



Impacto del glifosato en la liberación de CO₂ de suelos cultivados con caña de azúcar †

[Impact of glyphosate on CO₂ release from soils cultivated with sugarcane]

Angel de Jesus Isidoro-Pio¹; María del Refugio Castañeda-Chavez²;
Eusebio Ortega-Jiménez¹; Gustavo López-Romero¹;
Joel Velasco-Velasco³ and Catalino Jorge López-Collado^{1*}

¹Colegio de Postgraduados campus Veracruz, km 88.5 carretera federal Xalapa-Veracruz, Tepetates, Manlio F. Altamirano, Veracruz. C.P. 91690, México.

Email: isidoro.angel@colpos.mx; ljorge@colpos.mx*; eortegaj@colpos.mx; gustavolr@colpos.mx

²Instituto Tecnológico de Boca del Río, Km.12 Carretera Veracruz-Córdoba C.P.94290. Boca del Río, Ver. Email: mariacastaneda@bdelrio.tecnm.mx

³Colegio de Postgraduados campus Córdoba, km 348 carretera Federal Córdoba-Veracruz, Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94953. Email: joel42ts@colpos.mx

SUMMARY

Background. The effects of glyphosate use and management in sugarcane can create differential impacts on soil biological activity due to the intensive nature of its production. Crops such as sugarcane utilize various compounds like glyphosate, impacting CO₂ release. **Objective.** To evaluate the impact of glyphosate on the biological activity of soils cultivated with sugarcane in the region of Irrigation District 035 in Veracruz, Mexico, by assessing CO₂ release. **Methodology.** A static incubation method using volumetry was employed, in which two treatments were carried out. CO₂ release was evaluated with and without the application of glyphosate. Furthermore, various mathematical models were used to fit the data obtained using CurveExpert Professional® software. **Results.** For the La Antigua region, the Multi Model Framework was used for both treatments, yielding a coefficient of determination (R²) of 0.985 without glyphosate and 0.991 with glyphosate, reaching 50 kg of CO₂ without the herbicide. In the Paso de Ovejas region, the Reciprocal Quadratic (R²=0.952) and Multi Model Framework (R²=0.999) models were used for the treatment without and with glyphosate, respectively, reaching approximately 279 kg of CO₂ without glyphosate application. Finally, in Úrsulo Galván, the Gompertz (R²=0.999) and Hoerl (R²=0.988) models were used for the treatment without and with glyphosate, respectively, reaching approximately 328 kg of CO₂ without glyphosate. **Implications.** Of the two treatments, the application of glyphosate showed an exponential behavior during the first days of incubation; however, the CO₂ release subsequently stabilized and remained almost constant until the end of the incubation period. **Conclusions.** The use of glyphosate is prevalent in sugarcane cultivation within the Irrigation District 035 region, adversely affecting soil biological activity, which is reflected in CO₂ release patterns.

Key words: herbicides; biological activity; contamination; *Saccharum officinarum* L.

RESUMEN

Antecedentes. Los efectos del uso y manejo de glifosato en la caña de azúcar pueden crear impactos diferenciales en la actividad biológica del suelo, debido al carácter intensivo de su producción. Cultivos como la caña de azúcar utilizan diferentes compuestos como el glifosato impactando en la liberación de CO₂. **Objetivo.** Evaluar el impacto del glifosato en la actividad biológica de suelos cultivados con caña de azúcar en la región del Distrito de Riego 035 en Veracruz, México; mediante la evaluación de la liberación de CO₂. **Metodología.** Se utilizó incubación estática, aplicando volumetría, donde se llevaron a cabo dos tratamientos. Se evaluó la liberación de CO₂ sin aplicación y con aplicación de glifosato. Además, se utilizaron diferentes modelos matemáticos para ajustar los datos obtenidos mediante el software CurveExpert Professional®. **Resultados.** Para la región de La Antigua se usaron los modelos Multi Model Framework para ambos tratamientos donde sin glifosatos obtuvo un coeficiente de determinación de 0.985 y con glifosato fue de 0.991, alcanzado los 50 kg de CO₂ sin el herbicida. En la región de Paso de Ovejas se usaron los modelos Reciprocal Quadratic (R²=0.952) y Multi Model Framework (R²=0.999)

† Submitted November 7, 2025 – Accepted May 26, 2026. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6687>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = A.J. Isidoro-Pio: <http://orcid.org/0000-0002-1461-7154>; M.R. Castañeda-Chavez: <http://orcid.org/0000-0002-9209-0431>; E. Ortega-Jiménez: <http://orcid.org/0000-0002-1464-2202>; G. López-Romero: <http://orcid.org/0000-0003-1831-0368>; J. Velasco-Velasco: <http://orcid.org/0000-0003-3854-9376>; C.J. López-Collado: <http://orcid.org/0000-0003-3182-6027>

para el tratamiento sin glifosato y con glifosato respectivamente, alcanzando cerca de 279 kg de CO₂ sin aplicar glifosato. Finalmente, en Úrsulo Galván se usaron los modelos Gompertz ($R^2=0.999$) y Hoerl ($R^2=0.988$) para el tratamiento sin glifosato y con glifosato respectivamente, alcanzando cerca de 328 Kg de CO₂ sin glifosato.

Implicaciones. De los dos tratamientos aplicados, al aplicar glifosato se observa un comportamiento exponencial durante los primeros días de la incubación, sin embargo, la liberación de CO₂ se regula y se mantiene casi constante hasta finalizar la incubación. **Conclusiones.** El cultivo de caña de azúcar en la región del Distrito de Riego 035 está sometido a la utilización de glifosato, esta actividad contribuye a un impacto negativo en la actividad biológica de suelo, tal como la liberación de CO₂ lo visualiza.

Palabras claves: herbicidas; actividad biológica; contaminación; *Saccharum officinarum* L.

INTRODUCCIÓN

En México se estima que la producción agrícola había aportado cerca de 271.9 millones de toneladas durante el año 2022 (SADER, 2023). Lo anterior refleja la importancia de la agricultura como actividad económica en el país, entre los principales cultivos generados a nivel nacional se encuentran el maíz (*Zea mays* L.), el frijol (*Phaseolus vulgaris*), los pastos cultivados (*Poaceae*) y la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) (INEGI, 2022). En la actualidad los cultivos se ven amenazados por la dependencia a diversos insumos agrícolas, como es el caso de los herbicidas. La dinámica entre la intensificación de cultivos y el uso de herbicidas tiene consecuencias diferenciales en el entorno con efectos multidimensionales. Uno de los principales cultivos donde se presenta este fenómeno es el agroecosistema caña de azúcar, y es dentro de éste que se desarrollan prácticas de manejo dependientes a insumos cuyo propósito es potenciar los rendimientos de producción. *S. officinarum* L. es un monocultivo que busca mantener las parcelas libres de malezas que puedan perjudicar el correcto desarrollo vegetativo, por lo tanto, dentro de sus actividades se emplean diversos herbicidas (Putra *et al.*, 2020).

Además del control de plantas indeseables, dentro del cultivo de caña de azúcar se llegan a emplear aplicaciones adicionales a un manejo de control de plagas; y es de esta manera como estos plaguicidas también se utilizan para acelerar el desarrollo de la planta promoviendo la maduración en la caña de azúcar, como es el caso del glifosato (Martinelli *et al.*, 2022). *A priori* el uso de herbicidas genera contaminación en las matrices ambientales del agua y el suelo, donde la permanencia del herbicida dependerá de las características fisicoquímicas del compuesto y las condiciones climáticas-ambientales del entorno (Parven *et al.*, 2025). Algunos herbicidas pueden persistir en el ambiente por tiempos prolongados como el glifosato, esto genera no solo contaminación sino bioacumulación o impactos diferenciales en la actividad microbiológica (Pileggi *et al.*, 2020). El principal mecanismo de acción del glifosato es inhibir la ruta de Shikimato eliminando las malezas indeseables, no obstante, es un herbicida no selectivo por lo que no solo afecta las malezas sino la actividad de hongos, micorrizas y algunos microorganismos (Duke, 2021).

El efecto del glifosato en el suelo no sigue un comportamiento lineal; por el contrario, sus impactos varían en función de las condiciones edáficas y climáticas del entorno. Esta variabilidad está estrechamente relacionada con la diversidad y dinámica de las comunidades microbianas presentes. Por un lado, la aplicación de glifosato puede provocar una disminución en la biomasa o actividad microbiana (Kepler *et al.*, 2020); sin embargo, en otros contextos puede generar un efecto opuesto, estimulando la actividad biológica (Bhaduri *et al.*, 2022). No obstante, un incremento en la actividad biológica del suelo no necesariamente indica una mejora en su salud. Aunque la presencia de microorganismos suele asociarse con efectos positivos, este aumento también puede reflejar un desequilibrio ecológico en la comunidad microbiana (Pertile *et al.*, 2020). En sistemas agrícolas donde la aplicación de glifosato es recurrente, no solo se favorece la aparición de resistencia en las malezas, sino también una adaptación microbiológica. En este sentido, ciertos microorganismos desarrollan la capacidad de utilizar el glifosato como fuente de carbono o fósforo, lo que promueve el crecimiento de especies específicas (Shahid *et al.*, 2023). Como consecuencia, se genera una predominancia de determinados grupos microbianos sobre otros, alterando la estructura y funcionalidad del suelo. Este proceso puede conducir a una reorganización de la comunidad microbiana o incluso a fenómenos de lisis asociados al estrés ambiental inducido por el herbicida (Ahmad *et al.*, 2022).

La presencia de glifosato en suelos disminuye o aumenta la actividad del suelo, no obstante, sea cual sea el caso, la presencia de este herbicida es sinónimo de daño ambiental (Wang *et al.*, 2021). Para evaluar la actividad biológica se pueden utilizar diversas metodologías, una de ellas es por medio de la liberación de CO₂. Esta se basa en el fundamento básico de la respiración biológica, al medir dicha actividad por medio de la cuantificación de CO₂ liberado por la descomposición de la materia orgánica (Franzluebbers, 2021). Este método utiliza suelo sin plantas para realizar mediciones de liberación de CO₂ específica de la actividad biológica de los microorganismos del suelo. En Veracruz, uno de los principales estados en ser productor de caña de azúcar, se ha evidenciado la dependencia a herbicidas como el glifosato. La región cañera de Distrito de Riego 035 es una de las zonas con dependencia a este herbicida, por lo que sus efectos en la actividad biológica pueden ser

considerables. Es por ello que el objetivo de la presente investigación es evaluar el impacto del glifosato en la liberación de CO₂ como indicador de la actividad biológica de suelos cultivados con caña de azúcar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Dentro de la región cañera del Distrito de Riego 035 ubicado en la región central de Veracruz, México, se escogieron localidades en los diferentes municipios. Estas localidades fueron: Chalahuite, Úrsulo Galván (19°28'22", 96°22'19"); El Salmoral, La Antigua (19°20'19", 96°21'05"); El Manantial (19°13'15", 96°22'36") en el municipio de Paso de Ovejas. Los municipios donde se recolectaron las muestras forman parte de la región del Sotavento, donde predomina el clima cálido tropical con lluvias estivales; la topografía se caracteriza por ser plana, con extensas llanuras y la presencia de lomeríos suaves de baja altitud ya que forma parte de la llanura costera del Golfo (Hernández-Pérez *et al.*, 2017).

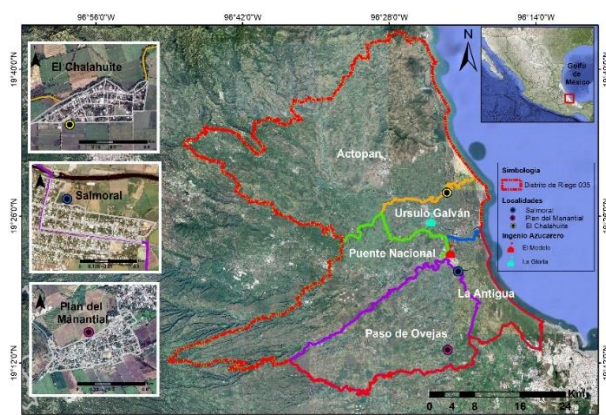


Figura 1. Mapa de la localización del área de estudio.

Recolección de muestras

La recolección de muestra de suelo se llevó a cabo de marzo 2024 a junio 2024. Se recolectaron muestras en cuatro parcelas de las diferentes localidades. Se tomaron muestras entre 1 y 1.5 kg dentro de la parcela en forma diagonal y una en cada borde del cultivo (melga) a una profundidad de 30 cm, por cada parcela, se realizó un triplicado (Teramage *et al.*, 2023). Al finalizar estas muestras se depositaron en una cubeta para homogeneizarlas, y fueron puestas en una bolsa negra para evitar reacción fotosintética.

Pretratamiento

Las muestras fueron puestas a secar en charolas rectangulares planas a temperatura ambiente (25-27°) entre 24 y 72 horas. Las muestras fueron limpiadas de agentes orgánicos (ramas, gravas, plantas raíces) para posteriormente eliminar terrones por medio de la aplicación de fuerza de tensión y posteriormente fueron molidas (He *et al.*, 2019). Se tomaron entre 500 y 700 g de cada muestra, estas se pasaron por un tamiz del número 10 para su posterior análisis.

Análisis de laboratorio

Como variables del suelo se consideraron la textura, la materia orgánica y la capacidad de campo. La textura del suelo se determinó mediante la técnica de Bouyoucos utilizando el software Excel Gradiestat V.8. La cuantificación de la materia orgánica se determinó según la metodología de Walkley y Black para suelos no volcánicos. La determinación de la capacidad de campo se obtuvo aplicando el método de retención de humedad (NOM-021-RECNAT-2000).

Liberación de CO₂

Se evaluó mediante la metodología de incubación estática aplicando el principio de respiración biológica de suelos. Para ello se utilizaron 100 g de suelo en el que previamente se evaluó su capacidad de campo. Mediante la capacidad de campo se agrega la cantidad de retención de humedad en mL al suelo, este se coloca en un vaso de precipitado de 100 mL y se coloca en un contenedor hermético. Adicionalmente al sistema se agregan vaso de 100 mL con 25 mL de agua y un vaso de precipitado con 25 mL de NaOH (1 N) para cerrar el ciclo; para el blanco se usó un vaso sin muestra de suelo. Estos se cierran herméticamente hasta ser evaluados mediante volumetría aplicando titulación de una solución de HCl (0.5 N) hasta el punto de vire (Hu *et al.*, 2023). Las lecturas se llevaron a cabo los días 1, 3, 5, 7, 14 y 28. Se realizaron ensayos hasta el tercer día para comparar el escalamiento. Los ensayos se realizaron con el suelo "natural" y se adicionó una dosis escalada de glifosato, sustituyendo los mL de agua (capacidad de campo, en una relación 1x10⁴:2000 mL). Lo anterior, se realizó con base en la dosis promedio recomendada de glifosato que emplean los productores en sus parcelas (1.3 -1.5 L ha⁻¹). Esto considerando que la densidad aparente del suelo se encuentre entre 1.05 a 1.40 g cm⁻³ bajo condiciones experimentales. Todas las muestras se realizaron por triplicado.



Figura 2. Diseño de incubación por tratamiento

Análisis estadístico

Se le aplicó análisis de varianza (ANOVA) para comparar las medias de los parámetros del suelo y para comparar los datos de liberación de CO₂ entre regiones. A su vez se aplicaron pruebas de comparación de medias por prueba de Tukey ($p < 0.05$) y correlación de Pearson para comparar los datos de 3 días con respecto a los 30 días.

Modelamiento matemático

Con los datos del dióxido carbono liberado se determinó el modelo para ajustar los valores de liberación de dióxido de carbono del suelo utilizando el software CurveExpert Professional®. Se utilizaron los modelos Gompertz (1), Multi Model Framework (MMF) (2), Reciprocal Quadratic (3), Hoerl (4).

$$y = a \exp(-\exp^{(b-cx)}) \quad (1)$$

$$y = \frac{(ab + cx^d)}{(b + x^d)} \quad (2)$$

$$y = \frac{1}{(a + bx + cx^2)} \quad (3)$$

$$y = ab^x x^c \quad (4)$$

Donde Y= g de CO₂ capturado en NaOH; X= tiempo de incubación en días.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de laboratorio

Se realizó la evaluación de tres parámetros de suelo para determinar las condiciones del suelo de las localidades de Chalahuite, Úrsulo Galván; El Salmoral, La Antigua y El Manantial, Paso de Ovejas. Se determinó la textura, el pH y la capacidad de campo. Los parámetros fisicoquímicos del suelo fueron estadísticamente significativos ($p < 0.05$).

Las muestras de la localidad de La Antigua presentan pH más alto en comparación con las muestras pertenecientes a los municipios de Úrsulo Galván y Paso de Ovejas. La mayor parte de los suelos muestreados presentan una textura arcillo-arenoso, las muestras provenientes de La Antigua presentaron textura Franco-arcillosos. La capacidad de campo más alta registrada fue de $72.23 \frac{g_{H_2O}}{g_{suelo}}$.

Parámetros como la capacidad de campo, el pH y la textura pueden influir diferencialmente en la mineralización de CO₂ del suelo. Un pH ideal para diferentes cultivos puede ser indicador que exista una dinámica microbiana que propicie la liberación de CO₂, por otro lado, la capacidad de campo puede influir en la disponibilidad de humedad para el desarrollo de diversos microorganismos (Kuśmierz *et al.*, 2023). Los datos de los parámetros obtenidos en los municipios evaluados se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del suelo en las regiones en los municipios de La Antigua, Paso de Ovejas y Úrsulo Galván.

Localidad	Clave del sitio de muestra	pH	Textura	Capacidad de campo ($\frac{g_{H_2O}}{g_{suelo}}$)
Úrsulo Galván	A – UG	7.52 ± 0.02	Arcillo-arenoso	69.32 ± 0.08
	B – UG	7.42 ± 0.01	Arcillo-arenoso	70.12 ± 0.32
	C – UG	7.52 ± 0.14	Arcillo-arenoso	72.23 ± 0.01
	D – UG	7.61 ± 0.05	Arcillo-arenoso	67.89 ± 0.06
La Antigua	E – LA	8.45 ± 0.02	Franco-arcilloso	43.42 ± 0.92
	F – LA	8.08 ± 0.03	Franco-arcilloso	40.06 ± 0.47
	G – LA	8.27 ± 0.02	Franco-arcilloso	42.79 ± 0.25
	H – LA	8.54 ± 0.03	Franco-arcilloso	42.13 ± 0.87
Paso de Ovejas	I – PO	7.66 ± 0.01	Arcillo-arenoso	67.32 ± 0.00
	J – PO	7.71 ± 0.21	Arcillo-arenoso	64.98 ± 0.03
	K – PO	7.67 ± 0.10	Arcillo-arenoso	62.05 ± 0.19
	L – PO	7.69 ± 0.03	Arcillo-arenoso	63.08 ± 0.26

Evaluación de la liberación de CO₂

El análisis ANOVA muestra que los valores de la liberación de CO₂ (sin tratamiento de glifosato y con aplicación de glifosato) presentan diferencias estadísticas significantes ($p < 0.05$). La liberación de CO₂ en las localidades muestreadas se agruparon con respecto al municipio pertenecientes, para obtener datos resumidos.

Para el tratamiento sin glifosato se observa que la liberación de CO₂ es superior en las tres regiones en comparación con las muestras donde se aplicó el tratamiento con glifosato. Se puede observar que, de las tres regiones, las provenientes de Úrsulo Galván tiene una mayor actividad biológica con respecto a los otros dos municipios. Las muestras pertenecientes al municipio de Paso de Ovejas tienen una liberación de CO₂ similar a las de Úrsulo Galván, alcanzando los 279 y 328 kg de CO₂ al finalizar la incubación respectivamente. Se puede observar que durante los primeros cinco días la liberación de CO₂ se encuentra en una fase inicial, a partir del quinto día para ambos casos empiezan a aparecer picos de crecimiento. Durante los diez días posteriores el incremento en la liberación de CO₂ es exponencial para ambos casos. En cuanto a las muestras pertenecientes a la región de La Antigua se observan una liberación de CO₂ limitada en comparación con los otros municipios evaluado, alcanzando solo 68 kg de CO₂ liberado al finalizar el tratamiento; se observa un crecimiento casi lineal sin fases exponenciales latentes por ende no hay picos de incremento de CO₂ considerables. La poca actividad biológica de esta región puede deberse a la baja presencia de materia orgánica y un pH alcalino. Cuando un suelo tiene un pH alcalino puede propiciar la disminución de la liberación de CO₂, este se debe a fenómenos químicos en las reacciones del

Carbono (Ferdush *et al.*, 2023) y el efecto que el pH genera en la dinámica microbiana (Qi *et al.*, 2018). La mayoría de los microorganismos del suelo prosperan en un rango de pH de neutro a ligeramente ácido, que contribuye a la generación de materia orgánica. El resumen de la liberación de CO₂ para los municipios evaluados se observa en la Figura 3a.

Se aplicó un tratamiento con dosificación de glifosato (1×10^4 :2000 mL) con respecto a la dosificación de glifosato promedio en el cultivo de caña de azúcar. En estas muestras con aplicación de glifosato se evaluó el comportamiento de la liberación de CO₂ durante 30 días. La liberación de CO₂ para los tratamientos con aplicación de glifosato disminuyó en comparación con los resultados obtenidos en la evaluación sin aplicación de este herbicida. Las muestras de los municipios de Paso de Ovejas y Úrsulo Galván presentan una producción de CO₂ mayor en comparación con las muestras de La Antigua. Las muestras pertenecientes a Paso de Ovejas y Úrsulo Galván tienden a incrementar los primeros tres a cinco días, alcanzaron 179 y 176 kg de CO₂ al finalizar la incubación. La diferencia entre la liberación de CO₂ entre ambas zonas se distingue principalmente porque la liberación de CO₂ se produjo exponencialmente en la región de Paso de Ovejas. Por otro lado, las muestras de Úrsulo Galván alcanzan una tasa máxima de liberación entre los días 5 y 15 días de la incubación. En contraste la actividad biológica en la región de La Antigua, medida por la liberación de CO₂, es menor que los otros municipios, teniendo una tasa de liberación de 47 kg de CO₂. En contraste con las muestras sin tratamiento de glifosato, la actividad biológica llega a los 70 kg de CO₂ al alcanzar el periodo máximo de incubación.

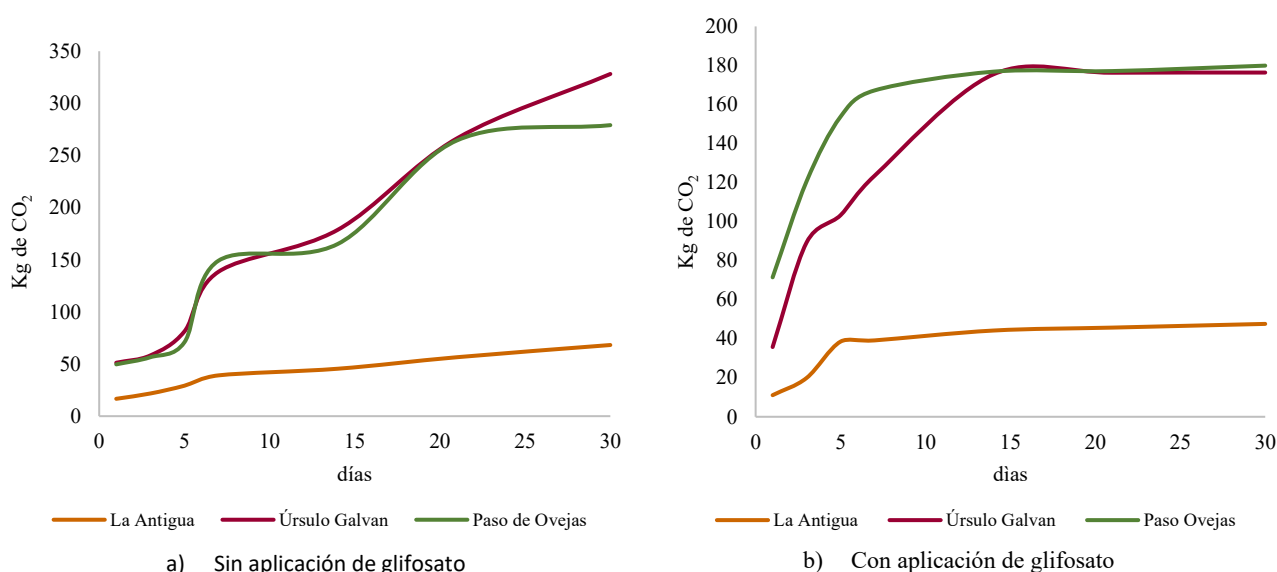


Figura 3. Liberación de CO₂ en los municipios de La Antigua, Paso de Ovejas y Úrsulo Galván, Veracruz, México.

El glifosato inhibe la enzima 5-enolpiruvilshikimato-3-fosfosintasa, la cual es indispensable en el desarrollo vegetativo y también puede afectar hongos y microorganismos. Cuando el glifosato se agrega al suelo este puede acumularse generando contaminación residual o lixivarse a mantos freáticos. No obstante, otra parte del glifosato en el suelo puede servir como fuente de alimento para microorganismos (carbono y fósforo), generando que por un tiempo la actividad biológica aumente (Kepler *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2020). Lo anterior explica cómo es que la liberación de CO₂ para los municipios de Paso de Ovejas y Úrsulo Galván incrementa considerablemente durante los primeros días y luego después de un tiempo prolongado esta actividad alcanza un equilibrio. Incluso para las muestras de La Antigua tienen su incremento durante los primeros cinco días para posteriormente alcanzar una fase estacionaria a lo largo del tiempo de incubación. El resumen de la liberación de CO₂ para los municipios evaluados se observa en la Figura 3b.

Estudios demuestran que evaluar la liberación de CO₂ de suelos ofrece un panorama amplio para conocer la dinámica edáfica. Algunos estudios relacionan la generación de CO₂ con respecto a los organismos edáficos, como es el caso de un estudio realizado en suelos de chinampas antropogénicas donde se evaluó la liberación de CO₂ con respecto a la presencia de ciertos microbios, en dicho estudio tuvieron una tasa media de CO₂ de 58,0 de kg d⁻¹ de CO₂ en condiciones aeróbicas y una tasa de 31,2 mg d⁻¹ de CO₂ en condiciones anaerobias, demostrando como la presencia de oxígeno en el suelo puede influir en la generación de CO₂ (Ikkonen *et al.*, 2012).

Por otro lado, la evaluación de liberación de CO₂ puede ser utilizada como indicador de que tan eficiente puede ser el uso de residuos orgánicos en la actividad biológica, para esto se han evaluado dos tipos de suelos Regosol y Luvisol donde se aplicó bagazo y composta de bagazo, los resultados obtenidos, determinando que el uso de residuos orgánicos genera mayor actividad biológica en organismos edáficos (Acosta-Sotelo *et al.*, 2024). El CO₂ es un indicador que permite conocer los efectos significativos sobre otros fenómenos además de ser una herramienta en el diagnóstico de suelos; para el caso particular de esta investigación la evaluación de CO₂ en el cultivo de caña se focalizó en evidenciar los impactos diferenciales de la aplicación de glifosato.

Aplicación de los modelos ajustados a la incubación

Como se mencionó anteriormente, se utilizaron modelos matemáticos para ajustar los datos obtenidos. Los criterios de selección para seleccionar un modelo matemático fueron un

coeficiente de determinación (R²) alto y un error estándar (EE) bajo. Para las muestras provenientes del municipio de La Antigua en ambos tratamientos (sin glifosato y con aplicación de glifosato) la liberación de CO₂ para ambos casos fueron las más bajas, para estos se utilizaron los modelos MMF (Multi Model Framework) para ambos tratamientos. El modelo MMF es un modelo de tipo regresión dentro de la familia de los modelos sigmoideos. Este tipo de modelos se utiliza en procesos naturales, donde una progresión inicia desde un pequeño crecimiento hasta que comienza acelerar y se acerca a un clímax determinado (Ko *et al.*, 2021).

El modelo matemático ajustado para el tratamiento sin glifosato obtuvo como el error estándar (EE) de 2.981, el coeficiente de correlación (R) fue de 0.991, el coeficiente de determinación (R²) fue 0.985. El valor para sus grados libertad (df) fue de 3, por su parte la velocidad de liberación de CO₂ fue de 1.11 uCO₂ d⁻¹ (uCO₂=Unidades de CO₂). En cuanto al modelo ajustado para el tratamiento con glifosato obtuvo como error estándar (EE) 2.66, el coeficiente de correlación (R) fue de 0.991, el coeficiente de determinación (R²) fue de 0.998. Los grados libertad (df) para este modelo fue de valor de 3, por otro lado, la velocidad de liberación de CO₂ fue de 5.4 uCO₂ d⁻¹. Los puntos azules en los modelos representan los datos observados, las líneas rojas representan los modelos utilizados (MMF), por su parte el área sombreada representa los márgenes de error del modelo, el área sombreada representa una aproximación más cercana a los intervalos de confianza.

Para el tratamiento sin glifosato (a) el comportamiento de la liberación de carbono se considera un crecimiento exponencial logrando alcanzar más de 55 kg de CO₂, se observa que incluso la generación de CO₂ puede ser producida más allá de los 30 días de incubación, lo que sugiere que, a pesar de tener un porcentaje de materia baja en comparación con las otras dos regiones evaluadas, está aún se considera indicador de una actividad biológica latente (Huang *et al.*, 2018). En cuanto al modelo ajustado al tratamiento con glifosato (b) presenta un comportamiento diferente, para empezar, se observa un crecimiento exponencial antes de los primeros cinco días de incubación; posteriormente a este periodo la liberación de CO₂ en suelos se mantiene hasta lograr un comportamiento estacionario pasando los diez días hasta finalizar la incubación en 30 días.

Se observa que, aun bajo condiciones mínimas, el suelo sin aplicación de herbicida continúa generando CO₂. Por otro lado, la aplicación de glifosato en exceso provoca una saturación del sistema, lo que induce a los microorganismos a utilizarlo como fuente de carbono (o fósforo). Esto explica el crecimiento acelerado durante los primeros días de incubación. Posteriormente, el sistema tiende a estabilizarse, lo cual podría indicar una adaptación al

glifosato o incluso una reorganización de la comunidad microbiana (Feofilova, 2003; Chávez-Ortiz *et al.*, 2022). Los modelos se pueden observar en la figura 4.

Para las muestras provenientes del municipio de Paso de Ovejas para ambos tratamientos (sin glifosato y con aplicación de glifosato) la liberación de CO₂ en ambos tipos de tratamiento fue superior al comportamiento de la actividad biológica que en la región de La Antigua.

En las muestras sin aplicación de glifosato se utilizó el modelo matemático Reciprocal Quadratic, el cual es utilizado en aplicaciones dentro del campo de la física y en la evaluación de las respuestas biológicas (Sonalkar *et al.*, 2017). El modelo matemático ajustado para el tratamiento sin glifosato obtuvo como el error estándar (EE) de 3.956, el coeficiente de correlación (R) fue de 0.959, el coeficiente de determinación (R²) fue 0.952. El valor para sus grados libertad (df) fue de 4, por su parte la velocidad de liberación de CO₂ fue de 5.62 uCO₂ d⁻¹. En cuanto al modelo ajustado para el tratamiento con glifosato en las muestras de Paso de Ovejas se utilizó el modelo MMF (Multi Model Framework) donde se obtuvo como error estándar (EE) un valor de 0.95, el coeficiente de correlación (R) fue de 0.999, el coeficiente de determinación (R²) fue de 0.999. Los grados libertad (df) para este modelo fue de valor de 4, por otro lado, la velocidad de liberación de CO₂ fue de 3.9×10^{-04} uCO₂ d⁻¹.

Para el tratamiento sin glifosato (a) la liberación de CO₂ se mantiene una fase exponencial desde el día 0 hasta pasado poco más de 20 días, posteriormente la actividad biológica logra una fase semiestacionaria, se observa que la liberación de CO₂ incluso supera los 30 días de incubación. Los parámetros de suelo de esta región presentan mejores condiciones en comparación con las muestras de La Antigua, por ende, su actividad biológica se potencia para ser observada más allá de 30 días. En el tratamiento con

aplicación de glifosato (b) las muestras de suelo presentan una liberación de CO₂ exponencial y acelerada en contraste con el tratamiento sin aplicación durante los primeros cinco a siete días, sin embargo, esta actividad disminuye y se mantiene estacionaria hasta alcanzar los 30 días de incubación. Al igual que las muestras sin tratamiento se observa que a pesar de la adición de glifosato la actividad biológica mantiene una respuesta en transición, es decir, la fase estacionaria es indicativo de una reorganización o adaptación de las colonias que pueden desarrollarse en los suelos muestreados (Feofilova, 2003). La disminución en la cantidad de CO₂ liberado entre ambos tratamientos es de menos 40% para el día 30 de la incubación, lo que demuestra la limitación en la actividad biológica en tiempos prolongados de observación. Los modelos ajustados para las muestras de suelo del municipio de Paso de Ovejas se pueden apreciar en la Figura 5.

En las muestras pertenecientes a la región de Úrsulo Galván la liberación de CO₂, se presenta un comportamiento similar al de las muestras provenientes a la región de Paso de Ovejas.

En las muestras de Úrsulo Galván sin aplicación de glifosato (a) se utilizó el modelo matemático de Gompertz, el cual es muy utilizado en la evaluación de cinéticas de crecimiento microbiano y como indicador de biorremediación (Castañeda-Chávez *et al.*, 2020). El modelo matemático ajustado para el tratamiento sin glifosato obtuvo como el error estándar (EE) de 10.777, el coeficiente de correlación (R) fue de 0.999, el coeficiente de determinación (R²) fue 0.999. El valor para sus grados libertad (df) fue de 4, por su parte la velocidad de liberación de CO₂ fue de 2.32 uCO₂ d⁻¹. Las muestras de Úrsulo Galván con aplicación de glifosato (b) se ajustaron bajo el modelo Hoerl, el cual es utilizado para realizar ajustes referentes a dinámicas de organismos biológicos, distribución de plaguicidas, entre otras investigaciones (Wayment *et al.*, 2025).

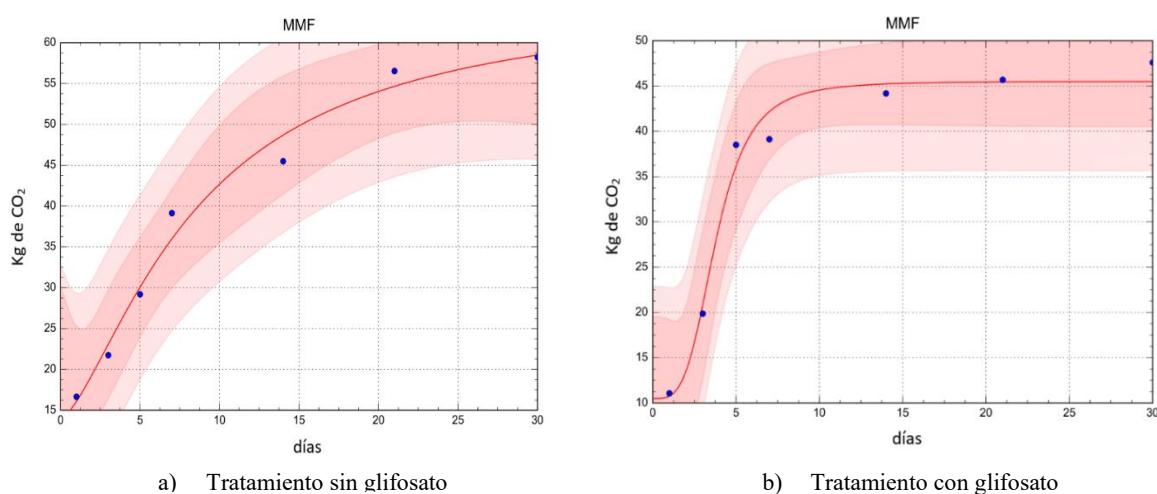


Figura 4. Modelos MMF ajustados para la liberación de CO₂ en las muestras pertenecientes a La Antigua, Veracruz, México, en suelos cultivados con caña de azúcar.

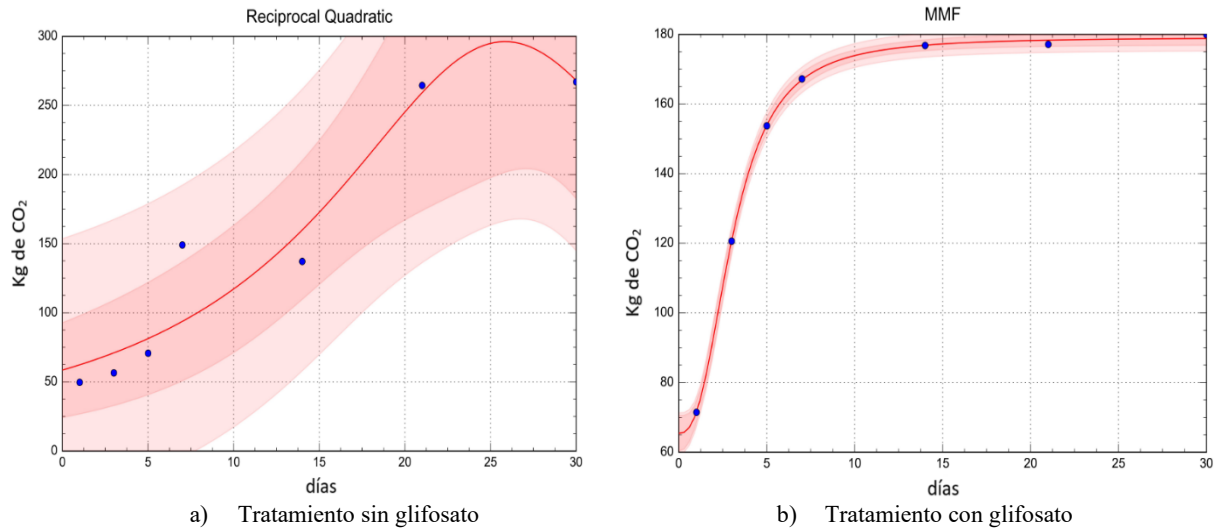


Figura 5. Modelos Reciprocal Quadratic y MMF ajustados para la liberación de CO₂ en las muestras pertenecientes a Paso de Ovejas, Veracruz, México, en suelos cultivados con caña de azúcar.

El modelo matemático ajustado para el tratamiento sin glifosato obtuvo como el error estándar (EE) de 7.257, el coeficiente de correlación (R) fue de 0.993, el coeficiente de determinación (R²) fue 0.988. El valor para sus grados libertad (df) fue de 4, por su parte la velocidad de liberación de CO₂ fue de 12.66 uCO₂ d⁻¹. La liberación de CO₂ disminuyó un 51.43 % entre ambos tratamientos, la actividad biológica disminuyó en el tratamiento con aplicación de glifosato. En el caso del tratamiento sin glifosato, la mineralización de CO₂ es de carácter exponencial a lo largo de los 30 días, por otro lado, el tratamiento con glifosato es exponencial durante los primeros diez días. En ambos tratamientos se observa que la liberación de CO₂ se mantiene posterior a los 30 días,

lo que indica que en ambos casos la actividad biológica se mantiene. La principal diferencia se aprecia en el tratamiento con glifosato donde posteriormente los 10 días la actividad biológica entra ligeramente en una fase semiestacionaria.

En las diferentes regiones se observa que las muestras presentan una mineralización de carbono exponencial a lo largo de la incubación, mientras que las muestras donde aplico glifosato la mineralización de CO₂ se potencia los primeros 5-10 días, sin embargo, en los demás días la liberación de CO₂ entra en fase estacionaria. Para las tres regiones muestreadas, el tratamiento con glifosato, presenta el mismo comportamiento.

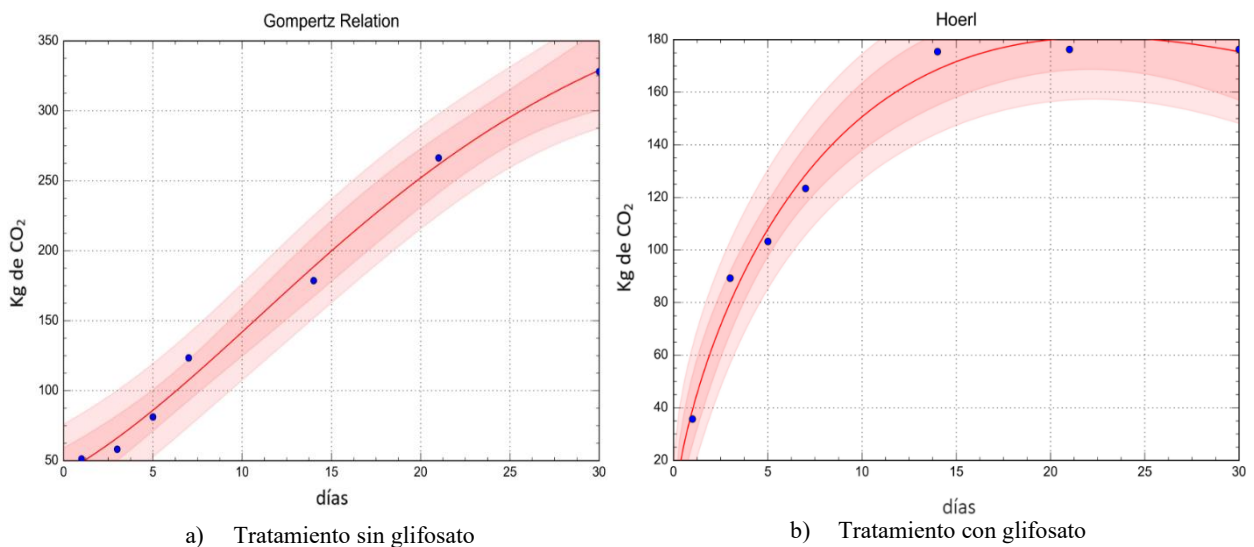


Figura 6. Modelos Gompertz y Hoerl ajustados para la liberación de CO₂ en las muestras pertenecientes a Paso de Ovejas, Veracruz, México en suelos cultivados con caña de azúcar.

Las muestras sin tratamiento de glifosato se ven inmersas en condiciones donde se intentan cuidar los parámetros de calidad del suelo, no obstante, cuando se agrega el herbicida, se presenta la fase de equilibrio. Esta fase estacionaria o de equilibrio, se puede deber a la sobresaturación del glifosato, lo que ocasiona que los microorganismos del suelo puedan estar adaptándose, reorganizándose o incluso pueden deberse a una lisis (Shahid *et al.*, 2023). Algunas investigaciones sugieren la influencia de los parámetros de calidad del suelo y la dinámica microbiana como los principales precursores en la dinámica de CO₂ (Kepler *et al.*, 2020; Agbeshie & Awuah, 2025).

En los suelos de caña de azúcar, la quema previa a la cosecha es una fuente importante de liberación de CO₂, así como las prácticas de manejo (tratamiento de la parcela, uso de herbicidas y fertilizantes) y las condiciones ambientales específicas impulsan diferencias importantes en la liberación de CO₂ como indicador de la actividad biológica de los suelos (Silva-Olaya *et al.*, 2013).

Comparación entre la incubación de 30 días escalada a 3 días

Como parte de la incubación se realizaron evaluaciones de la liberación de CO₂ también a tres días. En el tratamiento sin glifosato (tratamiento 1) se compararon los datos de la incubación realizada 3 días con la de 30 días, la principal razón es para evaluar la viabilidad de realizar un escalamiento 10:1 en los modelamientos matemáticos, previamente se realizó una regresión lineal donde se obtuvo un coeficiente de determinación (R²) de 0.953. Los datos de liberación de CO₂ en las muestras de La Antigua obtuvieron un coeficiente de correlación de Pearson (r) de -0.404 y un valor de Sig.(bilateral) de 0.465, por ende, no es estadísticamente significativa (p>0.05). En la región de Paso de Ovejas se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0.740 y un Sig.(bilateral) de 0.093 lo que demuestra que no es estadísticamente significativa (p>0.05). Para las muestras recolectadas en Úrsulo Galván se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson (r) de -0.168, y su Sig. (bilateral) de 0.832. Los datos de correlación de Pearson son lejanos a -1 y es negativo, indicando una correlación demasiado débil, por ende, no es estadísticamente significativa (p>0.05).

Para los datos de liberación de CO₂ aplicando glifosato (tratamiento 2) se compararon los datos de la incubación a tres días versus 30 días, lo anterior, para evaluar si se puede escalar la incubación en relación 10:1 días, se realizó una regresión lineal donde el coeficiente de determinación (R²) fue de 0.915 entre los dos tipos de experimentos. En la región de La Antigua se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) el cual obtuvo un valor de

0.665, su valor de Sig.(bilateral) fue de 0.220. Los datos de la correlación entre ambos experimentos si presentan un alto coeficiente de determinación, a su vez su coeficiente de correlación de Pearson es cercano a 1 y es positivo, no obstante, no es estadísticamente significativa (p>0.05). Los datos para las muestras de Paso de Ovejas obtuvieron un coeficiente de correlación de Pearson (r) de -0.209, su valor de Sig.(bilateral) fue de 0.791. Los datos de correlación de Pearson son lejanos a -1 y es negativo, indicando una correlación demasiado débil, por ende, no es estadísticamente significativa (p>0.05). Para los datos de Úrsulo Galván se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson (r) de -0.376, su valor de Sig.(bilateral) fue de 0.462. Lo anterior denota una correlación casi inexistente para los datos de esta región, por lo tanto, la correlación no es estadísticamente significativa (p>0.05).

Los tiempos correlacionados entre los diferentes tratamientos y regiones muestran no ser lo suficientemente válidos para considerar realizar un modelo escalado (10:1). Para establecer una correlación más clara y profunda que establezca un modelo en relación de tiempo es necesario considerar más días de incubación que permitan establecer una significancia estadística más significativa, como podría una relación 2:1.

CONCLUSIONES

En el cultivo de caña de azúcar se propicia una dinámica de CO₂ gracias a las particularidades del suelo, esto genera que la actividad biológica se incremente en dichos agroecosistemas. Cuando el suelo es intervenido con herbicidas como el glifosato, la liberación de CO₂ se ve influenciada, este incremento se visualiza durante los primeros días. No obstante, este crecimiento no es prolongado, ya que posterior a los cinco días, la actividad microbiana entra en una fase estacionaria, lo que asume un impacto negativo en la actividad biológica del suelo.

La dinámica de CO₂ es una forma de entender la actividad biológica y como los herbicidas influyen en esta, este tipo de investigaciones permiten establecer un preámbulo para investigar la reorganización microbiológica y los impactos que el glifosato puede inducir en el suelo de diferentes agroecosistemas.

Funding. The authors acknowledge the financial support provided through a maintenance scholarship from the Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

Compliance with ethical standards. This study did not involve human participants or animals. All procedures were conducted in accordance with

relevant institutional and national guidelines. The authors declare no ethical conflicts.

Data availability. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Author Contributions. **A.J. Isidoro-Pio:** Investigation, Formal analysis, Validation, Methodology, Writing – original draft Writing – Original Draft; **C.J. López-Collado:** Conceptualization, Resources, Software; Formal analysis; Funding acquisition, Project administration; **M.R. Castañeda-Chávez:** Supervision, Funding acquisition, Validation **E. Ortega-Jiménez:** Validation, Writing – review & editing; **G. López-Romero:** Methodology, Writing – review & editing; **J. Velasco-Velasco:** Data curation.

REFERENCES

- Acosta-Sotelo, L.L., Salcedo-Pérez, E., Benedicto-Valdés, G. S., Gallardo-Lancho, J.F., Zamora-Natera, J.F. and Casas-Solís, J., 2024. Bagasse and bagasse compost from agave tequilero in contrasting soils: 3. Soil respiration and greenhouse gas emissions. *Biotechnia*, 26, pp. 1-11. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v26.2178>
- Agbeshie, A.A. and Awuah, R., 2025. Impact of fire-burn on soil geochemical, microbial biomass and carbon stocks in a dry tropical forest ecosystem. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(6), pp. 4891-4904. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05932-x>
- Ahmad, S., Ahmad, H.W. and Bhatt, P., 2022. Microbial adaptation and impact into the pesticide's degradation. *Archives of Microbiology*, 204(5), pp.1-25. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02899-6>
- Bhaduri, D., Sihi, D., Bhowmik, A., Verma, B.C., Munda, S. and Dari, B., 2022. A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Frontiers in Microbiology*, 13, pp. 938481. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938481>
- Castañeda-Chávez, M.R., Isidoro-Pio, A.J., Lango-Reynoso, Fabiola. and Lizardi-Jiménez, M.A., 2020. Bioreactors for the remediation of hydrocarbon-polluted water of the Bitzal River, a place of environmental emergency due to the death of manatees. *Environmental Pollution*, 266, pp. 115171. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115171>
- Chávez-Ortiz, P., Tapia-Torres, Y., Larsen, J. and García-Oliva, F., 2022. Glyphosate-based herbicides alter soil carbon and phosphorus dynamics and microbial activity. *Applied Soil Ecology*, 169, pp. 104256. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104256>
- Duke, S.O., 2021. Glyphosate: uses other than in glyphosate-resistant crops, mode of action, degradation in plants, and effects on non-target plants and agricultural microbes. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 255: Glyphosate*, pp. 1-65. https://doi.org/10.1007/398_2020_53
- Feofilova, E.P., 2003. Deceleration of vital activity as a universal biochemical mechanism ensuring adaptation of microorganisms to stress factors: a review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 39(1), pp.1-18. <https://doi.org/10.1023/A:1021774523465>
- Ferdush, J., Paul, V., Varco, J., Jones, K. and Sasidharan, S.M., 2023. Consequences of elevated CO₂ on soil acidification, cation depletion, and inorganic carbon: A column-based experimental investigation. *Soil and Tillage Research*, 234, pp.105839. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105839>
- Franzluebbers, A.J., 2021. Assessment and interpretation of soil-test biological activity. *Soil Health Series: Volume 2 Laboratory Methods for Soil Health Analysis*, pp. 126-151. <https://doi.org/10.1002/9780891189831.ch8>
- He, C., Wang, W. and Hou, J., 2019. Characterization of dark septate endophytic fungi and improve the performance of liquorice under organic residue treatment. *Frontiers in Microbiology*, 10, pp.1364. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01364>
- Hernández-Pérez, J.M., Landeros-Sánchez, C., Martínez-Dávila, J.P., López-Romero, G., Platas-Rosado, D.E. and Nikolskii-Gavrilov, I., 2017. Valoración de la evapotranspiración real estimada y rendimiento de caña de azúcar en Veracruz, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5), pp. 1013-1019. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.104>
- Hu, L., Qin, R., Zhou, L., Deng, H., Li, K. and He, X., 2023. Effects of orange peel biochar and

- Cipangopaludina chinensis* shell powder on soil organic carbon transformation in citrus orchards. *Agronomy*, 13(7), pp. 1801. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071801>
- Huang, L., Ning, Z., Wang, Q., Zhang, W., Cheng, Z., Wu, X. and Qin, H., 2018. Effect of organic type and moisture on CO₂/CH₄ competitive adsorption in kerogen with implications for CO₂ sequestration and enhanced CH₄ recovery. *Applied Energy*, 210, pp. 28-43. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.122>
- Ikkonen, E., Stephan-Otto, E., Ibáñez-Huerta, A., Krasilnikov, P., García-Calderón, N., Fuentes-Romero, E. and Martínez-Arroyo, A., 2012. Production in anthropogenic Chinampas soils in Mexico City. *Spanish Journal of Soil Science*, 2(2), pp. 62-73. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2012.V2.N2.04>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)., 2022. *Economía y Sectores Productivos*. Accesado el 20 de julio de 2025 en <https://www.inegi.org.mx/temas/agricultura/>
- Kepler, R.M., Epp Schmidt, D.J., Yarwood, S.A., Cavigelli, M.A., Reddy, K.N., Duke, S.O., Bradley, C.A., Williams, M.M., Buyer, S.J. and Maul, J.E., 2020. Soil microbial communities in diverse agroecosystems exposed to the herbicide glyphosate. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(5), pp. e01744-19. <https://doi.org/10.1128/AEM.01744-19>
- Ko, Y.J., Kim, S., Pan, C.H. and Park, K., 2021. Identification of functional microbial modules through network-based analysis of meta-microbial features using matrix factorization. *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*, 19(5), pp. 2851-2862. <https://doi.org/10.1109/TCBB.2021.3100893>
- Kuśmierz, S., Skowrońska, M., Tkaczyk, P., Lipiński, W. and Mielniczuk, J., 2023. Soil organic carbon and mineral nitrogen contents in soils as affected by their pH, texture and fertilization. *Agronomy*, 13(1), pp. 267. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010267>
- Martinelli, R., Rufino Jr, L.R., Alcántara-de la Cruz, R., da Conceição, P.M., Monquero, P.A. and de Azevedo, F.A., 2022. Glyphosate excessive use affects citrus growth and yield: The vicious (and unsustainable) circle in Brazilian orchards. *Agronomy*, 12(2), pp. 453. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020453>
- NOM-021-RECNAT-2000., 2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelo. Estudios, muestreos y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Accesado el 20 de julio de 2025 en <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Parven, A., Meftaul, I.M., Venkateswarlu, K. and Megharaj, M., 2025. Herbicides in modern sustainable agriculture: environmental fate, ecological implications, and human health concerns. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(2), pp. 1181-1202. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05818-y>
- Pertile, M., Antunes, J.E.L., Araujo, F.F., Mendes, L.W., Van den Brink, P.J. and Araujo, A.S.F., 2020. Respuesta de la biomasa microbiana del suelo y la actividad enzimática a los herbicidas imazetapir y flumioxazina. *Scientific Reports*, 10 (1), pp. 7694. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64648-3>
- Pileggi, M., Pileggi, S.A. and Sadowsky, M.J., 2020. Herbicide bioremediation: from strains to bacterial communities. *Heliyon*, 6(12), pp. e05767. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05767>
- Putra, R.P., Ranomahera, M.R.R., Rizaludin, M.S., Supriyanto, R. and Dewi, V.A.K., 2020. Investigating environmental impacts of long-term monoculture of sugarcane farming in Indonesia through DPSIR framework. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 21(10), pp. 4945-4958. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d211061>
- Qi, D., Wieneke, X., Tao, J., Zhou, X. and Desilva, U., 2018. Soil pH is the primary factor correlating with soil microbiome in karst rocky desertification regions in the Wushan County, Chongqing, China. *Frontiers in Microbiology*, 9, pp. 1027. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01027>
- Shahid, M., Khan, M. S., Syed, A., Elgorban, A. M., Pichtel, J. and Wong, L. S., 2023. Effect of

- herbicides on cellular growth, microbiological and physiological activities of an identified rhizosphere isolate *Rhodococcus erythropolis*. *Chemistry and Ecology*, 39(8), pp. 843-867. <https://doi.org/10.1080/02757540.2023.2263436>
- Silva-Olaya, A.M., Cerri, C.E.P., La Scala Jr, N., Dias, C.T.D. S. and Cerri, C.C., 2013. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environmental Research Letters*, 8(1), pp. 15014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015014>
- Singh, S., Kumar, V., Gill, J. P.K., Datta, S., Singh, S., Dhaka, V., Kapoor, D., Wani, A. B., Singh, D. D., Kumar, M. and Singh, J., 2020. Herbicide glyphosate: toxicity and microbial degradation. *International journal of environmental research and public health*, 17(20), pp. 7519. <https://doi.org/10.3390/ijerph17207519>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER)., 2023. *Creció 1.6% valor de la producción agrícola, pecuaria y pesquera de México en 2023*. Accesado el 10 de julio de 2025 en <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crecio-1-6-valor-de-la-produccion-agricola-pecuaria-y-pesquera-de-mexico-en-2023> (Recuperado: junio 2025).
- Sonalkar, N., Mabogunje, A. and Cutkosky, M., 2017. Quadratic model of reciprocal causation for monitoring, improving, and reflecting on design team performance. In *Design Thinking Research: Making Distinctions: Collaboration versus Cooperation* (pp. 43-57). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60967-6_3
- Teramage, M.T., Asfaw, M., Demissie, A., Feyissa, A., Ababu, T., Gonfa, Y. and Sime, G., 2023. Effects of land use types on the depth distribution of selected soil properties in two contrasting agro-climatic zones. *Heliyon*, 9(6), pp. e17354. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17354>
- Wang, Y., Chen, L., Xiang, W., Ouyang, S., Zhang, T., Zhang, X., Zeng, Y., Hu, Y., Lou, G. and Kuzyakov, Y., 2021. Forest conversion to plantations: A meta-analysis of consequences for soil and microbial properties and functions. *Global Change Biology*, 27(21), pp. 5643-5656. <https://doi.org/10.1111/gcb.15835>
- Wayment, D.G., Wright, A.A., Bergeron, D.R., McCollam, G.A. and White Jr, P.M., 2025. Soil dissipation and efficacy on itchgrass of soil-applied residual herbicides pendimethalin and clomazone in Louisiana sugarcane. *Pest Management Science*, 81(1), pp. 288-297. <https://doi.org/10.1002/ps.8432>