

Residualidad de glifosato en suelo y grano de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y su efecto en el rendimiento y la fertilidad del suelo en Estelí, Nicaragua

Residuality of glyphosate in soil and bean grain (*Phaseolus vulgaris* L.) and its effect on yield and soil fertility in Estelí, Nicaragua

¹Arnoldo José Treminio Aguirre; ¹Pablo Fabián Medina Méndez; ³Didier Gabriel Matey Fajardo ⁴Juan Octavio Meneses Córdoba*

¹Dirección de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda-Nicaragua. <https://orcid.org/0009-0004-8529-6214>. arnoldotreminio15@gmail.com

¹Dirección de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda-Nicaragua. <https://orcid.org/0009-0006-9996-4943>. fabianmendez.fm77@gmail.com

³Dirección de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda-Nicaragua. <https://orcid.org/0009-0007-9398-9346>. didier.matey@unflep.edu.ni

⁴Dirección de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda-Nicaragua. <https://orcid.org/0009-0006-7692-2070>. juan.meneses@unflep.edu.ni

*Autor por correspondencia: juan.meneses@unflep.edu.ni

Recibido: 15/11/2025

Aceptado: 10/12/2025

Publicado: 18/12/2025

Resumen

El glifosato es uno de los herbicidas más utilizados en los sistemas agrícolas de Nicaragua; sin embargo, su uso continuo ha generado preocupación por su persistencia en el suelo, la posible acumulación en los cultivos y sus efectos sobre la productividad y la fertilidad edáfica. El objetivo del presente estudio fue evaluar la residualidad de glifosato en suelo y grano de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), así como su efecto en el rendimiento del cultivo y algunos indicadores de fertilidad del suelo, en condiciones experimentales del Recinto Universitario Francisco Luis Espinoza Pineda (UNFLEP), Estelí. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y experimental, utilizando un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos correspondientes a diferentes dosis de glifosato y cuatro repeticiones. Se analizaron concentraciones residuales de glifosato en suelo y grano, variables de crecimiento y rendimiento del frijol, y parámetros químicos del suelo posterior



2025 – Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda
Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

a la aplicación. Los datos fueron sometidos a análisis estadístico para determinar diferencias entre tratamientos. Los resultados evidencian que el incremento en la dosis de glifosato se asocia con mayores niveles de residualidad en suelo y grano, así como con una reducción significativa en el crecimiento y rendimiento del cultivo. Asimismo, se observaron alteraciones en algunos nutrientes del suelo, lo que sugiere posibles efectos sobre su fertilidad. Se concluye que el manejo inadecuado de las dosis de glifosato puede comprometer la sostenibilidad productiva del frijol, por lo que se recomienda promover prácticas de uso racional y alternativas de manejo integrado de malezas.

Palabras clave: Glifosato; residualidad; frijol; rendimiento; fertilidad del suelo.

Abstract

Glyphosate is one of the most widely used herbicides in agricultural systems in Nicaragua; however, its intensive and continuous application has raised concerns regarding its persistence in soil, potential accumulation in crops, and effects on productivity and soil fertility. The objective of this study was to evaluate glyphosate residuality in soil and bean grain (*Phaseolus vulgaris* L.), as well as its effects on crop yield and selected soil fertility indicators, under experimental conditions at the Francisco Luis Espinoza Pineda University Campus (UNFLEP), Estelí, Nicaragua. The research followed a quantitative and experimental approach using a completely randomized design with four treatments corresponding to different glyphosate doses and four replications. Residual glyphosate concentrations in soil and grain were analyzed, along with growth, yield variables of the bean crop, and post-application soil chemical properties. Statistical analyses were conducted to identify differences among treatments. The results indicate that increasing glyphosate doses were associated with higher residual levels in soil and grain, accompanied by significant reductions in plant growth and yield. Additionally, changes in certain soil nutrients were observed, suggesting potential impacts on soil fertility. It is concluded that inappropriate glyphosate dose management may compromise bean productivity and soil sustainability, highlighting the need to promote rational herbicide use and integrated weed management alternatives.



Keywords: Glyphosate; residuality; common bean; yield; soil fertility.

Introducción

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) constituye uno de los cultivos básicos más importantes en la seguridad alimentaria de Nicaragua y de otros países de Centroamérica, tanto por su aporte nutricional como por su relevancia socioeconómica para pequeños y medianos productores. En los sistemas productivos de frijol, el control de malezas representa uno de los principales desafíos agronómicos, ya que la competencia temprana puede afectar de manera significativa el crecimiento, el rendimiento y la calidad del grano.

Entre las estrategias más utilizadas para el manejo de malezas destaca el uso de herbicidas, siendo el glifosato uno de los principios activos más empleados a nivel mundial debido a su efectividad, amplio espectro de acción y relativo bajo costo (Duke & Powles, 2008). No obstante, el incremento en la frecuencia y dosis de aplicación ha generado un creciente debate científico sobre sus posibles efectos ambientales y agronómicos, particularmente en relación con su persistencia en el suelo, su acumulación en los cultivos y su impacto sobre la fertilidad edáfica y la productividad agrícola (Mesnage et al., 2015; Singh et al., 2020).

Diversos estudios han señalado que, aunque el glifosato presenta una adsorción relativamente alta en partículas del suelo, su residualidad puede variar en función de factores como la dosis aplicada, el tipo de suelo, el contenido de materia orgánica y las condiciones climáticas (Giesy et al., 2000; Duke et al., 2012). La presencia de residuos de glifosato en el suelo puede alterar la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y la dinámica de ciertos elementos esenciales para el desarrollo de los cultivos, lo que podría traducirse en efectos negativos sobre el crecimiento vegetal y el rendimiento (Zobiole et al., 2010).

Asimismo, se ha documentado la posible translocación y acumulación de residuos de glifosato en los tejidos vegetales y en el grano, lo que ha despertado preocupación tanto por sus implicaciones agronómicas como por sus efectos potenciales en la salud humana y la calidad de los alimentos (Mesnage et al., 2015; Van Bruggen et al., 2018). En este contexto, la evaluación de la residualidad del herbicida en los cultivos adquiere especial relevancia en sistemas productivos destinados al consumo humano directo, como el frijol.



En Nicaragua, el uso de glifosato es una práctica común en la agricultura convencional, y en muchos casos se reporta la aplicación de dosis superiores a las recomendadas, motivada por la percepción de mayor efectividad en el control de malezas. Sin embargo, existe información limitada a nivel local sobre los efectos de estas prácticas en la residualidad del herbicida, el rendimiento del frijol y la fertilidad del suelo, lo que dificulta la toma de decisiones basadas en evidencia científica.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la residualidad de glifosato en suelo y grano de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y su efecto sobre el rendimiento del cultivo y algunos indicadores de fertilidad del suelo, bajo condiciones experimentales en el Recinto Universitario Francisco Luis Espinoza Pineda (UNFLEP), Estelí, Nicaragua. Los resultados buscan aportar información científica que contribuya al uso racional del glifosato y al fortalecimiento de prácticas agrícolas más sostenibles en la producción de frijol.

Metodología

Enfoque y diseño experimental

La investigación se desarrolló bajo un **enfoque cuantitativo y experimental**, con el objetivo de evaluar la residualidad de glifosato en suelo y grano de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y su efecto sobre el rendimiento del cultivo y algunos indicadores de fertilidad del suelo. Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA), apropiado para experimentos agrícolas donde se busca controlar la variabilidad entre tratamientos bajo condiciones homogéneas (Gómez & Gómez, 1984; Montgomery, 2017).

Área de estudio

El experimento se llevó a cabo en parcelas experimentales del Recinto Universitario Francisco Luis Espinoza Pineda (UNFLEP), ubicado en el municipio de Estelí, Nicaragua. La zona se caracteriza por condiciones agroclimáticas representativas de los sistemas productivos de frijol del norte del país, lo que confiere relevancia agronómica a los resultados obtenidos.

Tratamientos y manejo del cultivo



Se evaluaron cuatro tratamientos, correspondientes a diferentes dosis de glifosato aplicadas en el cultivo de frijol, incluyendo una dosis testigo sin aplicación del herbicida y tres dosis crecientes, definidas con base en prácticas locales de manejo y recomendaciones técnicas. Cada tratamiento contó con cuatro repeticiones, conformando un total de 16 unidades experimentales.

El establecimiento y manejo del cultivo se realizó siguiendo las prácticas agronómicas recomendadas para el frijol, garantizando condiciones similares de preparación del suelo, siembra, fertilización y manejo fitosanitario, a fin de minimizar la interferencia de factores externos sobre las variables evaluadas (FAO, 2016).

Variables evaluadas

Las variables analizadas incluyeron: residualidad de glifosato en suelo, residualidad de glifosato en grano, variables de crecimiento y rendimiento del frijol y parámetros químicos del suelo posteriores a la aplicación del herbicida. La residualidad se determinó mediante análisis de laboratorio, mientras que el rendimiento se estimó a partir de la producción de grano por unidad experimental, expresada en kilogramos por hectárea.

Muestreo y análisis de laboratorio

Las muestras de suelo y grano se recolectaron siguiendo procedimientos estandarizados para garantizar su representatividad y evitar contaminación cruzada. El análisis de residuos de glifosato se realizó en un laboratorio acreditado, empleando métodos analíticos validados para la determinación de residuos de herbicidas en matrices agrícolas (IPSA, 2020; Van Bruggen et al., 2018).

Los parámetros químicos del suelo evaluados incluyeron nutrientes esenciales y otros indicadores de fertilidad, determinados mediante técnicas convencionales de análisis de suelos utilizadas en estudios agronómicos (FAO, 2006).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis estadístico descriptivo e inferencial. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias significativas entre tratamientos, y cuando se detectaron diferencias estadísticas se aplicaron pruebas de



comparación de medias. Los análisis se efectuaron utilizando software estadístico especializado, adoptando un nivel de significancia de $p \leq 0.05$, de acuerdo con criterios comúnmente aceptados en investigaciones agronómicas (Montgomery, 2017; Steel et al., 1997).

Consideraciones éticas y ambientales

El estudio se desarrolló considerando principios de responsabilidad ambiental, asegurando el manejo adecuado de los residuos generados durante el experimento y el cumplimiento de las normativas vigentes para el uso de agroquímicos. Asimismo, los resultados se utilizaron exclusivamente con fines académicos y científicos, orientados a contribuir al uso racional del glifosato y a la sostenibilidad de los sistemas productivos de frijol.

Resultados y Discusión

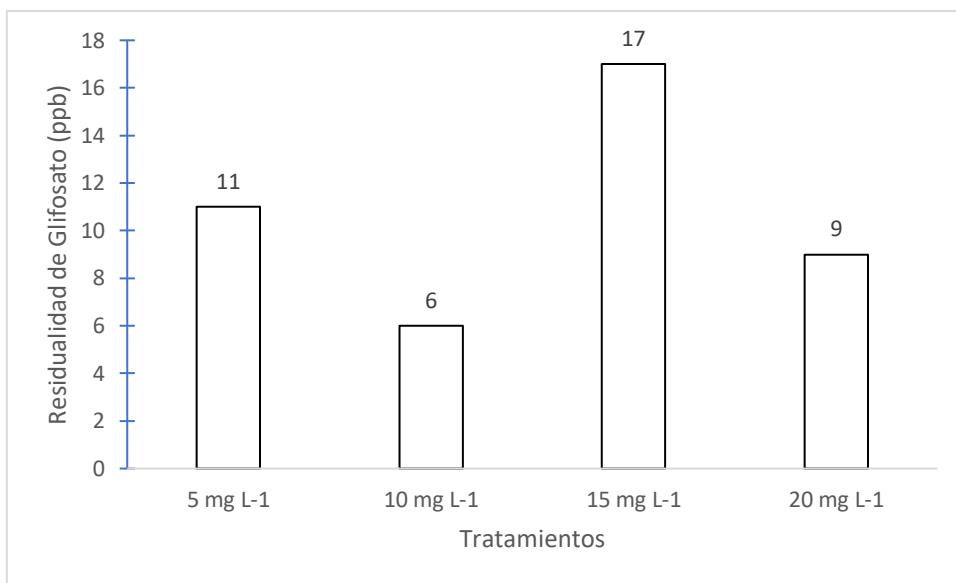
Residualidad de glifosato en suelo

Los resultados evidencian un incremento progresivo de la residualidad de glifosato en el suelo conforme aumentó la dosis aplicada del herbicida. El tratamiento testigo presentó concentraciones mínimas o no detectables de glifosato, mientras que los tratamientos con dosis crecientes mostraron valores significativamente superiores, confirmando una relación directa entre la cantidad aplicada y la persistencia del herbicida en el suelo. Este comportamiento indica que el uso de dosis elevadas favorece la acumulación de glifosato en el perfil edáfico, lo que puede generar efectos acumulativos en aplicaciones sucesivas.

Figure 1



*Residualidad de glifosato en suelo (mg kg⁻¹) en función de las dosis aplicadas en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) bajo condiciones experimentales en UNFLEP, Estelí.*



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Giesy et al. (2000), quienes señalan que la persistencia del glifosato en el suelo aumenta proporcionalmente con la dosis aplicada y está fuertemente influenciada por procesos de adsorción en partículas minerales y materia orgánica. De manera similar, Duke et al. (2012) indican que, aunque el glifosato presenta una fuerte afinidad por el suelo, su acumulación puede ser significativa cuando se aplican dosis elevadas o de forma repetida, especialmente en sistemas agrícolas intensivos. Asimismo, Singh et al. (2020) reportan que la residualidad del glifosato en suelos agrícolas puede persistir durante períodos prolongados, afectando procesos edáficos y la disponibilidad de nutrientes, particularmente cuando no se respetan las dosis recomendadas. En este sentido, los resultados del presente estudio confirman que el manejo inadecuado del glifosato incrementa su permanencia en el suelo, lo que podría tener implicaciones negativas sobre la fertilidad y la sostenibilidad del sistema productivo de frijol.

Residualidad de glifosato en grano de frijol

En el análisis de residuos en grano (semillas) de frijol, no se detectó presencia de glifosato en ninguno de los tratamientos evaluados, incluyendo aquellos con dosis más altas. Este resultado sugiere que, bajo las condiciones experimentales del estudio (momento de aplicación y manejo del cultivo), la molécula no permaneció o no se acumuló en el grano en concentraciones detectables por el método analítico empleado. En términos de inocuidad, este hallazgo indica que la cosecha evaluada se mantuvo por debajo del umbral de detección/cuantificación del laboratorio, aun cuando sí se registró residualidad en el suelo.

Figure 1

*Residualidad de glifosato en grano (semillas) de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) bajo diferentes dosis aplicadas en UNFLEP, Esteli.*

Tratamientos	Resultado
5 mg L ⁻¹	No detectable
10 mg L ⁻¹	No detectable
15 mg L ⁻¹	No detectable
20 mg L ⁻¹	No detectable

Fuente: Elaboración propia

Este resultado es consistente con los criterios internacionales de inocuidad, ya que cuando los residuos se encuentran por debajo del límite máximo permitido (LMR) o del umbral detectable por el método, se reportan como no detectados (Codex Alimentarius). Asimismo, desde el enfoque toxicológico, la EPA (2009) establece parámetros de referencia (p. ej., RfD) que orientan la evaluación del riesgo, y la ausencia de detección en el grano contribuye a reducir preocupaciones asociadas a exposición dietaria en el lote evaluado.

De manera complementaria, revisiones científicas sobre glifosato en agroecosistemas señalan que la presencia de residuos en partes cosechables depende fuertemente del momento de aplicación, la dosis, y el intervalo pre-cosecha, por lo que aplicaciones tempranas o alejadas de la cosecha pueden resultar en residuos no detectables en el grano, aun cuando existan residuos en el suelo (Van Bruggen et al., 2018). En ese sentido, los resultados del presente estudio concuerdan con la evidencia de que el grano puede no reflejar necesariamente la



residualidad observada en el suelo, especialmente bajo condiciones de manejo que limitan la transferencia hacia la semilla.

Crecimiento vegetativo del frijol

El crecimiento vegetativo del frijol mostró diferencias significativas entre tratamientos, observándose una reducción progresiva en las variables evaluadas (altura de planta y desarrollo foliar) a medida que se incrementó la dosis de glifosato aplicada. El tratamiento testigo presentó los valores más altos de crecimiento, mientras que los tratamientos con dosis mayores evidenciaron un desarrollo vegetativo inferior, lo que sugiere un efecto negativo del herbicida sobre el vigor del cultivo.

Estos resultados indican que, aunque el glifosato no fue aplicado directamente sobre el cultivo, su residualidad en el suelo pudo haber influido en procesos fisiológicos asociados al crecimiento vegetal, afectando la capacidad de absorción de nutrientes y el desarrollo normal de las plantas.

Tabla 1.

*Variables de crecimiento vegetativo del frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) en función de las dosis de glifosato aplicadas, bajo condiciones experimentales en UNFLEP, Estelí.*

Treatments	plant height	Diameter	Root biomass	Leaf number
5 mg L-1	37±1.17 a	0.60±0.02 a	2.9±0.21 a	34±2.25 a
10 mg L-1	29±1.5 b	0.58±0.02 a	2.87±0.23 a	32±2.56 a
15 mg L-1	25±1.5 b	0.55±0.02 a	2.17±0.10 ab	26±1.84 ab
20 mg L-1	16±0.83 b	0.30±0.01 b	1.77±0.29 b	20±1.86 b

Fuente: Elaboración propia

Nota: Medias con letras diferentes presentan diferencias significativas ($p \leq 0.05$).



Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Zobiole et al. (2010), quienes documentan que la presencia de residuos de glifosato en el suelo puede generar efectos fitotóxicos indirectos, manifestados en una reducción del crecimiento vegetativo y alteraciones en el metabolismo de las plantas, aun cuando el herbicida no sea aplicado de forma directa sobre el cultivo.

De igual manera, Duke y Powles (2008) señalan que el glifosato puede interferir con procesos fisiológicos clave, como la absorción y translocación de nutrientes esenciales, lo que se traduce en una disminución del crecimiento y del vigor de las plantas en cultivos sensibles. Estos efectos pueden intensificarse cuando se utilizan dosis elevadas o se realizan aplicaciones repetidas.

Asimismo, Singh et al. (2020) reportan que la residualidad de glifosato en suelos agrícolas puede afectar negativamente el desarrollo vegetativo de cultivos subsiguientes, especialmente en sistemas donde el manejo del herbicida no considera prácticas de mitigación o rotación. En este contexto, los resultados del presente estudio confirman que el crecimiento vegetativo del frijol puede verse comprometido por la acumulación de glifosato en el suelo, lo que refuerza la necesidad de un manejo más racional del herbicida.

Rendimiento del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)

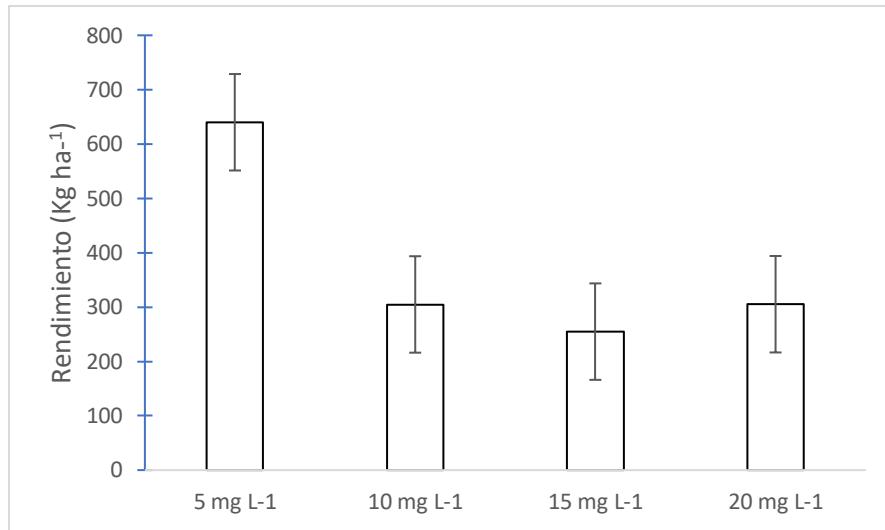
El rendimiento del frijol presentó diferencias significativas entre tratamientos, observándose una disminución progresiva a medida que se incrementó la dosis de glifosato aplicada. El tratamiento testigo alcanzó el mayor rendimiento, mientras que los tratamientos con dosis más elevadas mostraron reducciones marcadas en la producción de grano por unidad de superficie. Este comportamiento sugiere que la residualidad del glifosato en el suelo tuvo un efecto negativo acumulativo sobre el desempeño productivo del cultivo.

La reducción del rendimiento puede explicarse como una consecuencia directa de los efectos observados en el crecimiento vegetativo, ya que un menor desarrollo inicial limita la capacidad fotosintética y la formación de estructuras reproductivas, impactando finalmente la producción de grano.

Figura 2



*Rendimiento del frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) en función de las dosis de glifosato aplicadas, bajo condiciones experimentales en UNFLEP, Estelí.*



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Duke y Powles (2008), quienes señalan que la exposición a residuos de glifosato puede afectar procesos fisiológicos esenciales en las plantas, generando reducciones en el rendimiento, incluso cuando el herbicida no se aplica directamente sobre el cultivo. Estos efectos se relacionan con alteraciones en la absorción de nutrientes y en la eficiencia metabólica.

De forma similar, Zobiole et al. (2010) documentaron disminuciones significativas en el rendimiento de cultivos asociados a la presencia de glifosato en el suelo, atribuidas a efectos indirectos sobre la nutrición mineral y el equilibrio fisiológico de las plantas. Los autores destacan que estos impactos pueden intensificarse con el uso repetido o con dosis superiores a las recomendadas.

Asimismo, Singh et al. (2020) reportan que la persistencia del glifosato en suelos agrícolas puede comprometer el rendimiento de cultivos sensibles en ciclos posteriores, particularmente en sistemas donde no se implementan prácticas de manejo integrado. En este sentido, los resultados del presente estudio confirman que el rendimiento del frijol es

susceptible a los efectos de la residualidad del glifosato, reforzando la necesidad de un uso racional del herbicida para evitar pérdidas productivas.

Fertilidad del suelo

El análisis de los parámetros químicos del suelo evidenció variaciones en la disponibilidad de algunos nutrientes en función de las dosis de glifosato aplicadas. En general, los tratamientos con mayores niveles de residualidad mostraron cambios en la concentración de ciertos macronutrientes y micronutrientes, en comparación con el tratamiento testigo. En particular, se observaron modificaciones en la disponibilidad de fósforo y en algunos elementos secundarios, lo que sugiere que la presencia del herbicida en el suelo puede influir en la dinámica de nutrientes posterior a su aplicación.

Si bien algunos nutrientes presentaron incrementos puntuales en determinados tratamientos, estos cambios no necesariamente representan una mejora de la fertilidad, sino que podrían reflejar desequilibrios químicos en el suelo que afectan la disponibilidad real de los nutrientes para el cultivo. Estos resultados indican que la residualidad del glifosato puede alterar procesos edáficos asociados a la nutrición vegetal.

Tabla 2.

*Parámetros químicos del suelo posterior a la aplicación de glifosato, bajo diferentes dosis en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) en UNFLEP, Estelí.*

Elementos	Unidad	Sin Glifosato	Concentración de Glifosato			
			5 mg L ⁻¹	10 mg L ⁻¹	15 mg L ⁻¹	20 mg L ⁻¹
pH	-	7.35	6.81	7.09	6.95	6.55
MO	%	4.23	4.35	4.69	4.61	3.88
N	%	0.21	0.22	0.23	0.23	0.19
P	mg/kg	26.04	24.15	27.38	56.69	48.74
K	cmol+/kg	1.882	2	1.722	2.319	1.733



Ca	cmol+/kg	23.105	30.6	24.965	20.92	30.728
Mg	cmol+/kg	7.598	9.93	7.158	6.521	11.304
Fe	mg/kg	177.72	56.09	51.25	75.25	53.04
Cu	mg/kg	17.54	10.33	11.43	11.26	7.23
Zn	mg/kg	2.77	3.69	2.8	1.73	3.29
Mn	mg/kg	24.37	6.24	5.91	8.24	5.73

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos son consistentes con lo reportado por Zobiole et al. (2010), quienes señalan que la presencia de glifosato en el suelo puede interferir con la disponibilidad de nutrientes esenciales, particularmente fósforo y micronutrientes, debido a interacciones químicas y a la alteración de la actividad microbiana. Estos cambios pueden generar desequilibrios nutricionales que afectan el desarrollo de los cultivos.

De manera similar, Giesy et al. (2000) indican que el glifosato, al adsorberse fuertemente a partículas del suelo, puede modificar la dinámica de ciertos elementos minerales, influyendo en su movilidad y disponibilidad. Este efecto resulta más evidente cuando se aplican dosis elevadas o se realizan aplicaciones repetidas del herbicida.

Asimismo, Van Bruggen et al. (2018) reportan que el uso intensivo de glifosato puede alterar procesos biogeoquímicos del suelo, afectando tanto la fertilidad como la salud edáfica a largo plazo. En este contexto, los resultados del presente estudio confirman que el manejo inadecuado del glifosato no solo impacta el cultivo, sino que también puede comprometer la funcionalidad del suelo como recurso productivo.

Conclusiones

El estudio demuestra que la aplicación de dosis crecientes de glifosato incrementa su residualidad en el suelo, confirmando que el manejo inadecuado del herbicida favorece su persistencia edáfica. Esta acumulación representa un factor de riesgo para la sostenibilidad



del sistema productivo, ya que puede generar efectos acumulativos en ciclos agrícolas sucesivos.

En el análisis de residuos en grano de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), no se detectó presencia de glifosato en ninguno de los tratamientos evaluados, lo que indica que, bajo las condiciones experimentales del estudio, el herbicida no se acumuló en la semilla en concentraciones detectables. Este resultado sugiere que el momento de aplicación y el manejo del cultivo influyeron en limitar la transferencia del glifosato hacia el grano, contribuyendo a la inocuidad del producto cosechado.

No obstante, la residualidad del glifosato en el suelo tuvo efectos negativos sobre el crecimiento vegetativo del frijol, evidenciándose una reducción progresiva del vigor de las plantas a medida que aumentaron las dosis aplicadas. Estas alteraciones en el desarrollo inicial se reflejaron posteriormente en una disminución significativa del rendimiento del cultivo, confirmando la relación entre el estado vegetativo y la productividad final.

Asimismo, se identificaron modificaciones en algunos parámetros de fertilidad del suelo, particularmente en la disponibilidad de ciertos nutrientes, lo que indica que la presencia de glifosato puede generar desequilibrios químicos y afectar procesos edáficos relevantes para la nutrición vegetal. Estos cambios no deben interpretarse como mejoras en la fertilidad, sino como alteraciones que pueden comprometer la eficiencia del uso de nutrientes por el cultivo.

En conjunto, los resultados confirman que, aunque el glifosato es una herramienta eficaz para el control de malezas, su uso excesivo o inadecuado puede afectar negativamente el rendimiento del frijol y la calidad del suelo, aun cuando no se detecten residuos en el grano.

Por ello, se recomienda promover el uso racional del glifosato, el respeto a las dosis técnicas recomendadas y la incorporación de estrategias de manejo integrado de malezas, orientadas a reducir la dependencia del herbicida y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas productivos de frijol en Nicaragua.

Conflicto de intereses

La investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Universidades (CNU), actualmente Consejo Nacional de Rectores, y ejecutada en la Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda (UNFLEP). Los análisis de residuos de glifosato se realizaron en el Laboratorio Nacional del Instituto de Protección y Sanidad Agropecuaria (IPSA). El financiamiento y apoyo institucional no influyeron en el diseño metodológico, análisis, interpretación de resultados ni redacción del manuscrito, y no existieron intereses comerciales asociados.

Consideraciones éticas

El estudio se desarrolló respetando los principios de integridad científica y derecho de autor. La recolección y análisis de muestras de suelo y grano se realizaron conforme a protocolos técnicos y buenas prácticas agrícolas vigentes.

Declaración de contribuciones de los autores

Arnoldo José Treminio Aguirre y Pablo Fabián Medina, en calidad de estudiantes investigadores, participaron en la conceptualización, ejecución, análisis de datos y redacción del manuscrito. **Didier Gabriel Matey Fajardo y Juan Octavio Meneses Córdoba**, docentes investigadores, brindaron supervisión académica, revisión crítica y validación de la versión final. Los análisis de laboratorio fueron realizados por el IPSA.

Bibliografía

Codex Alimentarius Commission. (2018). *Maximum residue limits for pesticides (Codex Pesticide Residues in Food Online Database)*. FAO/WHO.
<https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/dbs/pestres/en/>

Duke, S. O., & Powles, S. B. (2008). Glyphosate: A once-in-a-century herbicide. *Pest Management Science*, 64(4), 319–325. <https://doi.org/10.1002/ps.1518>

Duke, S. O., Lydon, J., Koskinen, W. C., Moorman, T. B., Chaney, R. L., & Hammerschmidt, R. (2012). Glyphosate effects on plant mineral nutrition, crop rhizosphere microbiota,



- and plant disease in glyphosate-resistant crops. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(42), 10375–10397. <https://doi.org/10.1021/jf302436u>
- FAO. (2006). *Guidelines for soil description* (4th ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/a0541e/a0541e.pdf>
- FAO. (2016). *Save and grow in practice: Maize, rice, wheat – A guide to sustainable cereal production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i4009e/i4009e.pdf>
- Giesy, J. P., Dobson, S., & Solomon, K. R. (2000). Ecotoxicological risk assessment for Roundup® herbicide. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 167, 35–120. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1156-3_2
- Gómez, K. A., & Gómez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470600919>
- IPSA. (2020). *Manual técnico para el análisis de residuos de plaguicidas en productos agrícolas*. Instituto de Protección y Sanidad Agropecuaria de Nicaragua.
- Mesnage, R., Defarge, N., Spiroux de Vendômois, J., & Séralini, G.-E. (2015). Potential toxic effects of glyphosate and its commercial formulations below regulatory limits. *Environmental Health*, 14(42). <https://doi.org/10.1186/s12940-015-0056-1>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119492443>
- Singh, B. K., Walker, A., & Wright, D. J. (2020). Degradation of glyphosate in agricultural soils and effects on soil microbial activity. *Journal of Environmental Management*, 255, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109118>
- Steel, R. G. D., Torrie, J. H., & Dickey, D. A. (1997). *Principles and procedures of statistics: A biometrical approach* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2009). *Glyphosate human health risk assessment*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/glyphosate>

Van Bruggen, A. H. C., He, M. M., Shin, K., Mai, V., Jeong, K. C., Finckh, M. R., & Morris, J. G. (2018). Environmental and health effects of the herbicide glyphosate. *Science of the Total Environment*, 616–617, 255–268.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.309>

Zobiole, L. H. S., Kremer, R. J., Oliveira, R. S., & Constantin, J. (2010). Glyphosate affects micro-organisms in rhizospheres of glyphosate-resistant soybeans. *Journal of Applied Microbiology*, 110(1), 118–127.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2010.04864.x>