metabolitos secundarios bioactivos, polisacáridos, vitaminas, fitohormonas (por ejemplo, poliaminas, brasinoesteroides, giberelinas, citoquininas, auxinas, indol ácido acético, ácido abscísico) y fenoles (Denora *et al.*, 2020); además autores como Matrinia y colaboradores (2021) mencionan que las algas marinas actúan sobre los suelos y las plantas lo que va a repercutir en el crecimiento de la planta de maíz.

Estas algas describen efectos positivos a través de la microflora del suelo, con la actividad de bacterias promotoras del crecimiento vegetal y antagonistas de patógenos en suelos supresores. En las plantas, los efectos nutricionales a través del suministro de micro y macronutrientes indican que actúan como fertilizantes, además de sus otras funciones (Jardin, 2015).



**Figura 6.** Actividad enzimática de la catalasa en un suelo cultivado con maíz después de 22 y 49 días de la aplicación de los tratamientos U (urea) y U+A (urea + alga).

## 8. CONCLUSIONES

- El análisis fisicoquímico del suelo para el cultivo de maíz reveló un pH fuertemente ácido y una conductividad eléctrica nula.
- La materia orgánica fue de clase media, la cual se encuentra dentro de un rango óptimo e idóneo para el cultivo de maíz.
- La actividad respiratoria fue mayor en el tratamiento que contenía Urea más extracto de alga (U+A) en ambos tiempos.
- El CBM es mayor en el tratamiento U+A con relación al tratamiento U para los dos tiempos.
- El  $q\text{CO}_2$  presentó un comportamiento variable entre los tratamientos.
- La enzima catalasa mostró un patrón variable en los tratamientos.

De esta manera se sugiere la aplicación de una mezcla de extracto de alga y fertilizante para mejorar las propiedades del suelo de un cultivo de maíz.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

Abbott, L. K., Macdonald, L. M., Wong, M. T. F., Webb, M. J., Jenkins, S. N., & Farrell, M. (2018). Potential roles of biological amendments for profitable grain production—A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 256, 34-50.

Álvarez, D. M. (2015). *Ecofisiología del cultivo de maíz*. La publicación que se presenta titulado *El cultivo de maíz en la provincia de San Luis es un actualizado trabajo de información para la toma de decisiones relacionado con el cultivo*. El índice nos señala un recorrido de datos, información y resultados de ensayos demostrativos localizados realizado por un grupo interdisciplinario público-privado.

Álvarez-González, A., Uggetti, E., Serrano, L., Gorchs, G., Casas, M. E., Matamoros, V. González, F.E., & Díez-Montero, R. (2023). The potential of wastewater grown microalgae for agricultural purposes: Contaminants of emerging concern, heavy metals and pathogens assessment. *Environmental Pollution*, 324, 121399.

Andrés, P; Mateos, E; Tarrasón, D; Cabrera, C. y Figuerola, B. (2011). Effects of digested, composted, and thermally dried sewage sludge on soil microbiota and mesofauna. *Applied Soil Ecology*, 48: 236-242.

Araujo-Abad, S., & Collahuazo-Reinoso, Y. (2019). Producción de biofertilizantes a partir de microalgas. *CEDAMAZ*, 9(2), 81-87.

Below, F. E. (2002). Fisiología, nutrición y fertilización nitrogenada de maíz. Instituto de la Potasa y el Fósforo. *Informaciones Agronómicas*, 54, 3-9.

Brown, P. J., Long, S. M., Spurgeon, D. J., Svendsen, C., & Hankard, P. K. (2004). Toxicological and biochemical responses of the earthworm *Lumbricus rubellus* to pyrene, a non-carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbon. *Chemosphere*, 57(11), 1675-1681.

Buol, S. W., Hole, F. D., & McCracken, R. J. (2013). Génesis y clasificación de suelos. Trillas. Canales López, Benito (1999). Enzimas-algas: Posibilidades de su uso para estimular la producción agrícola y mejorar los suelos. *Terra Latinoamericana*, 17(3), 271-276 Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57317312>

Carolin Córdova S., Erick Zagal V., Christan Hepp K. y Pier Baratni P. (2014). Aspectos de la materia orgánica en suelos volcánicos del valle simpson y su impacto en la transformación del azufre y del nitrógeno

Cheng, Y; Wang, J; Mary, B; Zhang, J; Cai, Z. y Chang, S. (2013). Soil pH has contrasting effects on gross and net nitrogen mineralizations in adjacent forest and grassland soils in central Alberta, Canada. *Soil Biology & Biochemistry* 57:848-857.

Clark, D. B. (2002). Los factores edáficos y la distribución de las plantas. *Ecología y conservación de bosques neotropicales*. LUR, Cartago, Costa Rica, 193-221.

Cordell, D., J.O. Drangert, and S. White. (2009). The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Env. Change* 19:292-305.

Creamer, R; Schulte, R; Stone, D; Gal, A; Krogh, P; Lo Papa, G; Murray, P; Pérès, G; Foerster, P; Rutgers, M; Sousa, J. y Winding, A. (2014). Measuring basal soil respiration across Europe: Do incubation temperature and incubation period matter. *Ecological Indicators*, 36: 409-418.

Cruz-Flores, G. (2007). Actividad fosfatasa y pH del suelo adyacente a la rizosfera de maíz, trigo y triticale en suelos ácidos. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 25(2), 115-125.

Cruz-Macías, W. O., Rodríguez-Larramendi, L. A., Salas-Marina, M. Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Chávez-Hernández, M. H., & Gordillo-Curiel, A. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *Terra latinoamericana*, 38(3), 475-480.

Das, D., Abhishek, K., Banik, P., & Swain, D. K. (2022). Comparative evaluation of changes in soil bio-chemical properties after application of traditional and enriched vermicompost. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102956.

De la Portilla L.N (2021). "Efecto de la adición de biosólidos en las propiedades bioquímicas de suelos erosionados" Tesis que para obtener el grado de doctora en ciencias agropecuarias y recursos naturales. Universidad autónoma del estado de México maestría y doctorado en ciencias agropecuarias y recursos naturales facultad de ciencias.

de Souza Celente, G., de Souza Schneider, R. D. C., Rizzetti, T. M., Lobo, E. A., & Sui, Y. (2023). Using wastewater as a cultivation alternative for microalga *Dunaliella salina*: Potentials and challenges. *Science of the Total Environment*, 168812.

Díaz Castro, K. T. (2019). "Comportamiento agronómico del cultivo de maíz (*Zea mays* L.), a la aplicación de bioestimulantes como complementos a la fertilización edáfica" (Bachelor's thesis.

du Jardín, P. (2019). ¿Cómo actúan los bioestimulantes para plantas? *Phytoma España: La revista profesional de sanidad vegetal*, (313), 18-19.

El-Sayed, S. F., Hassan, H. A., & El-Mogy, M. M. (2015). Impact of bio-and organic fertilizers on potato yield, quality and tuber weight loss after harvest. *Potato Research*, 58, 67-81.

Espinosa, J. y Molina, E. (1999). La acidez y encalado de suelos. International Plant Nutrition Institute. Quito, Ecuador. 42 p. [ [Links](#) ]

García, G. N., & Navarro García, S. (2014). Fertilizantes: química y acción. Ediciones Paraninfo, SA.

García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y forrajes*, 35(2), 125-138.

Gispert, M., Emran, M., Pardini, G., Doni, S., & Ceccanti, B. (2013). The impact of land management and abandonment on soil enzymatic activity, glomalin content and aggregate stability. *Geoderma*, 202, 51-61.

González Cortés, N., Silos Espino, H., Estrada Cabral, J. C., Chávez-Muñoz, J. A., & Tejero Jiménez, L. (2016). Características y propiedades del maíz (*Zea mays* L.) criollo cultivado en Aguascalientes, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(3). 669-680

González Merino, A., & Ávila Castañeda, J. F. (2014). El maíz en Estados Unidos y en México: Hegemonía en la producción de un cultivo. *Argumentos* (México, DF), 27(75), 215-237.

Grageda-Cabrera, O. A., Díaz-Franco, A., Peña-Cabriales, J. J., & Vera-Nuñez, J. A. (2012). Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(6), 1261-1274.

Guadarrama-Nonato, A., Mejía-Carranza, J., & Ramírez-Gerardo, M. G. (2018). Mineralización de la materia orgánica en suelos con manejo diferencial en cultivo de rosa. *Acta universitaria*, 28(2), 33-41.

Hernández-Herrera R. M., F. Santacruz-Ruvalcaba, D. R. Briceño-Domínguez, D. A. Di Filippo-Herrera and G. Hernández-Carmona. (2018). Seaweeds as Potential Plant Growth Stimulants for Agriculture in Mexico. *Hidrobiológica* 28 (1), 129-140.

Hurtado, A. C., Díaz, Y. P., Calzada, K. P., Rodríguez, E. Q., & Olivera, D. (2019). Efecto de tres bioestimulantes en el comportamiento morfológico y productivo del cultivo del rábano (*Raphanus sativus* L.). *Revista de la Facultad de Agronomía de La Universidad del Zulia*, 36(1), 54-73.

Julca Otiniano, A., Meneses Florián, L., Blas Sevillano, R., & Bello Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia* (Arica), 24(1), 49-61.

Kandasamy, G., & Shaleh, S. R. M. (2018). Flotation removal of the microalga *Nannochloropsis* sp. using *Moringa* protein–oil emulsion: A novel green approach. *Bioresource technology*, 247, 327-331.

Kelin Tao, Haixia Tian, Ziquan Wang, Xiaofu Shang, Jing Fan, Mallavarapu Megharaj, Jianli Ma, Hanzhong Jia, Wenxiang He. (2023). Ecotoxicity of parathion during its dissipation mirrored by soil enzyme activity, microbial biomass and basal respiration. *Chemosphere*. Vol 311. 137116.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137116>

Keramati, A., Shariati, F. P., Tavakoli, O., Akbari, Z., & Rezaei, M. (2021). The effect of audible sound frequency on the growth and beta-carotene production of *Dunaliella salina*. *South African Journal of Botany*, 141, 373-382.

López Padrón, I., Martínez González, L., Pérez Domínguez, G., Reyes Guerrero, Y., Núñez Vázquez, M., Cabrera Rodríguez, J. A. (2020). Las algas y sus usos en la agricultura. Una visión actualizada. *Cultivos Tropicales*, 41(2), e10. Epub 01 de junio de 2020. Recuperado en 03 de junio de 2022, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362020000200010&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362020000200010&lng=es&tlng=es).

López, B. C. (1999). Enzimas-algas: posibilidades de su uso para estimular la producción agrícola y mejorar los suelos. *Terra Latinoamericana*, 17(3), 271-276.

Luce, M; Ziadi, N; Zebarth, B; Grant, C; Tremblay, G. y Gregorich, E. (2014). Rapid determination of soil organic matter quality indicators using visible near infrared reflectance spectroscopy. *Geoderma* 232-234: 449-458

Mao, Y; Sang, S; Liu, S. y Jia, J. (2014). Spatial distribution of pH and organic matter in urban soils and its implications on site-specific land uses in Xuzhou, China. *Comptes Rendus Biologies* 337: 332-337.

Márquez Prieto, L. M. (2020). Evaluación del impacto ambiental de la urea en diferentes métodos de fertilización en palto, en el valle de Huanchay, provincia de Ocros, Áncash

Martínez Reyes, L., Aguilar Jiménez, C. E., Carcaño Montiel, M. G., Galdámez Galdámez, J., Gutiérrez Martínez, A., Morales Cabrera, J. A., Martínez Aguilar, F., Llaven Martínez, J., Gómez Padilla, E. (2018) Biofertilización y fertilización química en maíz (*Zea mays* L.) en Villaflores, Chiapas.

Mikkelsen, R. L. (2007). Biuret en fertilizantes de urea. IPNI, *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 67.

Miyatake, F. y Iwabuchi K. (2006). Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. *Bioresource Technology* 97: 961-65. doi: 10.1016/j.biortech. 2005.04.035.

Mogollón, J. P., Torres, D., & Martínez, A. (2010). Cambios en algunas propiedades biológicas del suelo según el uso de la tierra en el sector El Cebollal, Estado Falcón, Venezuela. *Bioagro*, 22(3), 217-222.

Orozco Corral, A. L., Valverde Flores, M. I., Martínez Téllez, R., Chávez Bustillos, C., & Benavides Hernández, R. (2016). Propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo con biofertilización cultivado con manzano. *Terra Latinoamericana*, 34(4), 441-456.

Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 1-4.

Pardo-Plaza, Y. J., Paolini Gómez, J. E., & Cantero-Guevara, M. E. (2019). Biomasa microbiana y respiración basal del suelo bajo sistemas agroforestales con cultivos de café. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 22(1).

Paz-Ferreiro, J; Gascó, G; Gutiérrez, B y Méndez, A. (2012). Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil. *Biol Fertil Soils* 48:511–517.

Perez Brandan, C., Huidobro, D. J., & Alvarez, M. D. (2020). Carbono de la biomasa microbiana de los suelos como indicador de cambios en sistemas productivos locales. EEA Salta, INTA.

Porta, J; López-Acevedo, M. y Roquero, C. (2003). *Edafología: para la agricultura y medio ambiente*. Ed. Mundi-prensa. 3ª edición. España

Prieto Méndez, J., Prieto García, F., & Acevedo Sandoval, O. A. (2014). Variabilidad espacial de la materia orgánica en un suelo dedicado al cultivo de cebada maltera (*Hordeum distichum* L.). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (71), 141-152.

Qi-yong, Y; Zhong-cheng, J; Wen-jun, L. y Hui, L. (2014). Prediction of soil organic matter in peak-cluster depression region using kriging and terrain indices. *Soil & Tillage Research* 144: 126-132.

Quintero Rodríguez, E., Calero Hurtado, A., Pérez Díaz, Y., & Enríquez Gómez, L. (2018). Efecto de diferentes bioestimulantes en el rendimiento del frijol común. *Centro Agrícola*, 45(3), 73-80.

Ratto, S; (2014). Los microelementos en el sistema productivo. Fauba.

Sánchez Ortega, I., & Pérez-Urria Carril, E. (2015). Maíz I (*Zea mays*). *Ene*, 15, 39.

Sánchez-Quintero, Á., Fernandes, S. C., & Beigbeder, J. B. (2023). Overview of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants produced from wastewater and CO<sub>2</sub> streams towards sustainable agriculture: A review. *Microbiological Research*, 127505.

Santos Montes, A. M., González Arechavala, Y., & Martín Sastre, C. (2014). Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas.

Segueda, A. N., Correa, G. V., Blanco, J. L., & Gamino, M. D. L. R. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS*, 80, 29-37.

Selva, V; (2011). EL MAIZ NECESITA ZINC. Departamento Técnico, Stoller Argentina S.A.

Sharma, A; Weindorf, D; Man, T; Abdalsatar, A; Aldabaa, A. y Chakraborty, S. (2014). Characterizing soils via portable X-ray fluorescence spectrometer: 3. Soil reaction (pH). *Geoderma* 232-234: 141-147

Silva, M; Barajas, M; Araujo, A; Araujo, F. y Melo, w. (2014). Soil Microbial Biomass After Three-Year Consecutive Composted Tannery Sludge Amendment. *Pedosphere* 24: 469-475.

Sotelo, C. E., Sirio, A. A., & Pérez, G. L. (2022). Carbono de la biomasa microbiana del suelo. Método de fumigación-extracción.

Sujit Das, Sourabh Deb a, Snehasudha S. Sahoo b, Uttam Kumar Sahoo. (2023). Soil microbial biomass carbon stock and its relation with climatic and other environmental factors in forest ecosystems: A review. *Acta Ecologica Sinica*.  
<https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2022.12.007>

Tasitro, A. (2012). La acidez de los suelos. Instituto Internacional de Nutrición Vegetal (IPNI). Notas de conferencia. 108 p.

Tejada M, Gómez I, Franco-Andreu L, Benitez C, (2015). Role of different earthworms in a soil polluted with oxyfluorenherbicide. Short-time response on soil biochemical properties. *Ecological Engineering* 86, 39-44. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.058>.

Trejo Téllez, L. I., Gómez Merino, F. C., de las Nieves Rodríguez Mendoza, M., & Alcántara González, G. (2005). Fertilización foliar con urea en la partición de nitrógeno en espinaca. *Terra Latinoamericana*, 23(4), 495-503.

Uzcanga Pérez, N. G., Cano González, A. D. J., Medina Méndez, J., y Espinoza Arellano, J. D. J. (2015). Caracterización de los productores de maíz de temporal en el estado de Campeche, México. *Revista mexicana de agronegocios*, 36(1345-2016-104390), 1295-1305.

Wen, L; Lei, P; Xiang, W; Yan, W. y Liu, S. (2014). Soil microbial biomass carbon and nitrogen in pure and mixed stands of *Pinus massoniana* and *Cinnamomum camphora* differing in stand age. *Forest Ecology and Management* 328:150-158.

Wendi Qu, Baohua Xie, Hao Hua, Gil Bohrer, Josep Penuelas, Chaoyang Wu, Guangxuan Han b c (2022) Long-term nitrogen enrichment accelerates soil

respiration by boosting microbial biomass in coastal wetlands. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 175. 108864. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108864>

Zhang, Z., Xu, M., Fan, Y., Zhang, L., & Wang, H. (2024). Using microalgae to reduce the use of conventional fertilizers in hydroponics and soil-based cultivation. *Science of The Total Environment*, 912, 169424.

Zihan Liu, Fangyuan Huang, Bingfan Wang, Zhaoyang Li, Chenxu Zhao, Ruixia Ding, Baoping Yang, Peng Zhang, Zhikuan Jia. (2023). Soil respiration in response to biotic and abiotic factors under different mulching measures on rain-fed farmland. *Soil and Tillage Research*. Volume 232, August.105749. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105749>