



ORIGINAL

## Efecto del glifosato sobre la microbiota, calidad del suelo y cultivo de frijol biofortificado en el departamento del Cesar, Colombia

Adriana Patricia Tofiño Rivera<sup>a,\*</sup>, Rafael Enrique Carbone Murgas<sup>b</sup>,  
Aslenis Emidia Melo Ríos<sup>c</sup> y Luciano José Merini<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia, Centro de Investigación Motilonia, Valledupar, Colombia

<sup>b</sup> Agronomía Pecuaria y Ciencias Medio Ambientales ECAPMA, Programa de Agronomía, Valledupar, Colombia

<sup>c</sup> Universidad de Santander, Facultad Ciencias de la Salud, Grupo de Investigación CIENCIAUDES, Valledupar, Colombia

<sup>d</sup> Universidad de Buenos Aires, INTA-CONICET-Universidad Nacional de La Pampa, La Pampa, Argentina

Recibido el 12 de enero de 2018; aceptado el 7 de enero de 2019

### PALABRAS CLAVE

Leguminosas;  
Herbicidas;  
Actividad rizosférica;  
Enfermedades  
fúngicas

**Resumen** Las estrategias en seguridad alimentaria con cultivos de alto contenido nutricional deben enmarcarse en prácticas agrícolas sostenibles, orientadas a la conservación del suelo, el alto rendimiento y la inocuidad. Esta última característica implica la producción de alimentos sin trazas detectables de agroquímicos, los que podrían amenazar la salud del consumidor. Se desarrolló un estudio con el objetivo de evaluar el efecto del herbicida glifosato sobre la fertilidad química y microbiológica del suelo, así como su residualidad en la semilla de frijol biofortificado cultivado en el departamento de Cesar, Colombia. La metodología comprendió un análisis correlacional de indicadores de calidad de suelo, rendimiento del cultivo y residualidad en los granos. Los tratamientos evaluados incluyeron la aplicación o no de glifosato, el uso de coberturas sintéticas (*mulch*) o naturales, frente al control manual de las malezas. Se hallaron diferencias de rendimiento y de la respuesta de los indicadores químicos y microbiológicos en función del tratamiento y las condiciones iniciales de la rizósfera de frijol. La aplicación del herbicida glifosato en suelo sin *mulch* generó una disminución del 29% en el rendimiento, asociada a la mayor prevalencia de plagas y enfermedades fúngicas. En ninguno de los tratamientos con aplicación de glifosato se observó residualidad de este herbicida en semillas, pero sí de otras moléculas derivadas de insecticidas usados en el sistema local de producción. De este estudio se concluyó que en lotes de frijol biofortificado con alta presión de la maleza *Cyperus rotundus* (coquito),

\* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: [atofino@corpoica.org.co](mailto:atofino@corpoica.org.co) (A.P. Tofiño Rivera).

<https://doi.org/10.1016/j.ram.2019.01.006>

0325-7541/© 2019 Asociación Argentina de Microbiología. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Cómo citar este artículo: Tofiño Rivera AP, et al. Efecto del glifosato sobre la microbiota, calidad del suelo y cultivo de frijol biofortificado en el departamento del Cesar, Colombia. Rev Argent Microbiol. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2019.01.006>

## KEYWORDS

Legumes;  
Herbicidas;  
Rhizospheric activity;  
Fungal diseases

se recomienda el uso del herbicida glifosato acompañado de *mulch* como alternativa para mantener la productividad en el tiempo. Esto constituye un sistema de protección frente al efecto negativo del herbicida sobre ambos, el sistema radical de la planta y la microbiota del suelo. © 2019 Asociación Argentina de Microbiología. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## Effect of glyphosate on microbiota, soil quality and biofortified bean crop in Codazzi, department of Cesar, Colombia

**Abstract** Strategies aimed at achieving food safety in crops of high nutritional value should be carried out through sustainable agricultural practices aimed at soil conservation, high yield and food safety. This latter characteristic implies food production without detectable traces of agrochemicals that threaten health. The objective of this study was to assess the effect of the herbicide glyphosate on the chemical and biological fertility of the soil and to determine its residual activity on biofortified bean seeds in Codazzi, Department of Cesar, Colombia. The method included a correlational analysis of soil quality, crop yield and residuality in bean grains. The treatments included glyphosate application and synthetic and natural mulches, compared to manual control. The results showed differences in the response of chemical, microbiological and yield indicators between treatments and the initial conditions of the bean rhizosphere. The use of the herbicide glyphosate in mulch-free soil generates yield losses of 29% associated with a higher incidence of pests and fungal diseases; in all treatments, no glyphosate residuality was detected in seeds; however, residuality was detected in other molecules derived from insecticides associated with the local production system. In conclusion, in plots with high weed pressure by *Cyperus rotundus*, the use of mulch is recommended as an alternative to maintain bean productivity over time; by offering protection against the effect of the herbicide on both the root system of the plant and the soil microbiota of the biofortified bean crop.

© 2019 Asociación Argentina de Microbiología. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## Introducción

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es la leguminosa alimenticia más importante del mundo para el consumo humano, con 25,1 millones de toneladas de producción en 2014, de las cuales Colombia participó con el 0,7% (170.504 t)<sup>13</sup>. En Colombia, el frijol se produce principalmente en la región Andina (85%) y en la costa Atlántica (13%)<sup>33,34</sup>.

El área actual de siembra de esta leguminosa es de 128.234 ha a nivel nacional. De ellas, aproximadamente 15.396 ha se encuentran en el Caribe colombiano; específicamente, en los departamentos de Cesar y de La Guajira, donde hay en promedio 6.185 y 1370 ha<sup>27</sup>, respectivamente. La producción de frijol a partir de estas áreas es insuficiente para satisfacer la demanda regional de este alimento. Los departamentos Cesar y La Guajira se ubican entre aquellos que muestran los valores más altos de inseguridad alimentaria<sup>17</sup>. Atendiendo a que el frijol forma parte de la canasta básica, es la especie ideal para impactar sobre la nutrición de la población vulnerable a través de la biofortificación de cultivos<sup>28</sup>.

El frijol biofortificado alcanza una mayor concentración de Fe y Zn en su semilla<sup>28,41</sup>. Sin embargo, la siembra de este tipo de frijol en el Caribe seco estaría limitada por problemas de competitividad de esta cadena productiva,

asociados con los elevados costos económicos y ambientales y la inestabilidad de los precios de venta, en el marco de una producción reducida, estacionaria y escasamente tecnificada<sup>42</sup>.

En muchas zonas donde los agricultores han intensificado la producción de esta leguminosa, el uso excesivo de plaguicidas se ha convertido en un problema grave<sup>9</sup>. El frijol es altamente sensible a la competencia que ejercen las malezas por la luz, el espacio (puede haber hasta 400 plantas por metro cuadrado) y el consumo de nutrientes (de hasta 42, 6 y 36 kg/ha de N, P y K, respectivamente). En este sentido, el manejo de la maleza *Cyperus rotundus* L. (Cyperaceae) es uno de los principales problemas. Esta maleza, de alta incidencia en cultivos de frijol en el departamento de Cesar, requiere especial consideración, pues se ha documentado su efecto inhibitor (alelopatía) sobre la germinación y el crecimiento de los cultivos. Su manejo está basado en el uso de herbicidas químicos<sup>6,30,40</sup>. Esta especie se caracteriza por su rápida proliferación en suelos desnudos y con temperaturas entre 25 y 35 °C<sup>30</sup>.

La literatura científica registra que la utilización del herbicida glifosato en el cultivo del frijol —para controlar en postemergencia malezas que crecen en callejones— afecta a las plántulas por el movimiento de este producto en el suelo y su contacto con las raíces; inclusive se refiere la mortalidad de plántulas de frijol en el control preemergente de

malezas, antes de la siembra del cultivo<sup>20</sup>. Además, se ha informado el incremento de la incidencia de enfermedades radicales de origen fúngico<sup>44</sup>.

Las lesiones en el tejido radical ocasionadas por el herbicida favorecen el ingreso de fitopatógenos, lo que va acompañado de cambios en los exudados, que a su vez alteran la microbiota rizosférica y las propiedades fisicoquímicas del suelo<sup>40,44</sup>. Por tal motivo, se recurre al uso de coberturas plásticas, para evitar una alta percolación del glifosato a través del suelo y como barrera entre las raíces del frijol y el químico<sup>20,44</sup>. Además, dados los reportes de residualidad de pesticidas en alimentos, es necesario reevaluar los beneficios agrícolas de la aplicación de químicos sobre el rendimiento de los cultivos en relación con su calidad e inocuidad. Bohm et al.<sup>4</sup> detectaron que las aplicaciones de glifosato en postemergencia durante el cultivo de soja transgénica en un suelo Planosol de Brasil derivó en la existencia de residuos de la molécula en los granos —los cuales sobrepasaron el límite máximo de residuos (10 mg/kg)— así como también en la presencia de ácido aminometilfosfórico (AMPA), principal metabolito de degradación de este herbicida.

Por otra parte, se ha aceptado que las leguminosas influyen en el mejoramiento de las condiciones del suelo, lo cual es de gran importancia ecosistémica, si se tiene en cuenta que, en Colombia, alrededor del 80% del suelo está afectado por procesos erosivos causados, entre otros factores, por el clima y las prácticas agrícolas tradicionales inadecuadas<sup>25,41,42</sup>. Las prácticas de manejo agrícola de alto impacto ambiental sobre el sistema edáfico ocasionan disminución de la productividad de los cultivos y pérdida de la cobertura vegetal, pero, sobre todo, incapacitan a la microbiota del suelo para cumplir sus funciones en los ciclos biogeoquímicos<sup>10,11,39</sup>.

De acuerdo con lo anterior, se hace necesario evaluar estrategias de manejo que permitan mantener la función ecosistémica del cultivo de frijol y su productividad, así como mitigar los procesos de degradación antrópica del suelo en ambientes tan vulnerables como el Caribe seco<sup>42</sup>. En esta ecorregión colombiana se pueden alcanzar temperaturas de hasta 40 °C en marzo, con una media anual de 28 °C. La precipitación anual promedio es de 500 mm, con un fotoperiodo de 6,3 h/día y una humedad relativa entre el 47 y el 60%. Los niveles de desertificación están entre las categorías alta y muy alta en más del 75% de su territorio, principalmente en los departamentos de Cesar y La Guajira<sup>32</sup>. Esta región también se caracteriza por las inadecuadas prácticas de manejo y la escasa tecnificación de cultivos transitorios, que ha ocasionado un incremento en la presión de malezas en esta zona<sup>19,25,40</sup>.

El control de malezas es un componente fundamental para alcanzar sistemas productivos sostenibles cuando se decide disminuir el uso excesivo de agroquímicos con la intención de evitar la incorporación de estos en las cadenas tróficas, para no afectar a los seres humanos ni a la calidad del suelo<sup>37</sup>.

Recientemente, la Corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA) registró para la subregión Caribe seco dos nuevas variedades de frijol biofortificado: CORPOICA rojo 39 y CORPOICA rojo 43<sup>41</sup>. Sin embargo, los indicadores ambientales del impacto de las nuevas variedades requieren la estructuración de un modelo productivo

acorde con la vulnerabilidad de los suelos regionales<sup>40</sup> y la alta presión de malezas, además del uso adecuado de agroinsumos ligados a la tecnología local de producción<sup>25</sup> y a las características fitoextractivas del frijol. Este último aspecto puede afectar la inocuidad del grano producido bajo la tecnología local<sup>25,41,42</sup>.

En consecuencia, para avanzar en el desarrollo de una propuesta de producción sostenible de frijol biofortificado en el norte del departamento de Cesar, en Colombia, se evaluó el efecto del herbicida glifosato sobre indicadores de calidad y de fertilidad química y microbiológica del suelo frente a otras opciones de manejo de malezas predominantes en cultivos de hortalizas en el Caribe seco, como *C. rotundus* (coquito), *Amaranthus dubius* Mart. ex Thell. (Amaranthaceae) (bledo), *Ipomoea tiliacea* (Willd.) Choisy (Convolvulaceae) (campanita) y *Cucumis melo* L. (Cucurbitaceae) (meloncillo)<sup>19</sup>.

## Materiales y métodos

### Localización

La investigación se desarrolló durante el segundo semestre de 2014 en parcelas experimentales de AGROSAVIA (Centro de Investigación [CI] Motilonia), ubicadas al norte del departamento de Cesar, en el municipio Agustín Codazzi (coordenadas 10° 1' 58,512'' N - 73° 13' 29,946'' O, 120 m s.n.m.).

### Plantas

Se utilizó la variedad de frijol (*Phaseous vulgaris* L.) biofortificado CORPOICA rojo 39, tolerante a calor y suelos de baja fertilidad. Se evaluaron aleatoriamente 20 plantas por tratamiento y réplica.

### Malezas

Al inicio del ensayo se midió la densidad de malezas en número de individuos por metro cuadrado utilizando una cuadrícula de 0,25 m<sup>2</sup>, que fue arrojada aleatoriamente al lote 5 veces, luego se colectaron todas las malezas y se identificaron las especies presentes con claves taxonómicas<sup>1</sup>, además se estimó su proporción.

### Suelo

Se colectaron 500 g a partir de 5 puntos de muestreo en forma de X por cada parcela de 5 × 5 m, con una profundidad de 15 cm (para el análisis microbiológico) y de 30 cm (para el análisis químico). Las muestras compuestas así obtenidas se uniformizaron, se empaquetaron en bolsas herméticas y se transportaron, con refrigeración de 4 °C, hasta el laboratorio de análisis. Para contrarrestar el efecto de la heterogeneidad del suelo, se marcó cada punto de muestreo inicial para una nueva colecta después de la aplicación de los tratamientos.

## Siembra de frijol

Se sembraron parcelas con una distancia entre las plantas de 20 cm y entre cada surco de 60 cm, con un diseño de bloques completamente aleatorizados, con 4 réplicas en arreglo factorial. Cada uno de estos bloques estaba destinado a diferentes tratamientos de control de *C. rotundus*, como maleza principal. Se realizó fertilización uniforme con fosfato diamónico en todas las parcelas, sobre la base de lo encontrado en el análisis químico inicial.

## Aplicación de tratamientos

La aplicación del herbicida glifosato se realizó según especificaciones técnicas, en una dosis de 2,5 l diluidos en 200 l de agua por hectárea, justo antes de la siembra, y a los 15, 30 y 45 días después de la siembra (DDS); en esta última aplicación, el herbicida se dejó actuar durante 3 días, tras lo cual se tomaron muestras para la evaluación de diversos parámetros hasta la cosecha del cultivo (68 DDS). Se evaluaron los siguientes tratamientos: T0, terreno inicial antes de la siembra con frijol, sin control postemergente de malezas; T1, terreno con siembra previa de frijol sin *mulch* y control de malezas con aplicación de glifosato; T2, terreno con siembra previa de frijol cubierto por *mulch* y control de malezas con aplicación de glifosato; T3, testigo con siembra previa de frijol, control de malezas manual; y T4, testigo con siembra previa de frijol, con labranza mínima y cobertura vegetal. El tratamiento con *mulch* correspondió a un acolchado plástico (Growers solution, Tennessee, EE. UU.) de color blanco y negro, de 1,2 m de ancho, para una cama de 60 cm, calibre de 2,28 mm, perforación parcial con diámetro de 6,35 cm y 45 cm entre espaciamento. La efectividad de cada tratamiento en la reducción de malezas se midió aplicando la misma técnica de caracterización inicial<sup>1</sup>.

## Medición de variables químicas y microbiológicas

Para la medición de variables microbiológicas se enviaron las muestras a la Universidad de Santander (UDES), sede Valledupar. En cada muestra se realizó el recuento de bacterias, hongos y actinomicetos usando la técnica de diluciones seriadas y siembra en profundidad con 20 ml de medio agarizado en placa de Petri. Se expresaron en unidades formadoras de colonia por gramo de suelo seco (UFC/g de suelo). Dado que las enfermedades de origen fúngico son las de mayor prevalencia en el cultivo de frijol en la zona bajo estudio, se realizó la identificación de géneros de hongos (benéficos y fitopatógenos, incluidos *Macrophomina*, *Colletotrichum*, *Fusarium* y *Phytophthora*) mediante observación macro y microscópica, así como con claves taxonómicas<sup>39</sup> y análisis moleculares para confirmar fitopatógenos. Estos últimos fueron realizados en los laboratorios de la Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB) en Medellín, con la técnica de reacción en cadena de la polimerasa (PCR) con *primers* universales, utilizando las regiones espaciadoras internas transcritas ITS1 e ITS4. Los productos fueron enviados a la empresa MacroGen (Corea) para su secuenciación. Las secuencias *forward* y *reverse* fueron depuradas, editadas y alineadas mediante el *software* Geneious, versión 9.1.5. Las secuencias consenso se compararon con las

disponibles en la base de datos del Genbank nucleótido BLAST, para determinar la identidad de los aislamientos.

Para el análisis químico de los suelos, las muestras se enviaron al laboratorio de suelos de Corpoica CI Tibaitatá, en Bogotá. Los indicadores determinados fueron fósforo disponible (Bray II); potasio disponible (método de Olsen); pH (método del potenciómetro relación suelo-agua 1:5); contenido de materia orgánica (Walkley-Black modificado), además de Fe, Mn, Cu, Ca, y Al, medidos de acuerdo con los métodos descritos en el manual de suelos del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA)<sup>18</sup>.

## Medición de variables agronómicas

Se tomaron 20 plantas por parcela para medir en prefloración y posfloración la incidencia de plagas, que fueron identificadas en la unidad de entomología de AGROSAVIA CI Motilonia. La incidencia de enfermedades con identificación del agente causal se estableció mediante el muestreo de plantas sintomáticas y el uso de tablas de incidencia de plagas y enfermedades<sup>2</sup>, según la metodología descrita por Melo et al.<sup>25</sup>. En cosecha, se determinó el peso de producción en cada parcela y el peso de 1.000 semillas con el uso de una balanza analítica (Precisa®, Suiza); también se hizo el recuento de vainas/planta y de semillas/vaina.

## Prueba de residualidad en semillas de frijol

Para medir el impacto de la aplicación del herbicida en el producto aprovechable del cultivo de frijol (grano), se realizó el análisis de residualidad de glifosato en 1.000 g de semillas en el laboratorio de análisis de pesticidas Fytolab, por el método de multiresiduo por cromatografía de gases (GC-MSMS) y cromatografía líquida (LC-MSMS) certificado por ISO 172025:2005 para frutas, vegetales y cereales (límite máximo residual: 0,1 mg/kg).

## Análisis estadístico

Las variables se sometieron a pruebas de estadística descriptiva como promedio y desviación estándar. Posteriormente se hizo un análisis de varianza seguido de la prueba de Tukey ( $p \leq 0,05$ ), para comparación de medias entre tratamientos. Por último, se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) para analizar la relación entre tratamientos, variables de calidad de suelo y productividad del frijol biofortificado CORPOICA rojo 39. Se utilizó el *software* SPSS versión 20 (IBM, Armonk, Nueva York, EE. UU.).

## Resultados

Las malezas identificadas correspondieron principalmente a *A. dubius*, *C. rotundus* y *Dracaenafragrans* (L.) Ker Gawl. (Asparagaceae) (palo de agua), con una prevalencia del 28,6; 22 y 19,9%, respectivamente.

En general, el recuento de poblaciones microbianas de bacterias, hongos y actinomicetos se encontró dentro de los niveles reportados por diversos autores para suelos tropicales<sup>25,26</sup> en todos los tratamientos, con un aumento significativo ( $p \leq 0,05$ ) en el número de bacterias y hongos

**Tabla 1** Indicadores microbiológicos en lotes cultivados con frijol biofortificado CORPOICA rojo 39 con distintos manejos para el control de malezas (48 DDS)

Tratamientos	Bacterias UFC/g	Hongos UFC/g	Actinomicetos UFC/g	Géneros fúngicos identificados
T0	$4,1 \times 10^{5b}$	$6,8 \times 10^{2a}$	$1,2 \times 10^{5b}$	<i>Aspergillus</i> spp., <i>Trichoderma</i> , <i>Penicillium Rhizopus</i>
T1	$3,6 \times 10^{6b}$	$3,2 \times 10^{4c}$	$4,2 \times 10^{5d}$	<i>Phytophthora</i> , <i>Aspergillus</i> spp., <i>Rhizopus Penicillium</i> , <i>Fusarium</i>
T2	$2,0 \times 10^{5a}$	$2,2 \times 10^3$ b	$2,5 \times 10^{4a}$	<i>Aspergillus</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Fusarium</i>
T3	$1,3 \times 10^{5a}$	$7,0 \times 10^2$ a	$1,5 \times 10^{5b}$	<i>Aspergillus</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Rhizopus</i>
T4	$4,4 \times 10^{7c}$	$1,4 \times 10^{5d}$	$2,7 \times 10^{5c}$	<i>Phytophthora</i> , <i>Aspergillus</i> spp., <i>Rhizopus</i> , <i>Macrophomina</i>

T0, terreno inicial antes de la siembra con frijol, sin control postemergente de malezas; T1, terreno con siembra previa de frijol sin *mulch* y control de malezas con aplicación de glifosato; T2, terreno con siembra previa de frijol cubierto por *mulch* y control de malezas con aplicación de glifosato; T3, testigo con siembra previa de frijol, control de malezas manual; y T4, testigo con siembra previa de frijol, con labranza mínima y cobertura vegetal.

DDS: días después de la siembra; UFC/g: unidades formadoras de colonias por gramo de suelo seco.

\*Valores en una misma columna seguidos de la misma letra no difieren significativamente según Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

en el manejo de malezas T4 (labranza mínima y cobertura vegetal). Los niveles más bajos de bacterias y hongos se observaron con el desmalezado manual (T3) y aplicación de glifosato combinada con uso de *mulch* (T2), que se mantuvieron en valores similares a los del suelo inicial presiembra (tabla 1). Los géneros de hongos identificados en el suelo de manera inicial, antes del establecimiento del cultivo, no incluían fitopatógenos, aunque estos sí se encontraron en el manejo con glifosato (con y sin *mulch*) y con labranza mínima, lo cual podría asociarse con diversos factores, como la presencia del cultivo; la aplicación del agroquímico, que genera lesiones en la raíz y facilita el ingreso de fitopatógenos, y la intensidad de manejo agrícola<sup>25</sup>.

La calidad microbiológica del cultivo en términos de la relación entre hongos patógenos y aquellos benéficos solo fue favorable en T3 (control manual de malezas), donde además hubo menor prevalencia de plagas y enfermedades. En este tratamiento se mantuvieron las condiciones presiembra, pues no se identificaron hongos fitopatógenos del suelo, mientras que el género *Fusarium* solo se identificó en los tratamientos donde se aplicó glifosato, con *mulch* y sin *mulch*.

La mayoría de los indicadores químicos evaluados variaron frente a los tratamientos aplicados; en su mayoría, con significación entre los distintos tratamientos y respecto de las condiciones iniciales presiembra ( $p \leq 0,05$ ). Entre ellos se destacan los valores aumentados de materia orgánica y conductividad en el T2 (aplicación de glifosato, con *mulch*; tabla 2). Específicamente, la materia orgánica del suelo fue superior en los tratamientos donde se aplicó control químico de malezas con glifosato, con niveles del 1,82% en el T2 (con uso de *mulch*), seguido del 1,48% en el T1 (sin uso de *mulch*). En los demás tratamientos, este indicador no presentó diferencias significativas respecto del estado inicial ( $p > 0,05$ ). El pH del suelo subió significativamente en todos los tratamientos —a excepción del T2—, el mayor valor (6,79) se observó con el T3, dada la ausencia de compuestos acidificantes.

Dentro de los lotes bajo cultivo, el mayor valor de azufre disponible en el suelo se observó en el T2. La conductividad disminuyó en todos los tratamientos, a excepción del T2, en el cual aumentó significativamente en relación con la medición del T0 inicial. De igual forma y en consonancia con la conductividad, se observó aumento de la reacción del sodio en el T2, con diferencias significativas en relación con los demás tratamientos.

Los demás macroelementos magnesio y potasio no presentaron diferencias entre tratamientos ( $p > 0,05$ ), pero sí con respecto al control T0 en condiciones de presiembra. La reacción del calcio disminuyó en los tratamientos con cobertura y aumentó en relación con el suelo en presiembra (T0) de los tratamientos sin *mulch* (T1) y control manual (T3), mientras que la capacidad de intercambio catiónico mostró diferencias entre todos los tratamientos.

El hierro asimilable disminuyó en todos los tratamientos respecto del valor inicial. Se hallaron diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre tratamientos, con valores menores en aquellos tratamientos con suelo expuesto (T1 y T3) y mayores en los tratamientos bajo cobertura plástica o natural (T2 y T4).

Se registró una leve disminución del manganeso disponible en el suelo en todos los tratamientos, a excepción del T2, donde se lo encontró en mayor concentración, hecho asociado a la inmovilización de este elemento producida por el herbicida con aplicación directa. Asimismo, se observó una disminución en la concentración de los microelementos zinc y boro en relación con la concentración inicial presiembra en suelo en T1, T2 y T3, con un nivel intermedio en T4 (labranza mínima y cobertura) respecto de los demás tratamientos, mientras que el cobre fue variable en todos los tratamientos.

En cuanto al rendimiento del cultivo de frijol, el control manual de malezas (T3), que tuvo un 98,5% de efectividad, se asoció con los mayores rendimientos, que fueron superiores a la media regional, de 0,8 t/ha<sup>26</sup>. Este tratamiento registró 0,96 t/ha; 10,1 vainas por planta y 5,42

**Tabla 2** Indicadores químicos en lotes cultivados con frijol biofortificado CORPOICA rojo 39 con distintos manejos para el control de malezas (48 DDS)

Tratamiento	T0	T1	T2	T3	T4
pH	5,31 ± 0,1 <sup>a</sup>	6,54 ± 0,2 <sup>c</sup>	5,46 ± 0,1 <sup>a</sup>	6,79 ± 0,1 <sup>c</sup>	5,74 ± 0,0 <sup>b</sup>
Materia orgánica (%)	0,80 ± 0,1 <sup>a</sup>	1,48 ± 0,2 <sup>b</sup>	1,82 ± 0,4 <sup>c</sup>	0,95 ± 0,0 <sup>a</sup>	0,96 ± 0,1 <sup>a</sup>
Conductividad eléctrica (dS/m)	1,6 ± 0,03 <sup>b</sup>	0,19 ± 0,01 <sup>a</sup>	2,52 ± 0,02 <sup>c</sup>	0,13 ± 0,04 <sup>a</sup>	0,12 ± 0,00 <sup>a</sup>
Fósforo (mg/kg)**	203 ± 13,1 <sup>d</sup>	106,41 ± 9,7 <sup>b</sup>	28,39 ± 2,5 <sup>a</sup>	117,62 ± 8,2 <sup>c</sup>	219,08 ± 10,2 <sup>e</sup>
Azufre (mg/kg)**	57,5 ± 2,5 <sup>c</sup>	2,32 ± 0,9 <sup>a</sup>	29,62 ± 1,1 <sup>b</sup>	2,20 ± 1,3 <sup>d</sup>	1,79 ± 1,8 <sup>a</sup>
Calcio (cmol <sup>+</sup> /kg)**	5,2 ± 1,4 <sup>b</sup>	5,50 ± 0,3 <sup>c</sup>	3,63 ± 1,0 <sup>a</sup>	6,93 ± 1,9 <sup>d</sup>	3,74 ± 1,6 <sup>a</sup>
Magnesio (cmol <sup>+</sup> /kg)**	0,8 ± 0,2 <sup>a</sup>	1,23 ± 0,1 <sup>cd</sup>	1,53 ± 0,1 <sup>d</sup>	1,05 ± 0,2 <sup>bc</sup>	0,93 ± 0,1 <sup>ab</sup>
Potasio (cmol <sup>+</sup> /kg)**	0,7 ± 0,2 <sup>b</sup>	0,20 ± 0,1 <sup>a</sup>	0,20 ± 0,1 <sup>a</sup>	0,18 ± 0,0 <sup>a</sup>	0,11 ± 0,1 <sup>a</sup>
Sodio (cmol <sup>+</sup> /kg)**	0,04 ± 0,0 <sup>a</sup>	0,07 ± 0,0 <sup>b</sup>	1,15 ± 0,1 <sup>c</sup>	0,04 ± 0,0 <sup>a</sup>	0,05 ± 0,0 <sup>ab</sup>
CIC	6,8 ± 0,1 <sup>c</sup>	7,01 ± 0,2 <sup>d</sup>	6,51 ± 0,0 <sup>b</sup>	8,20 ± 0,5 <sup>e</sup>	4,83 ± 0,4 <sup>a</sup>
Hierro (mg/kg)**	283 ± 21 <sup>e</sup>	55,90 ± 7 <sup>b</sup>	143,00 ± 26 <sup>c</sup>	31 ± 5 <sup>a</sup>	206 ± 25 <sup>d</sup>
Manganeso (mg/kg)**	5,2 ± 0,9 <sup>d</sup>	4,50 ± 0,2 <sup>c</sup>	6,20 ± 0,6 <sup>e</sup>	1,50 ± 0,3 <sup>a</sup>	2,00 ± 0,1 <sup>b</sup>
Zinc (mg/kg)**	3,7 ± 0,0 <sup>c</sup>	0,80 ± 0,0 <sup>a</sup>	0,90 ± 0,1 <sup>a</sup>	0,70 ± 0,1 <sup>a</sup>	3,30 ± <sup>b</sup>
Cobre (mg/kg)**	3,4 ± 0,1 <sup>d</sup>	2,60 ± 0,1 <sup>b</sup>	0,90 ± 0,0 <sup>a</sup>	2,90 ± 0,1 <sup>c</sup>	4,70 ± 0,2 <sup>e</sup>
Boro (mg/kg)**	0,2 ± 0,1 <sup>c</sup>	0,12 ± 0,0 <sup>b</sup>	0,12 ± 0,0 <sup>b</sup>	0,15 ± 0,0 <sup>b</sup>	0,08 ± 0,0 <sup>a</sup>

T0, terreno inicial antes de la siembra con frijol, sin control posemergente de malezas; T1, terreno con siembra previa de frijol sin *mulch* y control de malezas con aplicación de glifosato; T2, terreno con siembra previa de frijol cubierto por *mulch* y control de malezas con aplicación de glifosato; T3, testigo con siembra previa de frijol, control de malezas manual; y T4, testigo con siembra previa de frijol, con labranza mínima y cobertura vegetal.

CIC: capacidad de intercambio catiónico; DDS: días después de la siembra.

\*Valores en una misma fila seguidos con la misma letra no difieren significativamente según Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

\*\* Disponibles en el suelo.

**Tabla 3** Componentes de rendimiento e incidencia de enfermedades y plagas en lotes cultivados con frijol biofortificado CORPOICA rojo 39 con distintos manejos para el control de malezas

Tratamientos	Número vainas/planta	Número semillas/vaina	Peso 1.000 semillas (g)	Rendimiento (t/ha)	Incidencia enfermedades (%)	Incidencia plagas (%)	Efecto herbicida (%)
T1	8,6 <sup>a</sup>	5,05 <sup>b</sup>	241,5 <sup>b</sup>	0,68 <sup>a</sup>	89 <sup>d</sup>	2,79 <sup>d</sup>	99,3 <sup>b</sup>
T2	9,08 <sup>b</sup>	4,98 <sup>a</sup>	246,8 <sup>d</sup>	0,87 <sup>b</sup>	33 <sup>c</sup>	0,6 <sup>c</sup>	93,7 <sup>b</sup>
T3	10,1 <sup>d</sup>	5,42 <sup>d</sup>	235,6 <sup>a</sup>	0,96 <sup>d</sup>	19 <sup>a</sup>	0,45 <sup>a</sup>	98,5 <sup>b</sup>
T4	9,34 <sup>c</sup>	5,22 <sup>c</sup>	244,6 <sup>c</sup>	0,94 <sup>c</sup>	26 <sup>b</sup>	0,5 <sup>b</sup>	67,4 <sup>a</sup>

T1, terreno con siembra previa de frijol sin *mulch* y control de malezas con aplicación de glifosato; T2, terreno con siembra previa de frijol cubierto por *mulch* y control de malezas con aplicación de glifosato; T3, testigo con siembra previa de frijol, control de malezas manual; y T4, testigo con siembra previa de frijol, con labranza mínima y cobertura vegetal.

\*Valores en una misma columna seguidos de la misma letra no difieren significativamente según Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

semillas por vaina (tabla 3). Además, el control manual (T3) presentó menor prevalencia de enfermedades y plagas: 19 y 0,45%, respectivamente. El tratamiento de aplicación de glifosato en cultivo sembrado sin *mulch* tuvo una efectividad del 99,3%, pero presentó el menor rendimiento, con 0,680 t/ha y 8,6 vainas por planta, es decir, alrededor del 29,5% menos que con el control manual, además de evidenciar mayor ataque de enfermedades y plagas (89 y 2,79%, respectivamente). Se observó en este tratamiento pudrición radical causada por *Fusarium solani*<sup>44</sup> y *Macrophomina phaseolina*; y, en menor proporción, antracnosis asociada con *Colletotrichum lindemuthianum*<sup>25</sup>. Además, se detectó ataque de *Phyllorhaga obsoleta* Blanchard (Coleoptera: Scarabaeidae), una especie del denominado «complejo chisa» de Colombia, que ataca a diversos cultivos como cereales, pastos y

leguminosas<sup>43</sup>. Otra plaga detectada en este tratamiento fue «lorito verde» *Empoasca kraemeri* (Hemiptera: Cicadellidae), de gran importancia económica en época de verano<sup>41</sup>.

### Residualidad de glifosato en semillas de frijol

No se detectó la presencia de la sal de aminoglifosato; solo la de los compuestos clorpirifós (T1: 0,007 mg/kg; T2: 0,050 mg/kg) y tiabendazol (T2: 0,013 mg/kg), cuyas concentraciones estuvieron dentro del límite máximo residual admitido (0,050 mg/kg), y la de lindano, cuya concentración (0,016 mg/kg en T1) estuvo por encima del límite máximo residual (0,010 mg/kg). En los tratamientos sin glifosato (T3 y T4) no se encontró agroquímico residual.

## Correlación de variables químicas, microbiológicas y de rendimiento con el tipo de control de malezas aplicado

El 97,2% de la varianza se explicó en dos componentes. En el primer componente, con el 71,9% de la varianza del estudio, las variables de mayor contribución fueron el rendimiento del frijol (0,978) y la presencia de plagas y enfermedades (0,978). El segundo componente representó el 25,3% de la varianza, y las variables más relevantes en este componente fueron los niveles de conductividad eléctrica (0,889) y de calcio disponible en el suelo (0,886).

En el diagrama biespacial (fig. 1) se graficaron los valores promedio de los tratamientos como puntos ubicados en las coordenadas de los componentes principales, y las variables como líneas, cuya longitud indica la importancia relativa de cada variable. Se observó que existe alta correlación entre las variables con mayor peso en el análisis, como conductividad, plagas y enfermedades, con T2, que corresponde al tratamiento de cultivo de frijol cubierto por *mulch* y con control de malezas en las calles con aplicación de glifosato, el cual presentó rendimiento similar a los tratamientos sin aplicación de glifosato, pero con mejores condiciones químicas en relación con indicadores de conductividad eléctrica y materia orgánica.

Por su parte, el T0, que corresponde a indicadores del suelo en condiciones previas a la siembra y que fue ubicado en el diagrama como referencia, para observar la variabilidad de todos los tratamientos bajo control de malezas, se relacionó con los indicadores químicos hierro, zinc, manganeso y potasio, que se encontraron en mayor concentración comparados con los suelos cultivados (T1, T2, T3 y T4). Los tratamientos T1, T3 y T4 se agruparon en el mismo cuadrante y las variables bacterias y hongos se asocian más con los dos últimos tratamientos, mientras que la variable capacidad de intercambio catiónico se asocia con T1.

## Discusión

Las malezas más prevalentes coincidieron con las halladas en estudios previos efectuados en la zona en cultivos de hortalizas del Caribe seco<sup>19,25</sup>. Otras malezas menos prevalentes fueron *Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) Clayton (*Poaceae*) (gramínea caminadora) (11,6 ± 1,1%) y *Portulaca oleracea* L. (*Portulacaceae*) (verdolaga) (17,9 ± 2,2%).

Los tratamientos para el control de dichas malezas impactaron de manera variable en los indicadores fisicoquímicos y microbiológicos del suelo. El mayor nivel de materia orgánica hallado en tratamientos con glifosato (con T2 > T1) está probablemente asociado, entre otros factores, al mayor efecto herbicida logrado con este producto químico, que reduce las malezas y limita su competencia por nutrientes y su consumo de materia orgánica<sup>6</sup>.

La materia orgánica y el pH son altamente sensibles a la siembra de frijol, sus valores se incrementaron durante el desarrollo del cultivo por la fijación de nitrógeno. Se ha reportado, además, que el pH no es afectado por la variabilidad espacial del suelo<sup>7</sup>. También se ha registrado que el glifosato contribuye a elevar los niveles de materia orgánica y pH. Florida et al.<sup>14</sup> evaluaron el efecto del herbicida glifosato en propiedades del suelo que condicionan el desarrollo

de bacterias y hongos, y encontraron un incremento del pH (de 5,38 a 5,69) y de la materia orgánica (del 2,75 al 2,92%), lo cual concuerda con los resultados del presente estudio, en el que el nivel de este último indicador fue superior en los tratamientos con aplicación de glifosato, con y sin *mulch*.

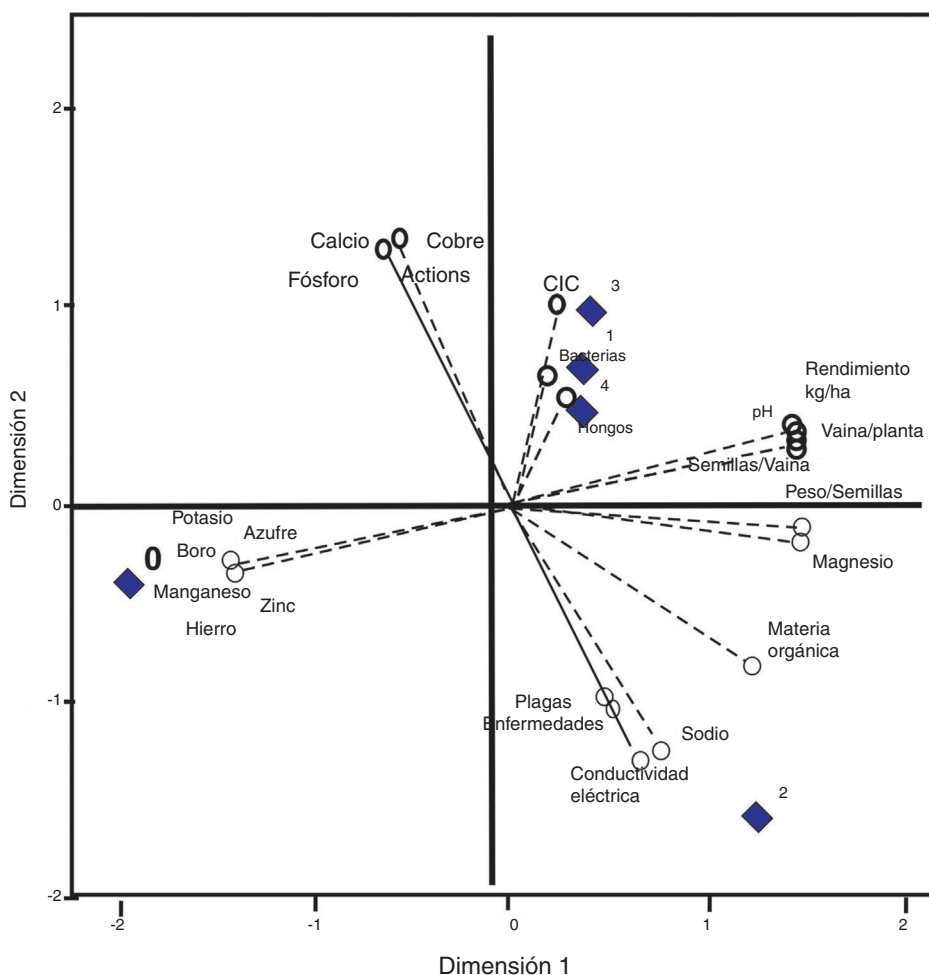
El tratamiento T2 (aplicación de glifosato con *mulch*) estuvo sujeto, además, a la influencia de una temperatura relativamente elevada o de un microclima generado por el acolchado plástico, que acelera la degradación de nutrientes<sup>5</sup>. Esto podría explicar los menores niveles de otros nutrientes observados en el suelo, como el fósforo, cuya disponibilidad depende del pH y presentó diferencias significativas respecto del contenido inicial y de los demás tratamientos. No obstante, es preciso aclarar que también hubo un descenso significativo del nivel de fósforo en T1, en donde también se aplicó glifosato, de manera que el herbicida podría contribuir a la disminución de este nutriente. Asimismo, se ha informado que este herbicida reduce el número de bacterias solubilizadoras de fosfato<sup>24,37</sup> y, en este caso, podría haber afectado la absorción de dicho nutriente, pues su concentración fue baja en el tratamiento con *mulch*, con menor número en el recuento general de microorganismos, y fue alta en el T4, de labranza mínima, con mayor UFC de bacterias por gramo de suelo (tabla 2), lo que podría contribuir a la solubilidad de fosfato<sup>22</sup>.

Adicionalmente, el aumento significativo de la conductividad eléctrica en el T2 (en relación con la medición inicial) no lo caracteriza como suelo salino, ni salino-sódico<sup>35</sup>, y se asocia con la mayor proporción de materia orgánica que presentó este tratamiento, ya que esta propiedad influye sobre la conductividad eléctrica. Simón et al.<sup>36</sup> reportan alta correlación ( $r > 0,6$ ;  $p < 0,001$ ) entre dichos indicadores, y destacan el uso de la conductividad eléctrica medida como un potencial estimador de la materia orgánica del suelo.

La elevada conductividad y la mayor proporción de sodio disponible —entre otros elementos— con el T2 se vinculan con la influencia de diferentes factores en un mismo tratamiento, ya que el uso del *mulch* eleva la temperatura interna del suelo y la descomposición de químicos a base de sales se ralentiza. La salinidad y el sodio, entre otros minerales, aumentan la conductividad y la absorción del agroquímico, y disminuyen su desorción, tal como ocurre con otros compuestos salinos, como la atrazina, ingrediente activo herbicida<sup>15</sup>.

Por otra parte, el magnesio, el potasio y el hierro disponible disminuyeron en todos los tratamientos respecto del valor inicial, dada la absorción y la acumulación del cultivo de frijol variedad biofortificada CORPOICA rojo 39, caracterizado por su alto poder extractivo de nutrientes de suelo<sup>40,41</sup>. El hierro, además, estuvo más concentrado en suelos con tratamientos de cobertura plástica (T2) o natural (T4), también con menor nivel de pH. Se sabe que este indicador y la oxidación, entre otros múltiples factores, afectan la solubilidad del hierro en los suelos<sup>31</sup>. El hierro es un elemento crucial en la adsorción del glifosato; no obstante, la variabilidad de los resultados en los tratamientos no permite deducir si se presentó efecto quelante de este metal, ya reportado en diversos estudios<sup>3</sup>.

La reacción de calcio y la capacidad de intercambio catiónico mostraron alta sensibilidad al manejo del cultivo con variaciones a corto plazo, asociadas al pH del suelo en cada tratamiento y, probablemente, a la naturaleza de las



**Figura 1** Diagrama bi espacial del análisis de componentes principales de las dispersiones de variables químicas, biológicas y de rendimiento del cultivo de frijol bajo diversos manejos de malezas. Los números indican los promedios correspondientes a los tratamientos aplicados. 0: T0, terreno inicial antes de la siembra con frijol; 1: T1, terreno con siembra previa de frijol, sin *mulch* y con control de malezas con glifosato; 2: T2, terreno con siembra previa de frijol, cubierto por *mulch* y con control de malezas con glifosato; 3: T3, testigo con siembra previa de frijol, control de malezas manual; 4: T4, testigo con siembra previa de frijol, con labranza mínima y cobertura vegetal.

moléculas del agroquímico<sup>16</sup>. También se detectó variabilidad en los niveles de los microelementos zinc, boro y cobre, los que se vieron afectados por el cultivo, sin que sea posible establecer una clara relación con los tratamientos por encontrarse estos elementos en baja proporción en suelo.

En contraste, sí se observó una relación con la inmovilización del manganeso, probablemente debida a la formación de complejos de glifosato-metal poco solubles en tejidos vegetales, o a interacciones en la rizósfera<sup>12,20</sup>. Por otro lado, Sirinathsinghji<sup>37</sup> precisa que esto sucede porque a través de la quelación del manganeso se inhibe la enzima vegetal 5-enolpiruvilshikimato-3-fosfato sintetasa (EPSPS), que participa en la producción de aminoácidos aromáticos en la vía shikimato EPSPS de plantas y microorganismos como *Pseudomonas*, *Bradyrhizobium* y *Agrobacterium*<sup>11</sup>.

En este sentido, la influencia del glifosato sobre nutrientes del suelo como el manganeso, por su efecto quelante, así como la inmovilización directa o la reducción del número de microorganismos que participan en los ciclos biogeoquímicos

del suelo —como el del fósforo—, genera efectos desfavorables para la salud y fertilidad del suelo<sup>31</sup>. El efecto descrito se traduce en desventajas, que deben analizarse en relación con los beneficios en rendimiento del cultivo por reducción de la maleza competidora, ya que la aplicación del herbicida glifosato puede tener impacto en las variables biológicas, como la afectación de raíces por fitopatógenos y la reducción de poblaciones de microorganismos que intervienen en ciclos biogeoquímicos. No obstante, los resultados del presente estudio y las variaciones en las propiedades químicas también se relacionan con otros factores, como el uso de cobertura y el manejo del cultivo, lo que implica que el comportamiento del herbicida también estaría determinado por la estrategia de uso y las características edafológicas de la ecorregión donde se aplica<sup>11</sup>.

La respuesta de la comunidad microbiana asociada al sistema radical de la planta de frijol y la prevalencia de fitopatógenos hallada en esta investigación coinciden con diversos estudios que señalan una relación entre la



aplicación excesiva del herbicida glifosato y la presencia de fitopatógenos que colonizan la raíz expuesta luego de la aplicación del herbicida. En este sentido, Zobiole et al.<sup>44</sup> realizaron un estudio para determinar si el glifosato afecta a los microorganismos en la rizósfera de la soja transgénica RR producida por Monsanto (RR2), que es resistente a este herbicida. Se concluyó de ese estudio que, independientemente del cultivar, el glifosato repercute negativamente en las complejas interacciones de los grupos microbianos, la actividad bioquímica y el crecimiento de las raíces, las cuales tenían una mayor cantidad de *Fusarium* spp. y un menor número de bacterias reductoras de manganeso del género *Pseudomonas*. Estas últimas cumplen un papel importante en la rizósfera de las plantas por la producción de hormonas o auxinas, que favorecen su crecimiento mediante la acción del manganeso como cofactor enzimático en la vía shikimato. Al igual que otras rizobacterias, estas resultan afectadas en condiciones ambientales oxidativas<sup>11,21,44</sup>.

Por su parte, el USDA presentó un reporte sobre estudios de riesgo sobre el uso del herbicida, en donde se señala que se han presentado enfermedades reemergentes causadas por *Fusarium* en cultivos tratados con glifosato y que, además, la gravedad de los daños también es mayor<sup>37</sup>. Otro estudio, en cambio, señala que no existe relación directa comprobable entre la aplicación del químico y la prevalencia de enfermedades en los cultivos<sup>11</sup>. De igual forma, Druille et al.<sup>10</sup> evaluaron el impacto de la aplicación de glifosato sobre hongos benéficos del suelo asociados a *Lotus tenuis*; se observó que el número de esporas viables de hongos micorrízicos arbusculares y el porcentaje de arbusculos en plantas de *L. tenuis* fue un 52 y 40% menor, respectivamente, con la aplicación del herbicida glifosato.

En términos de rendimiento del cultivo de frijol biofortificado, en general se presentó mejor respuesta agronómica en los tratamientos sin aplicación de glifosato, pues la prevalencia de plagas y enfermedades influyó sobre el rendimiento final de la planta. Por tanto, el rendimiento fue superior bajo el tratamiento con control manual de malezas (T3), con 0,96 t/ha, y menor en el tratamiento con aplicación de glifosato y sin *mulch* (T1). El impacto adverso del herbicida fue menor en T2 (siembra con *mulch*) y en T4 (cobertura vegetal), donde existió protección física tendiente a evitar el contacto directo del agroquímico sobre la raíz de las plantas de frijol. Aun así, el rendimiento promedio del tratamiento T3 se encontró ligeramente por debajo del valor medio de ese genotipo de frijol en localidades de fertilidad media a alta y con tenores de materia orgánica del 1,8 al 3,7%<sup>42</sup>; en este estudio todas las parcelas presentaron bajo contenido de materia orgánica (< 2%).

En la respuesta agronómica del cultivo de frijol se observó alta correlación ( $r=0,979$ ) entre las variables de rendimiento y la prevalencia de plagas, con registros superiores en las variables agronómicas en los tratamientos sin glifosato, y con menor influencia de enfermedades y plagas en el tratamiento donde se aplicó glifosato al cultivo con *mulch*, lo cual indica que el herbicida favorece la infección por fitopatógenos, al destruir células de la raíz y crear condiciones para el ingreso de microorganismos como *Fusarium*, *Macrophomina*, *Phytophthora* y *Colletotrichum*, los que fueron identificados en el presente estudio y forman complejos de interacción ecológica para atacar y actuar de manera

sinérgica sobre la planta sensible<sup>25,41</sup>. La tasa de infección es menor cuando existe una barrera física que impide el efecto adverso del herbicida sobre la integridad física de la raíz<sup>29</sup>.

El hallazgo en semillas de residuos de pesticidas no aplicados en el presente ensayo corresponde a su utilización en otros años y cultivos, de acuerdo con la historia productiva de los lotes de ensayo. La presencia de estos productos solo en los tratamientos donde se aplicó glifosato podría asociarse con el efecto biocida de este herbicida, que disminuye la población microbiana rizosférica, dado que una parte de esta participa en la degradación de pesticidas<sup>38</sup>. Esto evidencia la ventaja o el efecto ambiental del descanso del terreno cuando existe aplicación de pesticidas, ya que la microbiota nativa recuperada puede actuar sobre los compuestos remanentes de siembras anteriores, mientras que donde se aplicó el herbicida se ralentizó el proceso de descomposición de clorpirifós y lindano. Aun así, es relevante este resultado dado que el lindano es un producto prohibido en más de 50 países por su efecto cancerígeno y mutagénico<sup>23</sup>, y aquí se evidenció la capacidad fitoextractiva del frijol. Lo anterior exhorta a considerar los tiempos de degradación de pesticidas en terrenos para siembra de frijol, y a optar por el descanso del terreno o la rotación con cultivos de menor capacidad de extracción.

En general, las mejores condiciones químicas correlacionadas con T2 indican que, en este caso, el *mulch* actuó como barrera física de protección de las raíces, lo que generó un menor impacto en la prevalencia de enfermedades por deterioro mecánico de las plantas. Sin embargo, se generan condiciones en el sistema edáfico (como un mayor contenido de sales), que, sumado a la aplicación del pesticida, pueden ser desfavorables frente a aplicaciones sucesivas.

Bozzo<sup>6</sup> realizó un estudio para evaluar la persistencia del glifosato y el efecto sobre parámetros biológicos del suelo en aplicaciones sucesivas en el cultivo de soja en agricultura continua de siembra directa; y observó menor respiración microbiana en las parcelas, con mayor prevalencia del principal metabolito de la degradación del glifosato (AMPA).

De igual forma, Camacho et al.<sup>8</sup> reportan a partir de un análisis multivariado la sensibilidad de indicadores como carbono orgánico, calcio, magnesio, potasio y capacidad de intercambio catiónico frente a la intervención agrícola asociada a la aplicación de fertilizantes y correctivos, en relación con un suelo de sabana nativa.

En este sentido, es importante considerar los indicadores de alta sensibilidad identificados en este estudio, como el fósforo y el manganeso disponible, y la prevalencia de fitopatógenos en posteriores evaluaciones del efecto del control de malezas con glifosato para la toma de decisiones de manejo agrícola del cultivo de frijol en el Caribe seco colombiano. Este modelo productivo debe incluir la evaluación de la alteración del metabolismo de rizobacterias del frijol, las condiciones edafoclimáticas y las de manejo. Respecto de este último factor, para mitigar el efecto depresor del agroquímico sobre la microbiota se hace necesario incluir la adición de abonos orgánicos y el uso de coberturas para la conservación de dichos microorganismos<sup>14,44</sup>.

Además, se requiere del estudio de diferentes tipos de acolchado plástico teniendo en cuenta su color y calibre, así como de otro tipo de barreras físicas para la aplicación

del glifosato, más accesibles para el pequeño y mediano productor, ya que el *mulch* plástico es de alto costo, aunque se mantiene funcional durante 3 años en la zona bajo estudio. Finalmente, debe evaluarse su efecto combinado sobre indicadores de salud y fertilidad del suelo; también se deben probar métodos culturales de aplicación por contacto sobre la maleza, que evita el salpique a las plantas de frijol, aunque requiere adiestramiento del operario<sup>20</sup>.

## Conclusiones

El control de malezas presentes en el cultivo de frijol con glifosato está asociado con la disminución del rendimiento por incremento de la incidencia de enfermedades en las raíces y la alteración de las propiedades microbiológicas del suelo y de los indicadores químicos asociados. De acuerdo con los análisis efectuados en esta investigación, el tratamiento T2 con siembra previa de frijol con *mulch* y aplicación de glifosato presentó un balance apropiado entre el rendimiento, cercano al promedio regional, y las propiedades químicas favorables en la rizósfera, con buenos niveles de materia orgánica y conductividad eléctrica. Además, no se presentó residualidad.

En consecuencia, para un mayor beneficio del productor (en términos de rendimiento del cultivo y del mantenimiento de la calidad de suelo) cuando hay alta presión de *C. rotundus*, se recomienda el cultivo de frijol con el uso de *mulch* como barrera física para la protección del sistema radical frente a la aplicación de glifosato. Sin embargo, serían necesarios análisis comparativos entre años, que incluyan evaluaciones de temperatura del suelo con uso de acolchado plástico y sin este. Esto permitiría evaluar su efecto sobre la mineralización de la materia orgánica y la relación entre microbiota benéfica y fitopatógena. Dada la variación de estos indicadores detectada en los tratamientos T1 y T2, donde se observaron diferencias cualitativas y cuantitativas en la población fúngica, resultó más favorable para la planta el tratamiento T2, con *mulch*.

## Financiación

El trabajo fue financiado por AGROSAVIA y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), meta: «Selección de líneas de frijol tolerante a alta temperatura a partir de selecciones individuales y masales de genotipos sobresalientes de los ensayos realizados en el Caribe durante el 2014», perteneciente al proyecto: «Obtención de una variedad de frijol tolerante a alta temperatura para sistemas productivos multiestratos en el Caribe colombiano», incluido en la agenda interna de AGROSAVIA. Además, UDES financió los análisis microbiológicos complementarios.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## Agradecimientos

Los autores agradecen su colaboración para la realización de la fase experimental y asesoría a AGROSAVIA, CI Motilonia “Proyecto de agenda interna de Agrosavia titulado: Selección de líneas de frijol tolerante a alta temperatura a partir de selecciones individuales y masales de genotipos sobresalientes de los ensayos realizados en el Caribe durante el 2014”. A la Universidad de Popular del Cesar, UDES y a la Fundación Universitaria del Área Andina (AREANDINA), especialmente a Ricardo Durán Barón, PhD, por la revisión del texto.

## Bibliografía

1. Aramendiz H, Cardona C, de Oro R. Periodo de interferencia de arvenses en el cultivo de berenjena (*Solanum melongena* L.). *Agron Colomb*. 2010;28:81–8.
2. Arias J, Jaramillo M, Rengifo T. Manual técnico. Buenas prácticas agrícolas en la producción de frijol voluble [Internet]. Colombia: Corpoica y FAO; 2007 [consultado 06 Nov 2016]. Disponible en: <http://www.fao.org/co/manualfrijol.pdf>
3. Bellaloui N, Reddy K, Zablutowicz R, Abbas H, Abel C. Effects of glyphosate application on seed iron and root ferric (III) reductase in soybean cultivars. *J Agric Food Chem*. 2009;57:9569–74.
4. Bohm G, Genovese M, Pigozzo G, Trichez D, Rombaldi C. Residuos de glifosato e ácido amonometilfosfonico e teores de isoflavonas em soja BRS 244 RR and BRS 154. *Ciênc Tecnol Aliment*. 2008;28:192–7.
5. Bonachela S, Granados M, López J, Hernández J, Magán J, Baeza E, Baille A. How plastic mulches affect the thermal and radiative microclimate in an unheated low-cost greenhouse. *Agric For Meteorol*. 2012;152:65–72.
6. Bozzo B. Persistencia del glifosato y efecto de sucesivas aplicaciones en el cultivo de soja en agricultura continua en siembra directa sobre parámetros biológicos del suelo. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República; 2010.
7. Bravo C, Cabrera J, Carvallo M, Cánchica H, Ramírez E, González I. Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con el rendimiento de frijol (*Vigna unguiculata* L.) en una parcela experimental de los llanos centrales venezolanos. En: *Estudios en la zona no saturada del suelo*; 2011. p. 79–84.
8. Camacho J, Luengas C, Leiva F. Análisis multivariado de propiedades químicas en oxisoles con diferentes niveles de intervención agrícola. *Acta Agron*. 2010;59:273–84.
9. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Annual report. From the new world to the whole world. Eco-efficient agriculture for Colombia and the world [Internet]; 2010 [consultado 08 Oct 2016]. Disponible en: [https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/68067/annual\\_report.2010.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/68067/annual_report.2010.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
10. Druille M, Acosta A, Acosta G, Rossi J, Golluscio R, Bailles M. Response to glyphosate application of beneficial soil fungi associated with *Lotus tenuis*. *Rev Investig Agropecu*. 2017;43:297–302.
11. Duke S, Lydon J, Koskinen W, Moorman T, Chaney R, Hammerschmidt R. Glyphosate effects on plant mineral nutrition, crop rhizosphere microbiota, and plant disease in glyphosate-resistant crops. *J Agric Food Chem*. 2012;60:10375–97.
12. Eker S, Ozturk L, Yazici A, Erenoglu B, Römheld V, Cakmak I. Foliar-applied glyphosate substantially reduced uptake and

- transport of iron and manganese in sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. *J Agric Food Chem.* 2006;54:10019–25.
13. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization Faostat; Statistic Division [Internet]; 2016 [consultado 05 Oct 2016]. Disponible en: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/S>
  14. Florida N, López C, Pocomucha V. Efecto del herbicida paraquat y glifosato en propiedades del suelo que condicionan el desarrollo de bacterias y fungi. *RevIA.* 2012;2:35–43.
  15. González L, Hansen A. Efecto de la salinidad en la adsorción de un herbicida en suelos agrícolas. *Rev Int Contam Ambient.* 2014;30:191–9.
  16. Hirzel J, Toloza S, Novoa F. Evolución a corto plazo de las propiedades químicas en dos suelos de la zona centro sur de Chile fertilizados con diferentes fuentes de calcio. *Chil J Agric Anim Sci.* 2016;32:217–27.
  17. Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF). Encuesta Nacional de la Situación Nutricional en Colombia-ENSIN [Internet]. Bogotá, D.C.; 2015 [consultado 20 Abr 2018]. Disponible en: <https://www.icbf.gov.co/bienestar/nutricion/encuesta-nacional-situacion-nutricional>
  18. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Métodos analíticos de laboratorio de suelos. Colombia: IGAC; 2006.
  19. Jarma A, Tirado G. Efecto bioherbicida de extractos vegetales para el manejo de malezas en algodón en el Caribe colombiano. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología.* 2004;71:79–84.
  20. Johal G, Huber D. Glyphosate effects on diseases of plants. *Eur J Agron.* 2009;31:144–52.
  21. Kremer R, Means N. Glyphosate and glyphosate-resistant crop interactions with rhizosphere microorganisms. *Eur J Agron.* 2009;31:153–61.
  22. Lara C, Esquivel L, Negrete J. Bacterias nativas solubilizadores de fosfato para incrementar los cultivos en el departamento de Córdoba-Colombia. *Rev Bio Agro.* 2011;9:114–20.
  23. Maliszewska B, Smreczak B, Klimkowicz A. Evaluation of the status of contamination of arable soils in Poland with DDT and HCH residues: national and regional scales. *Pol J Environ Stud.* 2014;23:139–48.
  24. Martínez S, Leiva M, Rodríguez M, Gómez O, Quintero E, Rodríguez G, García A, Cárdenas M. Nuevas variedades de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) para la Empresa Agropecuaria “Valle del Yabú”, Santa Clara, Cuba. *Ctro Agr.* 2015;42: 89–91.
  25. Melo A, Ariza P, Lissbrant S, Tofiño A. Evaluation of agrochemicals and bioinputs for sustainable bean management on the Caribbean coast of Colombia. *Agron Colomb.* 2015;33:203–11.
  26. Mena E, Ortega M, Merini L, Melo R, Tofiño A. Efecto de agroinsumos y aceites esenciales sobre el suelo de hortalizas en el Caribe colombiano. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria.* 2018;19:103–19.
  27. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Anuario estadístico del sector agropecuario 2014. Resultado evaluaciones agropecuarias municipales [Internet]. Bogotá: Minagricultura; 2016 [consultado 6 Ago 2017]. Disponible en: [https://www.minagricultura.gov.co/planeacion-control-gestion/Gestin/PLANEACION/Informe\\_de\\_Gesti%C3%B3n\\_\(Metas\\_Objetoivos\\_Indicadores\\_Gestion\)/INFORME\\_GESTION\\_2016.pdf](https://www.minagricultura.gov.co/planeacion-control-gestion/Gestin/PLANEACION/Informe_de_Gesti%C3%B3n_(Metas_Objetoivos_Indicadores_Gestion)/INFORME_GESTION_2016.pdf)
  28. Ministerio de Salud y Protección Social. Estrategia nacional para la prevención y control de las deficiencias de micronutrientes en Colombia 2014-2021 [Internet]. Colombia; 2015 [consultado 10 Nov 2016]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SNA/Estrategia-nacional-prevencion-control-deficiencia-micronutrientes.pdf>
  29. Monroy H, Salamanca C, Cano C, Moreno L, Orduz J. Influencia de las coberturas en cultivos de cítricos sobre los hongos formadores de micorrizas arbusculares en Oxisoles del piedemonte llanero colombiano. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria.* 2013;14:53–65.
  30. Oliveira O, Cardoso A, Lima L. Uso de borra de café no controle da tiririca (*Cyperus rotundus* L.). *Cad Agroecol.* 2014;9:1–6.
  31. Ostera J, Malanga G, Puntarulo S. Actualización sobre aspectos oxidativos del efecto del glifosato en sistemas biológicos. *Biotechnia.* 2016;18:3–10.
  32. Pascualino J, Cabrera C, Vanegas M. The environmental impacts of foliar and solar energy implementation in the Colombian Caribe. *Prospect.* 2015;13:68–75.
  33. Plan Hortícola Nacional (PHN) Colombia [Internet]. Asohofrucol; 2015 [consultado 10 Ago 2016]. Disponible en: <http://asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca.28.PHN.pdf>
  34. Puertas M, Mosquera N, Rojano B. Estudio de la capacidad antioxidante *in vitro* de *Phaseolus vulgaris* L (frijol) mediante extracción asistida por microondas. *Rev Cubana Plant Med.* 2016;21:42–50.
  35. Rojas J, Guerra A, Arevalo J, Guerrero L, Leiva F. Sensor de conductividad eléctrica aparente para definir zonas homogéneas de manejo en suelos salinos. *Rev Colomb Cienc Hortic.* 2015;9:86–96.
  36. Simón M, Peralta N, Costa J. Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Cienc Suelo.* 2013;31:45–55.
  37. Sirinathsinghi E. Glyphosate hazards to crops, soils animals, and consumers. *USDA Scientist* [Internet]; 2012 [consultado 01 Oct 2016]. Disponible en: [http://www.isis.org.uk/USDA\\_scientist\\_reveals\\_all.php](http://www.isis.org.uk/USDA_scientist_reveals_all.php).
  38. Stamatii K, Alarcón A, Ferrera R, Nava C, Sánchez J, Cruz J, Castillo M. Tolerancia de hongos filamentosos a endosulfán, clorpirifós y clorotalonil en condiciones *in vitro*. *Rev Int Contam Ambient.* 2015;31:23–37.
  39. Sterren M, Urich W, Benintende S. Residualidad de glifosato en suelos de Entre Ríos y su efecto sobre los microorganismos del suelo. *Ecol Austral.* 2016;26:246–55.
  40. Tofiño A, Cabal D, Gil L. Análisis de componentes del sistema productivo de aguacate, con incidencia probable de *Phytophthora* en Cesar, Colombia. *AIA.* 2012;16:63–90.
  41. Tofiño A, Pastrana I, Melo A, Beebe S, Tofiño R. Rendimiento, estabilidad fenotípica y contenido de micronutrientes de genotipos de frijol biofortificado en el Caribe seco colombiano. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria.* 2016;17:309–29.
  42. Tofiño A, Tofiño R, Jiménez H. Determinación del potencial productivo y nutricional de un frijol biofortificado mesoamericano en el Cesar, Colombia. *Vitae.* 2012;19:297–9.
  43. Vallejo F, Morón M, Orduz S. Biología de *Phyllophaga obsoleta* Blanchard (Coleoptera: Melolonthidae), especie rizófaga del complejo “chisa” de Colombia. *Bol Cient Mus Hist Nat.* 2007;11:188–204.
  44. Zobiolo L, Kremer R, Oliveira R, Constantin J. Glyphosate affects micro-organisms in rhizospheres of glyphosate-resistant soybeans. *J Appl Microbiol.* 2011;110:118–27.