

Potencial de la bioestimulación microbiana en la biorremediación de suelos agrícolas contaminados con paraquat y su impacto en *Agave salmiana*

Potential of Microbial Bio-stimulation in the Bioremediation of Agricultural Soils Contaminated with Paraquat and Its Impact on *Agave salmiana*

Aguado Morin Ana Sofia, López Pérez María Elena, Núñez Palenius Héctor Gordon, Ruiz Aguilar Graciela M.L.
División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Carretera Irapuato-Silao Km. 9; C.P. 36500; Irapuato, Gto.
gracielar@ugto.mx

Resumen

El paraquat (PQ) es un herbicida de amplio uso en la agricultura, pero su alta toxicidad y persistencia en el suelo representan un riesgo ambiental. Puede permanecer activo hasta 17 años, afectando la microbiota edáfica y es altamente tóxico para humanos y animales, con numerosos casos reportados de intoxicación aguda y mortalidad en las últimas décadas. La biorremediación es una alternativa sustentable para descontaminar suelos afectados por herbicidas, utilizando organismos vivos como microorganismos, plantas, algas y hongos. Dentro de esta estrategia, la bioestimulación consiste en añadir nutrientes al suelo para favorecer el crecimiento microbiano y acelerar la degradación de compuestos recalcitrantes. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar de manera preliminar el potencial de la bioestimulación microbiana en la remediación de un suelo agrícola (MAM) contaminado con paraquat (PQ) en dos concentraciones (5 y 10 mg/kg). Para promover la actividad microbiana, se incorporaron sales de sulfatos y nitratos como fuentes suplementarias de nutrientes. Adicionalmente, se realizó el trasplante de *Agave salmiana* subsp. *crassispina* como indicador biológico de tolerancia al PQ durante la fase inicial del tratamiento. Este trabajo constituye una fase exploratoria orientada a generar información base para el diseño de un proyecto a mayor escala que integre metodologías avanzadas de monitoreo, análisis de comunidades microbianas y evaluación a largo plazo del impacto de la bioestimulación en suelos agrícolas contaminados con herbicidas persistentes. Asimismo, se caracterizaron los parámetros fisicoquímicos del suelo MAM al inicio del tratamiento (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, humedad, textura, densidades, porosidad total, sulfatos, nitratos, calcio, magnesio) y los indicadores de actividad biológica (actividad enzimática y unidades formadoras de colonia). Las características del suelo mostraron que era de textura arcillosa y poseía propiedades fisicoquímicas aptas para uso agrícola. Las plántulas de *A. salmiana* demostraron una notable tolerancia a las concentraciones de PQ evaluadas en este estudio. Paralelamente, se observó el crecimiento de microorganismos en medios de cultivo, lo que sugiere la presencia de una microbiota edáfica activa, incluso en condiciones potencialmente adversas. Sin embargo, la presencia de PQ en el suelo no pudo ser confirmada mediante los métodos convencionales de extracción empleados. Esto puede atribuirse a la alta afinidad del compuesto por las partículas del suelo, especialmente en matrices arcillosas, donde queda fuertemente adsorbido, dificultando su recuperación y análisis. Aunque estos resultados representan un reto metodológico, también abren una línea prometedora para estudios futuros enfocados en el desarrollo de técnicas más sensibles de detección y en la evaluación a largo plazo de los procesos de remediación biológica.

Palabras clave: paraquat; biorremediación; suelos; agave; nitratos; sulfatos.

Introducción

México es considerado el centro de origen del cultivo de agave debido a su notable riqueza en especies (Fregoso-Zamorano et al., 2023). De las aproximadamente 200 especies de agave que existen, 150 se localizan en territorio mexicano, lo que representa el 75% del total registrado en el continente americano, siendo además el país que conserva la mayor diversidad y los procesos de domesticación de esta planta (Colunga-García Marín et al., 2007). Los cultivos de agave representan una importancia cultural y económica para las regiones productoras en el país (García-Barrón et al., 2017), sin embargo, desde un punto de vista

agroecológico, el monocultivo de agave se caracteriza por un alto grado de intensificación de prácticas de cultivo, ocasionando alteraciones de diversos ecosistemas y efectos negativos en la biodiversidad. Este tipo de sistema de producción ha generado importantes problemas, tanto en lo que respecta a enfermedades de las plantas como en la proliferación de diversas especies de malezas. Durante décadas, esta situación ha llevado a la aplicación intensiva de productos químicos, entre ellos los herbicidas, para su control. La presencia de malezas en los cultivos puede reducir el rendimiento hasta en un 30% del cultivo, lo que ha motivado el combate de malezas con estos compuestos químicos. No obstante, aunque los herbicidas han contribuido a mejorar la productividad y disminuir los costos de producción, también generan efectos negativos en el suelo, como la erosión. A largo plazo, su uso continuo puede causar daños ambientales y favorecer la aparición de malezas resistentes (García-Ocaña et al., 2024).

El paraquat (PQ) es un herbicida comúnmente empleado para el control de malezas en los cultivos agrícolas, incluido el cultivo del agave, donde se aplica PQ y otros agroquímicos para controlar las malezas presentes. Clasificado como un herbicida bipiridílico, actúa por contacto y se comercializa en forma líquida con concentraciones del 20% para uso agrícola. Ha estado disponible para los agricultores durante más de 40 años y es considerado el decimo tercer agroquímico más vendido a nivel mundial (Shah, 2024; Viales López, 2014). Sin embargo, se ha comprobado que el PQ es altamente tóxico para humanos y animales, con numerosos casos reportados de intoxicación aguda y mortalidad en las últimas décadas (Bakry et al., 2016). En el subsuelo, el PQ es capaz de quedar retenido por años debido a su vida media de aproximadamente 17 años. Así mismo, debido a su toxicidad, este herbicida afecta severamente la población de especies microbianas del suelo, reduciendo su viabilidad y actividad metabólica. La lixiviación del PQ a través del suelo y hacia las aguas, representa un problema principalmente en suelos arenosos permeables o en zonas donde llueve mucho, en el agua es adsorbido por los materiales ahí encontrados y por la vegetación acuática. En suelos arcillosos, el PQ se adsorbe fuertemente a las partículas de arcilla y la lixiviación es limitada, pero su persistencia en estos ambientes puede ser mayor debido a la limitada disponibilidad de oxígeno (Montero Rojas, 2018).

Por tal motivo, se buscan alternativas sustentables que resuelvan la contaminación de los suelos causada por herbicidas y que a su vez favorezcan a los cultivos, sin comprometer la biodiversidad existente. Una de estas alternativas es, la biorremediación de suelos, la cual es una técnica basada en el uso de organismos vivos, como microorganismos, plantas, algas y hongos, los cuales trabajan para eliminar, neutralizar o transformar contaminantes presentes en los suelos, como son los herbicidas (Cota-Ruiz et al., 2019). La bioestimulación es una de las técnicas de remediación de suelos en la cual se adicionan macro y micronutrientes al suelo para estimular el crecimiento microbiano y así aumentar la población de microorganismos capaces de degradar compuestos recalcitrantes (López et al., 2016). El objetivo del presente estudio fue evaluar de manera preliminar el potencial de la bioestimulación microbiana en un suelo agrícola (MAM) contaminado con paraquat (PQ). Para este propósito, se incorporaron sales de sulfatos (SO_4^{2-}) y nitratos (NO_3^-) como aceptores de electrones y fuentes de nitrógeno (N) y azufre (S), con el fin de favorecer la actividad metabólica de los microorganismos presentes en el suelo (Hsia et al., 2021). Asimismo, se llevó a cabo el trasplante de *Agave salmiana* subsp. *crassispina* como indicador biológico de tolerancia al PQ durante la fase inicial del tratamiento de bioestimulación. Este trabajo constituye una etapa exploratoria destinada a generar información base que contribuya al diseño de un proyecto más amplio orientado a optimizar estrategias de remediación sustentable en suelos agrícolas contaminados con herbicidas persistentes.

Metodología

Área de estudio y muestreo de suelo

El muestreo de suelo se llevó a cabo en un terreno agrícola destinado al cultivo de maíz, ubicado en la comunidad de El Copal, municipio de Irapuato, Guanajuato. Las coordenadas geográficas del sitio de muestreo son: 20°44'28.5"N 101°19'20.3"W (Figura 1). Se recolectaron 15 submuestras individuales de suelo a una profundidad de entre 20 y 30 cm, siguiendo un patrón de recorrido en zigzag de acuerdo con lo establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000. Las submuestras se mezclaron y homogeneizaron hasta obtener una muestra representativa de 10 kg. Posteriormente, se procedió al secado de la muestra compuesta durante una semana a temperatura ambiente, luego a la molienda y, por último, al tamizado de la muestra con malla N° 12.



Figura 1. Sitio de muestreo, muestras de suelo postcosecha en parcela previamente sembrada con maíz.
Fuente: Imagen tomada de Google Earth Pro (Google, 2025).

Caracterización físicoquímica del suelo

La caracterización físicoquímica del suelo se llevó a cabo en el Laboratorio de Tecnologías para la Sustentabilidad (LATESUG®) en la División de Ciencias de la Vida, de la Universidad de Guanajuato. La metodología empleada fue la reportada por la norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Cada determinación se realizó por triplicado. El contenido de humedad (W) de los suelos se determinó mediante el método gravimétrico, calculando la diferencia de peso entre la muestra de suelo húmeda y después de haberse secado en una estufa a 105 °C durante 24 h. La clase textural de los suelos se calculó por el método de Bouyoucos, removiendo previamente la materia orgánica del suelo con peróxido de hidrógeno al 30%, posteriormente se agregaron tres agentes dispersantes los cuales fueron: oxalato de sodio, metasilicato de sodio y hexametáfosfato de sodio, para individualizar las partículas de arcilla y posteriormente se realizaron lecturas de la temperatura y del hidrómetro a un tiempo de 40 s y 2 h. La determinación de la clase textural se realizó con base en el triángulo de texturas del USDA (United States Department of Agriculture). La densidad aparente (DA) se calculó por el método de la probeta a partir del conocimiento de la masa del suelo y el volumen total medido en probetas de 50 ml y 100 ml. La densidad real (DR) se determinó mediante el método AS-04 (método del picnómetro), con la masa y el volumen total de suelo. La porosidad (Pt) también fue calculada con el uso de la densidad real y aparente.

El valor de pH se obtuvo mediante el método potenciométrico, utilizando una suspensión suelo-agua en proporción 1:2 y un potenciómetro marca Oakton. La conductividad eléctrica (CE) se midió con un equipo Conductronic CL8. El contenido de materia orgánica (MO) se determinó aplicando la técnica de pérdida por ignición (PPI) a 550 y 1000°C, así como el método de combustión húmeda propuesto por Walkley y Black (1934) (López-Pérez et al., 2018).

El contenido de sulfatos (SO_4^{2-}), nitratos (NO_3^-), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) en las muestras de suelo se determinó utilizando un fotómetro multiparámetro (HI83099 COD, Hanna Instruments). Para cada análisis, se pesaron 10 g de suelo seco, los cuales fueron extraídos con agua destilada mediante agitación constante y posterior filtrado. Las lecturas se realizaron según las instrucciones del fabricante, empleando los reactivos específicos para cada ión (HI93751-01 Sulfate, HI93728-01 Nitrate, HI93752A-Ca, HI93752A-Mg).

Evaluación de parámetros biológicos del suelo

Se analizó la actividad enzimática de lacasa y manganoso peroxidasa como un indicador indirecto de la presencia de microorganismos involucrados en la degradación de la materia orgánica del suelo. Para evaluar estas enzimas presentes en el suelo agrícola MAM, se realizó un extracto enzimático que se obtuvo agitando 1 g de suelo en 5 mL de buffer succinato de sodio 20 mM por 30 min a 150 rpm (Luz et al., 2012). Se tomaron alícuotas de 1 mL aproximadamente y se pasaron a tubos eppendorf para después centrifugar a 10,000 rpm por 5 min en una centrífuga 5804 R eppendorf. La actividad enzimática de lacasa se determinó utilizando una mezcla de reacción (1.0 mL) compuesta por 900 µL de tampón de acetato de sodio 50 mM (pH 4.5), 50 µL 1.8 mM del sustrato 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS) y 50 µL de extracto enzimático suficiente para iniciar la reacción (Liu et al., 2009). La incubación se realizó a temperatura ambiente durante 1 minuto, tras lo cual se midió la absorbancia a 420 nm utilizando un espectrofotómetro UV-2505 (Labomed, Inc.). La actividad de la enzima manganoso peroxidasa se obtuvo utilizando una mezcla de reacción que

contenía 100 μL de rojo de fenol al 0.01%, 200 μL de lactato de sodio 25 mM, 50 μL de MNSO_4 100 μM , 300 μL de albúmina de huevo al 0.1%, 100 μL de H_2O_2 100 μM en 1 ml de buffer de succinato de sodio 20 mM, 100 μL del extracto enzimático y 150 μL de H_2O destilada. La reacción se llevó a cabo a 30°C por 5 min y se detuvo con 40 μL de NaOH 2 N, la absorbancia fue leída a 610 nm (Kuwahara et al., 1984).

La densidad de bacterias presentes en el suelo MAM se determinó mediante el método de diluciones seriadas y conteo en placa. Los resultados obtenidos se expresaron en unidades formadoras de colonias (UFC g^{-1} de suelo seco). Para ello, se inocularon alícuotas de las diluciones en placas con medio nutritivo Agar PDA. Posteriormente, las placas se incubaron a temperatura ambiente (25°C) durante 24 horas, y se contó el número de colonias formadas (Goldman & Green, 2008).

Plántulas de agave

El Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales (LCTV-UG) de la División de Ciencias de la Vida proporcionó las plántulas de agave para la presente investigación. Las plántulas fueron obtenidas de semillas de *Agave salmiana* subsp. *crassispina* colectadas en la comunidad de Ex Hacienda El Copal, Irapuato, Guanajuato. Las plántulas se mantuvieron a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ y una intensidad de luz de 30 micro moles por metro cuadrado por segundo ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) en condiciones de día largo, con fotoperiodo de 16/8 horas en cuarto de cultivo. Las plántulas fueron trasplantadas aproximadamente a las 5 semanas de germinación a los tratamientos del presente trabajo.

Diseño experimental

Se implementó un diseño experimental completamente al azar (DCA) con cinco repeticiones por tratamiento. Cada unidad experimental consistió en una maceta que contenía 150 g de suelo agrícola MAM y dos plántulas de *Agave salmiana* subsp. *crassispina*. Se evaluaron seis tratamientos, definidos en función de la concentración de PQ y la aplicación de sales inorgánicas, cuyas combinaciones se describen detalladamente en la Tabla 1. Las unidades experimentales se asignaron aleatoriamente a los tratamientos para minimizar sesgos y asegurar la validez estadística de los resultados. Durante todo el experimento, se mantuvieron controladas las condiciones ambientales, incluyendo humedad del suelo al 35 % de la capacidad de campo, temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ e intensidad lumínica de 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, con el fin de reducir la variabilidad no deseada.

Tabla 1. Tratamientos experimentales aplicados al suelo MAM.

Tratamiento 150 g de suelo	PQ mg/kg	NO_3^- mg/L	SO_4^{2-} mg/L
T1	-	-	-
T2	5	-	-
T3	10	-	-
T4	-	15	50
T5	5	15	50
T6	10	15	50

Fuente: Elaboración propia.

Determinación de Paraquat (PQ)

Las muestras de suelo, tanto previas al inicio del tratamiento como a las dos semanas de aplicación, fueron enviadas a un laboratorio particular, donde se realizó la determinación cuantitativa del herbicida (PQ) utilizando un método acreditado de cromatografía de masas-masas. Adicionalmente, la concentración de PQ se evaluó mediante espectrofotometría UV-VIS. Para el presente proyecto se usó una solución de PQ comercial marca UPROQUAT® (200 g/L). A partir de esta solución se prepararon las disoluciones para la curva de calibración a una concentración de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 mg/L de PQ. La reacción se llevó a cabo en una celda de cuarzo de 3 ml añadiendo la solución de PQ (200 μL), 0.9 ml de NaOH 2M, 0.9 ml de EDTA al 5% y 1.2 ml de ácido ascórbico al 0.4%. Se recomienda añadir el reactivo reductor a las soluciones de PQ

justo antes de realizar las mediciones con el fin de evitar la transformación de PQ a diquat (DQ), ya que causaría alteraciones en la concentración real de PQ. Todas las soluciones fueron preparadas con agua destilada. Las medidas de absorbancia se realizaron por triplicado en un espectrofotómetro UV-VIS (UV-2505 de Labomed, Inc.), a una longitud de onda de 600 nm (Gutiérrez et al., 2024). Las concentraciones de PQ utilizadas en los suelos a tratar fueron de 5 y 10 mg por kg (Tabla 1).

Resultados y Discusión

El suelo agrícola postcosecha de maíz (MAM) presentó 29.81% de arena, 18.19% de limo y 52% de arcilla (Tabla 2). De acuerdo con el triángulo textural USDA, esta composición clasifica al suelo como arcilloso. Este tipo de suelos se caracterizan por mantener una elevada capacidad de retención hídrica y de nutrientes, asimismo, presentan una limitada permeabilidad y aireación, cuando se humedece, presenta una textura pegajosa y compacta (Song et al., 2025).

El contenido de W_1 fue de 8.49% al momento de la toma de muestra y de 4.731% (W_2) secado a temperatura ambiente durante una semana (Tabla 2), esto sugiere una baja disponibilidad hídrica en el momento del muestreo. La DA fue de 1.11 g/cm³, valor dentro del rango esperado para los suelos minerales con textura arcillosa (Chaudhari et al., 2013). El valor obtenido para la DR fue de 2.29 g/cm³ (Tabla 2), indicando así mismo predominio de minerales de arcilla (Becerra, 2023; Porta et al., 2003).

Tabla 2. Propiedades físicas del suelo agrícola MAM.

Suelo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural	W_1 (%)	W_2 (%)	DR (g/cm ³)	DA (g/cm ³)	Pt (%)
MAM	29.81 ± 1.59	18.19 ± 0.83	52 ± 2	Arcilloso	8.49 ± 0.25	4.731 ± 0.053	2.290 ± 0.167	1.11 ± 0.017	51.856 ± 4.127

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados experimentales.

La muestra MAM presentó un pH de 7.7 (Tabla 3) caracterizado como medianamente alcalino de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, que es común en suelos agrícolas. Este valor está relacionado con una alta disponibilidad de nutrientes esenciales (N, P, K, Ca, Mg), y favorece la actividad microbiana del suelo (Porta et al., 2010). El valor de CE fue de 302 µS/cm, lo cual representa un nivel bajo de salinidad, beneficioso para el desarrollo de cultivo del agave en el suelo. El contenido de MO fue de 5.72 % (Tabla 3), lo cual indica que, el suelo agrícola (MAM) presenta un contenido medio de MO, esto según con la tabla de clasificación de los niveles de materia orgánica de suelo (Porta et al., 2010).

Tabla 3. Propiedades químicas del suelo agrícola MAM al inicio del tratamiento.

Suelo	pH	CE µS/cm	MO (%)	PPI 550 (%)	PPI 1000 (%)	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L
MAM	7.7 ± 0.0	302 ± 10	5.72 ± 0.70	4.731 ± 0.053	1.831 ± 0.064	38 ± 7.6	4.4 ± 2.03	90 ± 10	13.3 ± 5.8

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados experimentales.

Los contenidos de sulfatos (SO₄²⁻) y nitratos (NO₃⁻) fueron de 38 y 4.4 mg/L, respectivamente (Tabla 3). La concentración de sulfatos se encuentra en el límite superior del rango considerado óptimo para suelos agrícolas (10–40 mg/L), lo que indica una disponibilidad adecuada de azufre para las plantas (Jones, 2001). Por otro lado, el nivel de nitratos es inferior a los valores habitualmente reportados en suelos agrícolas sin fertilización (5–20 mg/L), lo que sugiere una posible limitación de nitrógeno disponible o una baja acumulación en el suelo tratado (Brady & Weil, 2010). La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos del suelo MAM en el tratamiento T6 (descrito en la Tabla 1). Se observa un aumento en los contenidos de sulfatos y nitratos, lo cual se atribuye a su adición como estrategia de bioestimulación microbiana. Por otro lado, el contenido de Ca se mantuvo sin cambios, mientras que el Mg presentó una disminución. Mientras que el pH del suelo mostró una disminución, pasando de un rango medianamente alcalino a neutro, lo cual podría atribuirse a una ligera acidificación inducida por la aplicación de los bioestimulantes y del herbicida PQ (Becerra, 2023).

Tabla 4. Propiedades químicas del suelo MAM tratamiento T6 (Tabla 1) a las 4 semanas de inicio.

Suelo	pH	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L
MAM	7.1 ± 0.1	73.3 ± 2.88	7.6 ± 0.8	90 ± 20	6.7 ± 2.9

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados experimentales.

Determinación de PQ

El PQ no fue detectado en el suelo sin tratar, ni en el suelo contaminado y con tratamiento por el método de cromatografía de masas-masas. Así mismo no se detectó con el método espectrofotométrico. Sin embargo, se obtuvo una curva de calibración confiable a partir de las disoluciones estándar de PQ (Figura 2). Cabe mencionar que, la cuantificación del herbicida en los extractos de suelo no fue reproducible, posiblemente debido a la fuerte adsorción del PQ a las partículas coloidales del suelo, especialmente a minerales con carga negativa como las arcillas y la materia orgánica (Gutiérrez et al., 2024). Esta alta afinidad impide su recuperación eficiente mediante métodos convencionales de extracción (Burns et al., 1973). A pesar de aplicar diversos reactivos extractantes (NaCl 0.1 M, NaOH 0.1 M, NH₄Cl 5.35 g/L y HCl 0.1 M), en combinación con agitación, centrifugación, sonicación y lavados múltiples, la recuperación del compuesto fue insuficiente (Rajaram & Neelakantan, 2023; Sangsum & Saetear, 2022). Este fenómeno se debe a que el PQ forma enlaces electrostáticos estables con los componentes del suelo, reduciendo su movilidad y disponibilidad para análisis químicos (Amondham et al., 2006; Mehdi et al., 2009).

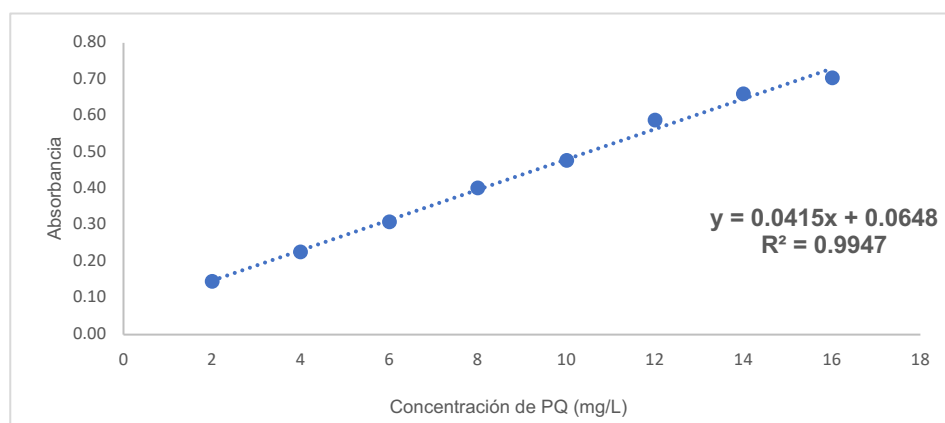


Figura 2. Curva de calibración para determinar la concentración de PQ en las muestras de suelo.
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados experimentales.

Actividad enzimática

Los resultados obtenidos muestran que la actividad enzimática de lacasa fue muy baja ($3.70\text{E-}6 \text{ U/mL} \pm 1.16\text{E-}6$). En el caso de la peroxidasa, se observaron valores aún más bajos ($1.66\text{E-}7 \text{ U/mL} \pm 7.84\text{E-}8$), lo cual refleja una actividad enzimática prácticamente nula bajo las condiciones evaluadas (Mendoza-Arceo et al., 2024). Esta baja actividad podría atribuirse a varios factores, entre ellos: la posible inhibición enzimática ocasionada por la presencia residual agroquímicos en el suelo, que pueden interferir con procesos oxidativos microbianos; la escasa biomasa microbiana activa como consecuencia de condiciones fisicoquímicas desfavorables, o bien a un tiempo de incubación insuficiente para detectar respuestas enzimáticas detectables. Estos factores en conjunto podrían haber limitado la expresión de las enzimas, resultando en niveles bajos de actividad medible (Kuwahara et al., 1984; Luz et al., 2012).

Unidades formadoras de colonia del suelo MAM

En la cuantificación microbiana mediante el conteo de unidades formadoras de colonia (UFC), se obtuvo un promedio de 50.5 colonias en placas sembradas con la dilución 10^{-3} , utilizando un volumen de siembra de 0.1 mL (Figura 3). Este resultado equivale a una densidad microbiana estimada de 5.05×10^5 UFC por gramo de suelo. Generalmente en suelos agrícolas con buen estado físico-químico y microbiológico, las poblaciones bacterianas suelen superar los 10^6 – 10^7 UFC/g de suelo seco (Sánchez-Yáñez et al., 2022). En contraste, suelos degradados o sometidos a prácticas agrícolas intensivas presentan poblaciones significativamente menores, frecuentemente por debajo de 10^5 UFC/g, lo que refleja una disminución en la actividad biológica y fertilidad del suelo (Hernández-Flores et al., 2013). Por otro lado, en un estudio similar realizado por Dagze et al. (2021), se han identificado especies bacterianas y fúngicas como *Staphylococcus* sp., *Micrococcus* sp., *Pseudomonas* sp., *Escherichia coli*, *Bacillus* sp., *Actinomyces bovis*, *Actinomyces israeli*, *Streptomyces* sp., *Aspergillus fumigatus*, *A. niger*, *A. flavus*, *Absidia corymbifera* y *Rhizopus stolonifer* en suelos tratados con diferentes concentraciones de PQ. En dicho estudio, la aplicación del herbicida alteró significativamente la microbiota, observándose la ausencia de varias especies en los suelos tratados, en comparación con los suelos control (Dagze et al., 2021), hasta el momento, los microorganismos presentes en el suelo (MAM) no han sido identificados molecularmente, por lo que su caracterización taxonómica y funcional permanece pendiente. Se prevé que el tratamiento de bioestimulación aplicado genere modificaciones relevantes en la composición y actividad microbiana de los suelos tratados, lo cual será verificado en etapas posteriores. Cabe señalar que el experimento de bioestimulación se encuentra aún en desarrollo, por lo que no se ha realizado el conteo de UFC en el suelo tratado ni la identificación molecular de los microorganismos asociados. Estos análisis forman parte de la siguiente fase de investigación, la cual permitirá evaluar con mayor precisión la evolución y dinámica de la comunidad microbiana bajo condiciones de bioestimulación. Este estudio constituye una aproximación inicial que sienta las bases para la continuidad del proyecto en un esquema más amplio de evaluación microbiológica y ambiental.

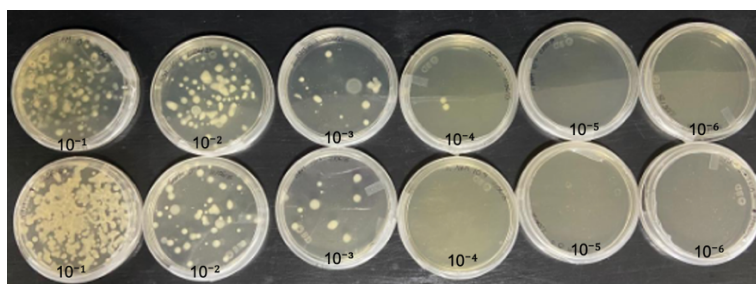


Figura 3. Placas de cultivo para el conteo de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) del suelo MAM al inicio del experimento.
Fuente: Fotografía de elaboración propia.

Efecto del PQ en las plántulas de agave

En la Tabla 6 se presenta la medición de altura de las plántulas de agave. Al momento del trasplante, las plantas medían entre 1.5 y 6 cm, y no se observaron cambios morfológicos significativos entre los tratamientos después de cuatro semanas, que era lo esperado dado la etapa de crecimiento en la que se encuentran (fase de establecimiento, etapa de plántula en desarrollo temprano) (Vázquez Díaz et al., 2011). Sin embargo, algunas plantas no sobrevivieron en los siguientes casos: T1-Repeticón 3, T4-Repeticón 3, T4-Repeticón 4 y T5-Repeticón 5. No obstante, esta mortalidad no es representativa del tratamiento ya que solo se presentó en una plántula de las réplicas. Esta mortalidad se atribuye principalmente al estrés hídrico y a la compactación del suelo arcilloso, porque esta etapa de crecimiento inicial es crítica y cualquier estrés ambiental puede afectar significativamente el desarrollo (Pérez Rivera, 2025).

Tabla 6. Medición de altura de plántulas de agave al inicio del tratamiento (A y B representan la plántula 1 y 2 respectivamente en cada unidad experimental)

Tratamiento	Repetición (medida cm de la plántula)									
	R1		R2		R3		R4		R5	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
T1	5.0	3.5	4.7	1.7	5.0	3.5	5.0	3.8	5.0	3.5
T2	3.0	3.2	3.0	3.2	4.9	3.5	4.7	4.0	3.6	3.7
T3	3.5	4.6	4.1	3.8	5.3	6.0	4.6	4.3	4.8	3.0
T4	4.7	5.0	3.1	3.8	4.8	3.3	3.7	3.0	3.0	4.1
T5	5.2	5.0	4.5	3.0	4.5	3.1	4.0	3.9	4.5	3.8
T6	4.2	3.3	4.2	4.5	4.2	20	4.0	3.7	3.8	2.7

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados experimentales.

La Figura 4 muestra las unidades experimentales al inicio del experimento y tras cuatro semanas de tratamiento con bioestimulación. Durante este intervalo, no se registraron modificaciones en la altura de las plántulas, lo cual es consistente con su estado de desarrollo, correspondiente a la fase juvenil. Esta etapa puede prolongarse de uno a tres años, dependiendo de factores como el régimen de riego, las propiedades del suelo y las condiciones climáticas (Vázquez Díaz et al., 2011). Cabe destacar que el presente estudio corresponde a una fase inicial y que el tratamiento de bioestimulación está programado para completarse en un periodo de tres meses.



Figura 4. Efecto del PQ en plantas: diseño experimental con repeticiones. (Figura izquierda inicio del tratamiento, Figura derecha el tratamiento a las 4 semanas de inicio). Fuente: Fotografías de elaboración propia.

Conclusiones

El paraquat residual no ejerce un efecto directo sobre la planta, su principal influencia se manifiesta sobre la microbiota del suelo, afectando la fertilidad edáfica, lo que subraya la importancia de estrategias de biorremediación para restaurar la salud del suelo. Los resultados preliminares de este estudio sugieren que la bioestimulación es una estrategia viable y prometedora para la recuperación de suelos agrícolas contaminados con herbicidas como el paraquat, especialmente en sistemas productivos de agave. Aunque aún se encuentran en curso análisis complementarios, se ha observado que *Agave salmiana* subsp. *crassispina* tolera concentraciones elevadas de este compuesto sin mostrar efectos morfológicos adversos durante las primeras semanas de exposición. La imposibilidad de detectar paraquat mediante métodos convencionales refuerza la hipótesis de su fuerte adsorción en suelos arcillosos, lo que motiva el uso de técnicas analíticas más sensibles en futuras etapas del estudio. La detección de microorganismos viables en el suelo desde el inicio del tratamiento, así como la ligera disminución en la concentración de magnesio,

podrían estar vinculadas a procesos tempranos de proliferación microbiana. Aunque la actividad enzimática fue mínima, se prevé que esta respuesta se incremente conforme avance el tratamiento y se establezcan las condiciones edáficas.

En conjunto, los resultados obtenidos en esta fase preliminar respaldan el potencial de la bioestimulación microbiana como una estrategia sustentable y funcional para la remediación de suelos agrícolas contaminados con herbicidas. Más allá de los beneficios inmediatos observados, este enfoque biotecnológico ofrece ventajas relevantes tanto para la restauración de la funcionalidad del ecosistema edáfico como para la continuidad productiva de cultivos de importancia estratégica como el agave.

El uso de recursos biológicos propios del suelo para activar procesos de degradación natural de contaminantes representa una alternativa prometedora frente a los desafíos actuales de la contaminación agroquímica. Estos hallazgos sientan las bases para el desarrollo de un proyecto más amplio, que integre herramientas analíticas avanzadas, ensayos a mayor escala y seguimiento a largo plazo, con miras a consolidar soluciones técnicamente viables, ambientalmente responsables y accesibles para su implementación en contextos agrícolas reales.

Referencias

- Amondham, W., Parkpian, P., Polprasert, C., Delaune, R., & Jugsujinda, A. (2006). Paraquat Adsorption, Degradation, and Remobilization in Tropical Soils of Thailand. *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 41(5), 485–507. <https://doi.org/10.1080/03601230600701635>
- Bakry, F. A., Eleiwa, M. E., Taha, S. A., & Ismil, S. M. (2016). Comparative toxicity of Paraquat herbicide and some plant extracts in *Lymnaea natalensis* snails. *Toxicology and Industrial Health*, 32(1). <https://doi.org/10.1177/0748233713498457>
- Becerra, J. C. (2023). *Fertilizantes químicos y su relación en el deterioro de suelos del Caserio Salinas, Bagua, 2022* [Repositorio de la Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/36302>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2010). *Elements of the nature and properties of soils* (3rd ed.). Pearson. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781292052083_A24582024/preview-9781292052083_A24582024.pdf
- Burns, I. G., Hayex, M. H. B., & Stacey, M. (1973). Some physico-chemical interactions of paraquat with soil organic materials and model compounds. *Weed Research*, 13(1), 79–90. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1973.tb01248.x>
- Chaudhari, P. R., Ahire, D. V., Ahire, V. D., Chkravarty, M., & Maity, S. (2013). Soil bulk density as related to soil texture, organic matter content and available total nutrients of Coimbatore soil. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(2), 1–8. <https://www.ijsrp.org/research-paper-0213.php?rp=P14721>
- Colunga-García Marín, P., Zizumbo-Villarreal, D., & Martínez, J. (2007). Tradiciones en el aprovechamiento de los agaves mexicanos: una aportación a la protección legal y conservación de su diversidad biológica y cultural. *En Lo Ancestral Hay Futuro: Del Tequila, Mezcales y Otros Agaves*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5192.1441>
- Cota-Ruiz, K., Nuñez-Gastelúm, J. A., Delgado-Rios, M., & Martinez-Martinez, A. (2019). Biorremediación: Actualidad de conceptos y aplicaciones. *Biotechnia*, 211, 37–44. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v21i1.811>
- Dagze, J. K., Ishaku, B. C., & Dlama, T. T. (2021). Monitoring and Assessment of the Microbial Populations and Chemical Characteristics of Paraquat Treated Soil. In *Cutting-edge Research in Agricultural Sciences Vol. 6*. <https://doi.org/10.9734/bpi/cras/v6/1438d>
- Fregoso-Zamorano, B. E., Mancilla-Villa, O. R., Guevara-Gutiérrez, R. D., Moreno-Hernández, A., Figueroa-Bautista, P., Can-Chulim, Á., Hernández-Vargas, O., Cruz-Crespo, E., Ortega-Escobar, H. M., Khalil Gardezi, A., & Villalvazo-López, V. M. (2023). Caracterización edafológica con cultivo de agave azul (*Agave tequilana* Weber) en Tonaya y Tuxcacuesco, Jalisco, México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1592>
- García-Barrón, S. E., Hernández, J. de J., Gutiérrez-Salomón, A. L., Escalona-Buendía, H. B., & Villanueva-Rodríguez, S. J. (2017). Mezcal y Tequila: análisis conceptual de dos bebidas típicas de México. *Revista Iberoamericana de Viticultura, Agroindustria y Ruralidad*, 4(12), 138–162. <http://redalyc.org/pdf/4695/469552915009.pdf>
- García-Ocaña, M., Ramírez-Sánchez, S., Ireta-Moreno, J., Rodríguez-Navarro, S., Tamayo-Esquer, L., & Arispe-Vazquez, L. (2024). Coberturas en control de malezas en cultivo de agave en los Altos de Jalisco. *Abanico Boletín Técnico*, 3. <https://abanicoacademico.com/abanico-boletin-tecnico/articulo/view/216>
- Goldman, E., & Green, L. (2008). *Practical handbook of microbiology* (Segunda edición). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420009330>
- Google. (2025). *Google Earth Pro [Software]*. Google LLC. <https://www.google.com/earth/>

- Gutiérrez, L. D. C. M., Acevedo, C. M. C., Adrian, A. M. U., & Duarte, P. L. P. (2024). Determinación de residuos de PARAQUAT en maíz por espectrofotometría UV-visible, fincas de la provincia La Vega, República Dominicana. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo* 1, 141(1), 85–97. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v14i1.17700>
- Hernández-Flores, L., Munive-Hernández, J. A., Sandoval-Castro, E., MartínezCarrera, D., & Villegas-Hernández, Ma. C. (2013). Efecto de las prácticas agrícolas sobre las poblaciones bacterianas del suelo en sistemas de cultivo en Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(3). <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263127575002.pdf>
- Hsia, K. F., Chen, C. C., Ou, J. H., Lo, K. H., Sheu, Y. T., & Kao, C. M. (2021). Treatment of petroleum hydrocarbon-polluted groundwater with innovative in situ sulfate-releasing biobarrier. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126424. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126424>
- Jones, J. B. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420025293>
- Kuwahara, M., Glenn, J. K., Morgan, M. A., & Gold, M. H. (1984). Separation and characterization of two extracellular H₂O₂-dependent oxidases from ligninolytic cultures of *Phanerochaete chrysosporium*. *FEBS Letters*, 169(2). [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(84\)80327-0](https://doi.org/10.1016/0014-5793(84)80327-0)
- Liu, L., Lin, Z., Zheng, T., Lin, L., Zheng, C., Lin, Z., Wang, S., & Wang, Z. (2009). Fermentation optimization and characterization of the laccase from *Pleurotus ostreatus* strain 10969. *Enzyme and Microbial Technology*, 44(6–7). <https://doi.org/10.1016/j.enzmitec.2009.02.008>
- López, E., Cisneros, S., & Ochoa, J. (2016). Procesos de bioestimulación para la remediación de suelos agrícolas contaminados con tebuconazol y λ -cialotrina. *Revista de Simulación y Laboratorio*, 3(8), 1–9. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Simulacion_y_Laboratorio/vol3num8/Revista_de_Simulacion_y_Laboratorio_V3_N8_1.pdf
- López-Pérez, M. E., Del Rincón-Castro, M. C., Muñoz-Torres, C., Ruiz-Aguilar, G. M. L., Solís-Valdez, S., & Zanor, G. A. (2018). Evaluación de la contaminación por elementos traza en suelos agrícolas del suroeste de Guanajuato, México. *Acta Universitaria*, 27(6), 10–21. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1386>
- Luz, J. M. R. D., Nunes, M. D., Paes, S. A., Torres, D. P., Silva, M. D. C. S. D., & Kasuya, M. C. M. (2012). Lignocellulolytic enzyme production of *Pleurotus ostreatus* growth in agroindustrial wastes. *Brazilian Journal of Microbiology*, 43, 1508–1515. <https://doi.org/10.1590/S1517-838220120004000035>
- Mehdi, S., Halimah, M., Nashriyah, M., & Ismail, B. S. (2009). Adsorption and desorption of paraquat in two Malaysian agricultural soils. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 3(3). <https://www.aensiweb.net/AENSIWEB/aejsa/aejsa/2009/555-560.pdf>
- Mendoza-Arceo, A., Chan-Cupul, W., Osuna-Castro, J. A., & Carrillo-Díaz, M. I. (2024). Actividad enzimática ligninolítica de dos poblaciones de *Ganoderma* spp. en interacción con *Trichoderma* spp. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 40. <https://doi.org/10.20937/RICA.54451>
- Montero Rojas, M. (2018). Consecuencias ambientales y riesgos para la salud causados por el plaguicida Paraquat en Costa Rica. *Pensamiento Actual*, 18(30), 56–66. <https://archivo.revistas.ucr.ac.cr/index.php/pensamiento-actual/article/view/33812>
- Pérez Rivera, M. F. (2025). *Análisis de la respuesta de germinación y desarrollo inicial de plántulas de Agave salmiana bajo tres sustratos* [Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. <https://repositorio.uaan.mx/xmlui/handle/123456789/50101>
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Poch, M. R. (2010). *Introducción a la Edafología, Uso y protección de suelos*. Mundi-Prensa. <https://latam.casadellibro.com/libro-introduccion-a-la-edafologia-uso-y-proteccion-de-suelos-2-ed/9788484764052/1808323>
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero de Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa. <https://es.scribd.com/document/601573424/Edafologia-Para-La-Agricultura-y-El-Medio-Ambiente-3era-Edicion-2003-J-Porta-C-M-Lopez-Acevedo-R-C-Roquero-L>
- Rajaram, R., & Neelakantan, L. (2023). Recent advances in estimation of paraquat using various analytical techniques: A review. *Results in Chemistry*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100703>
- Sánchez-Yáñez, J. M., Velázquez-Medina, A., Cabrera-Reinaldo, I., Amador-Vargas, W. L., & Vela-Muzquiz, G. R. (2022). Supervivencia de *Azotobacter* y otros grupos microbianos en suelo seco almacenado. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 13(1), 3–15. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2022.130100003>
- Sangsum, C., & Saetear, P. (2022). All-Step-in-One Test Kit for Paraquat Detection in Water and Vegetable Samples. *Analytica*, 3(1). <https://doi.org/10.3390/analytica3010007>
- Shah, D. (2024). *Generic Pesticides Dominate Global Top 20 Selling List: CCFI Chairman Deepak Shah*. https://www.global-agriculture.com/crop-protection/generic-pesticides-dominate-global-top-20-selling-list-ccfi-chairman-deepak-shah/?utm_source=chatgpt.com

- Song, Z., Gui, Y., Hua, L., Yuan, S., & Hu, R. (2025). Investigation of the Water Retention Characteristics and Mechanisms of Organic Clay. *Water*, 17(3), 286. <https://doi.org/10.3390/w17030286>
- Vázquez Díaz, E., García Nava, J. R., Peña Valdivia, C. B., Ramírez Tobías, H. M., & Morales Ramos, V. (2011). Tamaño de la semilla, emergencia y desarrollo de la plántula de maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34(3), 1671–1673. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802011000300007
- Viales López, G. (2014). Intoxicación por paraquat. *Medicina Legal de Costa Rica*, 31(2), 88–94. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1409-00152014000200009&script=sci_abstract&tlng=es