



Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Agrarias
Licenciatura en Recursos Naturales

Impacto del glifosato sobre la macrofauna edáfica y evaluación del lotus (*Lotus corniculatus L.*) como especie fitorremediadora

Alumna: Mahely Ponce

Directora: Ing. Agr. (MSc.) Josefina Scaglione (Cátedra de Manejo de Tierras. FCA, UNR)

Co-director: Ing. Agr. (Dr.) Sergio Montico (Cátedras de Manejo de Tierras y Evaluación de Impacto Ambiental. FCA, UNR)

Lugar de trabajo: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario

Año lectivo: 2025

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
ABREVIATURAS	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
1) 6	
1.1) OBJETIVOS	7
1.1.1) OBJETIVO GENERAL	7
1.1.2) OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.2) HIPÓTESIS	8
2) MATERIALES Y MÉTODOS	9
2.1) SITIO DE ESTUDIO	9
2.1.1) CARACTERIZACIÓN EDÁFICA	9
2.1.2) CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	10
2.2) DISEÑO Y MANEJO DEL EXPERIMENTO	12
2.2.1) DETERMINACIONES Y METODOLOGÍAS DE MUESTREO	13
2.2.2) ANÁLISIS ESTADÍSTICO	16
3) RESULTADOS	17
3.1) PARÁMETROS DE LAS COMUNIDADES DE MACROFAUNA	17
3.1.1) ABUNDANCIA	17
3.1.2) RIQUEZA	20
3.1.3) DIVERSIDAD	21
3.2) GRUPOS TRÓFICOS Y RELACIONES FUNCIONALES	23
3.3) ÍNDICE EVALUACIÓN DEL HÁBITAT EDÁFICO	26
4) DISCUSIÓN	29
5) CONCLUSIONES	35
6) BIBLIOGRAFÍA	37
7) ANEXO	41

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi profundo agradecimiento a Josefina Scaglione, directora de esta tesina, por su dedicación, guía y valiosos aportes que hicieron posible la realización de este trabajo. A Sergio Montico, co-director, por su acompañamiento, sugerencias y apoyo durante todo el proceso.

A la Facultad de Ciencias Agrarias (UNR) y a sus docentes, por brindarme los conocimientos y herramientas necesarias para crecer como profesional y como persona.

A mi familia, por su amor, comprensión y aliento constante, que me motivaron a seguir adelante aun en los momentos más difíciles.

A mis amigos, por estar siempre presentes, compartiendo alegrías y brindando fuerzas cuando más las necesitaba.

A todos, gracias por ser parte de este logro que no habría sido posible sin ustedes.

ABREVIATURAS

AIC: Criterio de Akaike

BIC: Criterio Bayesiano de Información

CES: Calidad estructural

Cond: Conductividad

COB: Cobertura superficial

COT: Carbono orgánico total

DET: Detritívoros

GT: Grupo trófico

HER: Herbívoros

HOR: Hormigas

IEHE: Índice de evaluación de hábitat edáfico

MAF: Macrofauna

MO: Materia orgánica

P: Fósforo

PRE: Predadores

TMAX: Temperatura máxima

TMED: Temperatura media

TMIN: Temperatura mínima

RESUMEN

El uso intensivo de herbicidas en la agricultura puede afectar la biodiversidad edáfica y la calidad de los suelos, generando la necesidad de plantear alternativas de manejo sostenible. En este contexto, se evaluó el impacto del glifosato sobre la macrofauna edáfica y el potencial del lotus (*Lotus corniculatus*) como especie fitorremediadora. Se realizó un experimento con dos usos de suelo (barbecho y lotus) y tres dosis de glifosato (testigo, 2 L ha⁻¹ y 5 L ha⁻¹), con muestreos en el otoño y la primavera de 2024. Se determinaron abundancia, riqueza y diversidad de la macrofauna, su composición trófica y el Índice de Evaluación del Hábitat Edáfico (IEHE). La abundancia fue significativamente mayor en barbecho con la dosis más alta en ambas estaciones, mientras que en lotus se mantuvo baja y relativamente uniforme entre dosis. La riqueza no mostró diferencias estadísticas entre los factores considerados, mientras que la diversidad aumentó en la primavera con respecto al otoño, presentando valores más elevados en los testigos y sin diferencias claras entre dosis. En cuanto a las relaciones funcionales entre grupos tróficos, las proporciones de detritívoros y la relación entre la abundancia de lombrices y hormigas sugirieron respuestas sensibles a la estacionalidad y al manejo. La valoración del IEHE fue “favorable” en todos los tratamientos, siendo el componente macrofauna el más sensible, especialmente cuando el lotus presentó escaso desarrollo bajo condiciones de déficit hídrico. Los resultados obtenidos indicaron que el glifosato podría modificar las comunidades de macrofauna, principalmente a través de cambios en el hábitat del suelo, y que el lotus tendría potencial para atenuar parcialmente dichos efectos, lo cual estaría condicionado por su grado de desarrollo y las condiciones edafoclimáticas. No obstante, sería recomendable profundizar estos resultados en series temporales más extensas y medir residuos de glifosato en suelo para robustecer la inferencia.

Palabras clave: glifosato; macrofauna edáfica; *Lotus corniculatus*; fitorremediación; salud del suelo.

ABSTRACT

The intensive use of herbicides in agriculture can affect soil biodiversity and soil quality, generating the need to propose sustainable management alternatives. In this context, the impact of glyphosate on soil macrofauna and the potential of lotus (*Lotus corniculatus*) as a phytoremediation specie were evaluated. An experiment was conducted with two land uses (fallow and lotus) and three glyphosate doses (control, 2 L ha⁻¹ and 5 L ha⁻¹), with sampling in the fall and spring of 2024. The abundance, richness, and diversity of macrofauna, their trophic composition and the Edaphic Habitat Evaluation Index (EHEI) were determined. Abundance was significantly higher in fallow with the highest dose in both seasons, while in lotus it remained low and relatively uniform between doses. Richness showed no statistical differences among the factors considered, while diversity increased in spring compared to autumn, presenting higher values in the controls and without clear differences between doses. Regarding the functional relationships between trophic groups, the proportions of detritivores and the relationship between the abundance of earthworms and ants suggested responses sensitive to seasonality and management. The IEHE assessment was "favorable" in all treatments, with the macrofauna component being the most sensitive, especially when lotus showed poor development under water deficit conditions. The results indicated that glyphosate could modify macrofauna communities, primarily through changes in soil habitat, and that the lotus had the potential to partially mitigate these effects, which would be conditioned by its degree of development and soil and climate conditions. However, it would be necessary to explore these results in longer periods of time and measure glyphosate residues in soil to strengthen the inference.

Keywords: glyphosate; soil macrofauna; *Lotus corniculatus*; phytoremediation; soil health.

1) INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La región pampeana argentina constituye uno de los sistemas agrícolas más productivos a nivel mundial. En las últimas décadas, la adopción de la siembra directa, los cultivos genéticamente modificados y el uso intensivo de herbicidas, especialmente glifosato, han impulsado una transformación profunda del paisaje y de la calidad de los suelos. Este modelo, orientado a la maximización de rendimientos y sustentado en un alto uso de insumos, ha traído consigo problemas como pérdida de materia orgánica, compactación, erosión y disminución de la biodiversidad edáfica (Chiappero et al., 2024; Domínguez et al., 2018; Bedano y Domínguez, 2016)

El glifosato (N-fosfometilglicina) es el herbicida más utilizado a nivel mundial y constituye la herramienta central del paquete tecnológico asociado a la soja RR y otros cultivos tolerantes (Bedano y Domínguez, 2016). Si bien su uso ha permitido el control eficiente de malezas y la reducción del laboreo mecánico, múltiples estudios advierten sobre su persistencia en el suelo y sus efectos sobre la biota edáfica (Barriuso et al., 2012; Bedmar et al., 2022). Al respecto, Bedmar et al. (2022) destacan que la dinámica de los herbicidas en el suelo depende de la interacción entre las propiedades químicas del compuesto, las características del suelo (textura, pH, materia orgánica) y las condiciones climáticas, lo que condiciona su movilidad, residualidad y potencial impacto ambiental.

La macrofauna edáfica, compuesta por organismos como lombrices, coleópteros, miriápodos e isópodos, desempeña funciones esenciales en el funcionamiento de los suelos, tales como: fragmentación de materia orgánica, bioturbación, ciclado de nutrientes y formación de agregados estables (Brown et al., 2015; Domínguez et al., 2018). Estos procesos mejoran la aireación, la infiltración del agua y la fertilidad del suelo, contribuyendo a la provisión de servicios ecosistémicos clave (Lavelle et al., 2006).

Diversos estudios evidencian que el glifosato y su metabolito AMPA (ácido aminometilfosfónico) podrían afectar negativamente a la macrofauna edáfica. Por caso, Hagner et al. (2019) demostraron que la exposición a herbicidas basados en glifosato altera la abundancia y estructura de grupos tróficos de la fauna del suelo, lo que repercute en la estabilidad de las funciones ecosistémicas. A nivel local, Giménez y Sasal (2013) reportaron una disminución en la abundancia de macrofauna edáfica en sistemas agrícolas de la región pampeana con aplicaciones repetidas de glifosato.

La pérdida de diversidad biológica del suelo, asociada a la agriculturización y al uso intensivo de fitosanitarios, representa una amenaza para la sustentabilidad de los agroecosistemas (Chiappero et al., 2024). Esta simplificación ecológica reduce la resiliencia frente a perturbaciones y compromete la capacidad de los suelos para mantener su funcionalidad a largo plazo (Pelosi et al., 2013; Domínguez et al., 2018).

En este contexto, se han propuesto estrategias de manejo sustentable como la fitorremediación, la cual consiste en la utilización de distintas especies vegetales para absorber, degradar o inmovilizar contaminantes presentes en el suelo (Martínez et al., 2021). El lotus (*Lotus corniculatus*), ampliamente utilizado en sistemas pastoriles de la región pampeana, ha demostrado cierta tolerancia al glifosato y capacidad de acumularlo en sus tejidos sin manifestar fitotoxicidad, además de mejorar propiedades físicas y biológicas del suelo (Massot, 2018; Martínez et al., 2021). Estudios recientes indican que esta leguminosa podría favorecer procesos de degradación del herbicida y proporcionar un microhábitat favorable para la macrofauna edáfica (García et al., 2020; Martínez et al., 2021).

Comprender el efecto del glifosato sobre las comunidades de macrofauna del suelo resulta importante para plantear prácticas que compatibilicen la productividad con la conservación de la salud del suelo y la biodiversidad edáfica. Este trabajo busca aportar evidencia sobre estas interacciones para contribuir al desarrollo de estrategias de manejo que integren eficiencia productiva con sostenibilidad ambiental.

1.1) OBJETIVOS

1.1.1) OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto del glifosato sobre las comunidades de macrofauna y la condición del hábitat edáfico en diferentes situaciones de uso del suelo y bajo distintas dosis de aplicación del herbicida.

1.1.2) OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los cambios en la abundancia, riqueza y diversidad de macrofauna edáfica en los distintos tratamientos de uso del suelo y dosis de glifosato.
- Evaluar las variaciones en la abundancia de los organismos según grupos tróficos en función de los usos del suelo y dosis de glifosato.

- Interpretar las valoraciones del índice de evaluación del hábitat edáfico (IEHE) en relación a los tratamientos planteados.
- Estudiar el efecto del lotus como especie fitorremediadora en presencia de glifosato y su influencia sobre los parámetros de las comunidades de macrofauna considerados.
- Interpretar los resultados obtenidos en cuanto a los parámetros comunitarios de la macrofauna del suelo en relación a la residualidad del glifosato en el medio edáfico.

1.2) HIPÓTESIS

- Existirán diferencias en la abundancia, riqueza y diversidad de organismos de la macrofauna del suelo entre las situaciones de barbecho y con inclusión de lotus.
- El incremento en las dosis de glifosato aplicadas afectará negativamente los parámetros de las comunidades de macrofauna edáfica.
- Existirán diferencias en la composición de los grupos tróficos entre los diferentes usos de suelo y dosis de glifosato.
- El IEHE reflejará variaciones entre los tratamientos con y sin inclusión de lotus y entre las diferentes dosis de glifosato.

2) MATERIALES Y MÉTODOS

2.1) SITIO DE ESTUDIO

El sitio de estudio se ubicó en la localidad de Zavalla (Santa Fe, Argentina) (Figura 1). El experimento a partir del cual se obtuvieron los datos para el desarrollo de este trabajo se instaló en un sector del Lote N° 14 del Campo Experimental J. V. Villarino (33° 01´ S; 60° 53´ O) de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario, desde mayo a noviembre del año 2024. Dicho sector se mantuvo como un resguardo y, si bien se realizaron siembras de especies forrajeras para la confección de rollos, no se efectuaron aplicaciones de herbicidas durante, al menos, los últimos cinco años.

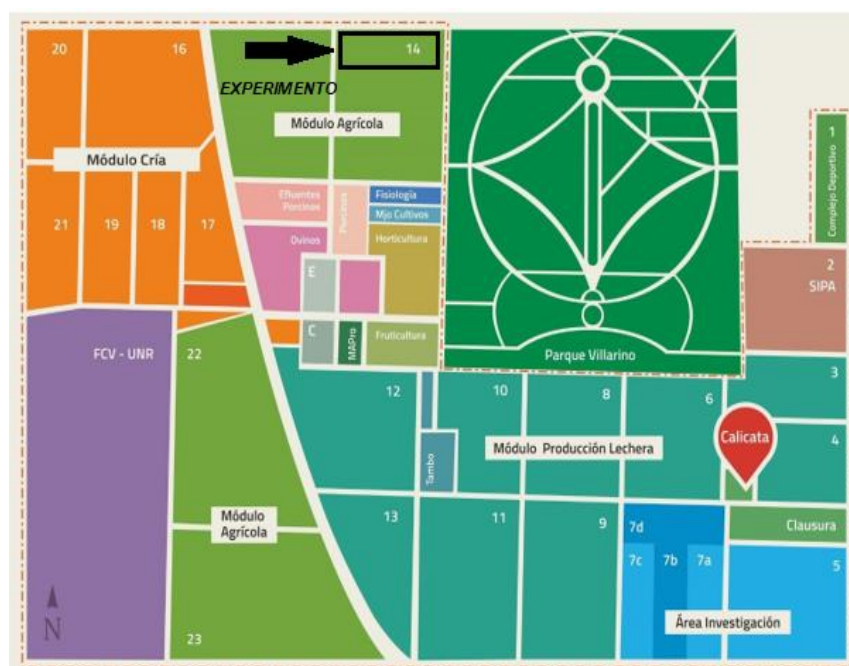


Figura 1. Ubicación del experimento en el Campo Experimental J.V. Villarino.

2.1.1) CARACTERIZACIÓN EDÁFICA

El ensayo se realizó sobre un suelo perteneciente a la Serie Roldán, clasificado taxonómicamente como Argiudol vértico, desarrollado a partir de sedimentos loésicos. El perfil presenta una secuencia de horizontes bien diferenciada (A1, B1, Bt, B3 y C), con textura franco-limosa en el horizonte superficial, buena capacidad de almacenamiento de agua y un pH débilmente ácido. El complejo de intercambio está dominado por calcio y posee una alta saturación de bases, características típicas de los suelos de la región pampeana con elevada aptitud agrícola.

Los valores medios de las propiedades químicas determinadas en el horizonte A1, antes de la instalación del ensayo (Abril 2024), fueron los siguientes (Tabla 1):

Tabla 1. Valores de análisis químicos (Factores explicados en la sección 2.2) (Profundidad: 0-20cm).

Uso del Suelo	Dosis glifosato	pH	M.O %	COT %	Cond dS/m	P ppm
Lotus	Dosis 1 (2L/ha)	5.40	4.14	2.40	189.9	39.72
	Dosis 2 (5L/ha)	5.10	4.34	2.52	199.9	45.45
	Testigo	5.06	4.07	2.36	186.7	43.72
Barbecho	Dosis 1 (2L/ha)	5.04	4.24	2.46	177.5	33.48
	Dosis 2 (5L/ha)	5.04	3.86	2.24	186.4	35.92
	Testigo	5.02	3.93	2.28	177.6	29.97

Nota. M.O.: materia orgánica (método de calcinación); COT: carbono orgánico total (método Walkley-Black); Cond: conductividad; P: fósforo (método Bray-Kurtz).

Los valores obtenidos en el horizonte A1 indicaron que el suelo presentó una reacción mediana a ligeramente ácida, con contenidos de materia orgánica y carbono orgánico total superiores a los umbrales de 3 % y 2 %, respectivamente, considerados indicadores de buena calidad para la región centro-sur de Santa Fe (Bacigaluppo et al., 2017). La conductividad eléctrica fue baja (menor a 2 dS/m) lo que evidenció la ausencia de problemas de salinidad en el sitio, mientras que la disponibilidad de fósforo se ubicó en un rango moderado a alto, de acuerdo con las categorías de referencia definidas por Bacigaluppo et al. (2017).

2.1.2) CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

El clima de la región pampeana es templado subhúmedo, con una temperatura media anual cercana a 17 °C y precipitaciones que oscilan entre 950 y 1100 mm/año, concentradas principalmente en primavera y otoño (Bianchi y Cravero, 2010). Durante el período en que se desarrolló el experimento (mayo a octubre de 2024), se observaron variaciones con respecto a los promedios históricos de la zona.

Las temperaturas mínimas fueron inferiores a los valores históricos entre mayo y julio, destacándose julio como el mes más frío del período (Figura 2). A partir de agosto se registró un incremento y en septiembre y octubre las temperaturas máximas superaron

los promedios históricos (Figura 3). Las temperaturas medias mostraron una tendencia ascendente desde agosto (Figura 4).

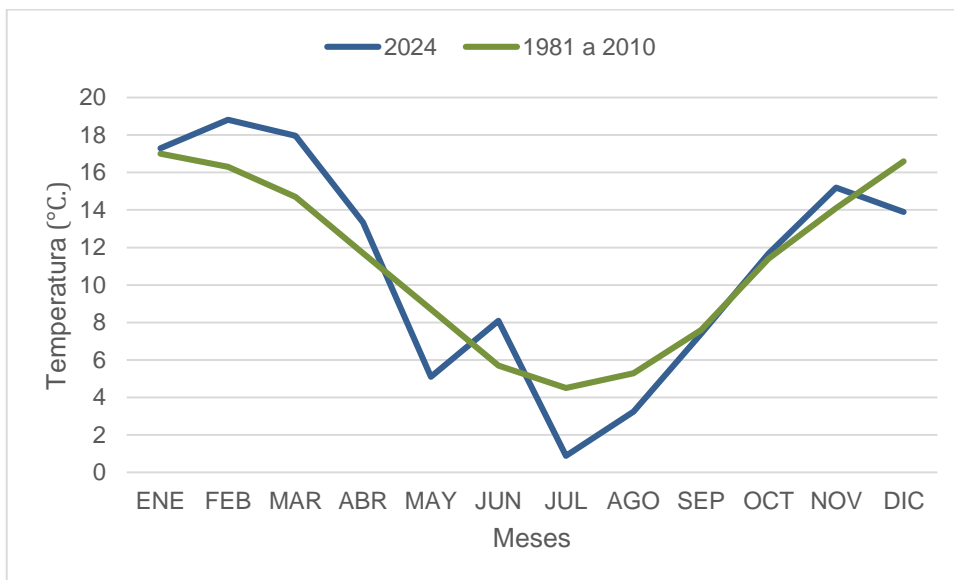


Figura 2. Temperaturas mínimas mensuales del año 2024 en relación a las mínimas históricas. (Fuente: Cátedra de Climatología, FCA-UNR).

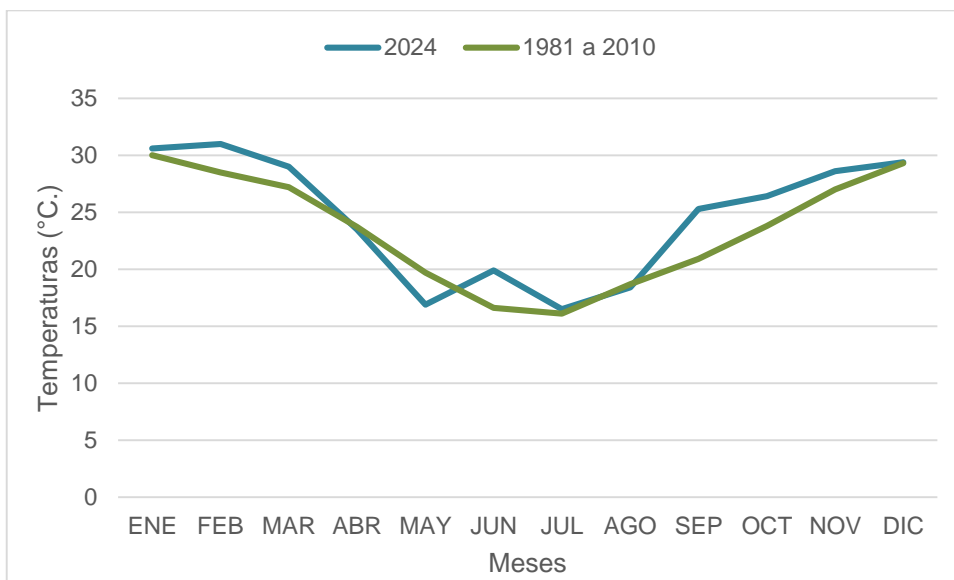


Figura 3. Temperaturas máximas mensuales del año 2024 en relación a las máximas históricas (Fuente: Cátedra de Climatología, FCA-UNR).

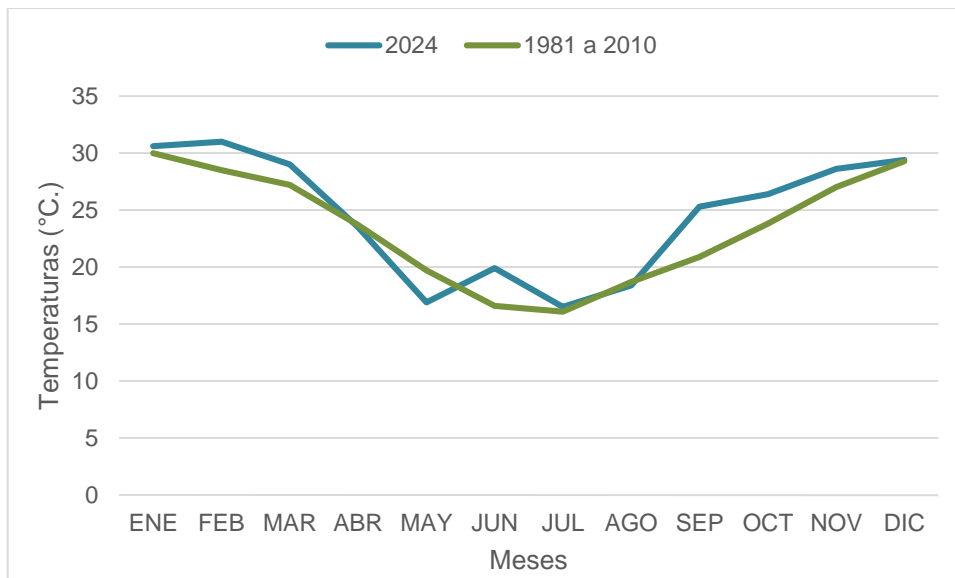


Figura 4. Temperaturas medias mensuales del año 2024 en relación a las medias históricas (Fuente: Cátedra de Climatología, FCA-UNR).

Respecto a las precipitaciones acumuladas, los registros de mayo, junio y julio fueron inferiores a la media histórica, con un déficit hídrico marcado en invierno. En agosto y octubre se superaron los valores históricos, mientras que septiembre presentó precipitaciones por debajo del promedio. (Figura 5).

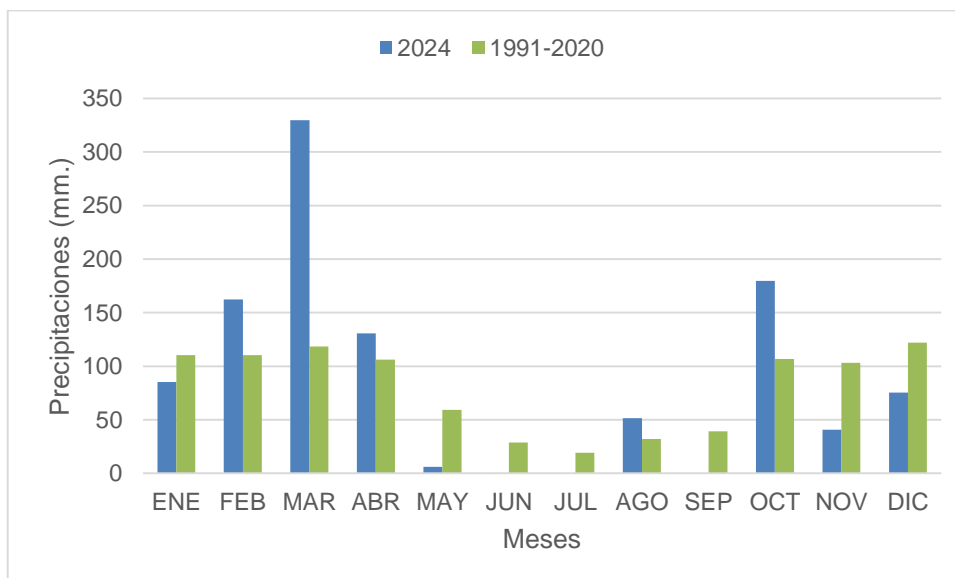


Figura 5. Precipitaciones acumuladas mensuales del año 2024 en relación a las del período Histórico (Fuente: Cátedra de Climatología, FCA-UNR).

2.2) DISEÑO Y MANEJO DEL EXPERIMENTO

El experimento presentó el diseño que se muestra en la Figura 6, donde el factor principal fue el uso del suelo, con dos niveles (barbecho y lotus como especie fitorremediadora) y el factor secundario fue la dosis de herbicida (glifosato como principio activo), con tres niveles (testigo: sin aplicación de glifosato, dosis 1 (2 L ha^{-1}) y dosis 2 (5 L ha^{-1})). Se realizó la aleatorización de ambos factores en las parcelas principales y secundarias. Las dimensiones de cada subparcela fueron de 35 m de largo por 8 m de ancho.

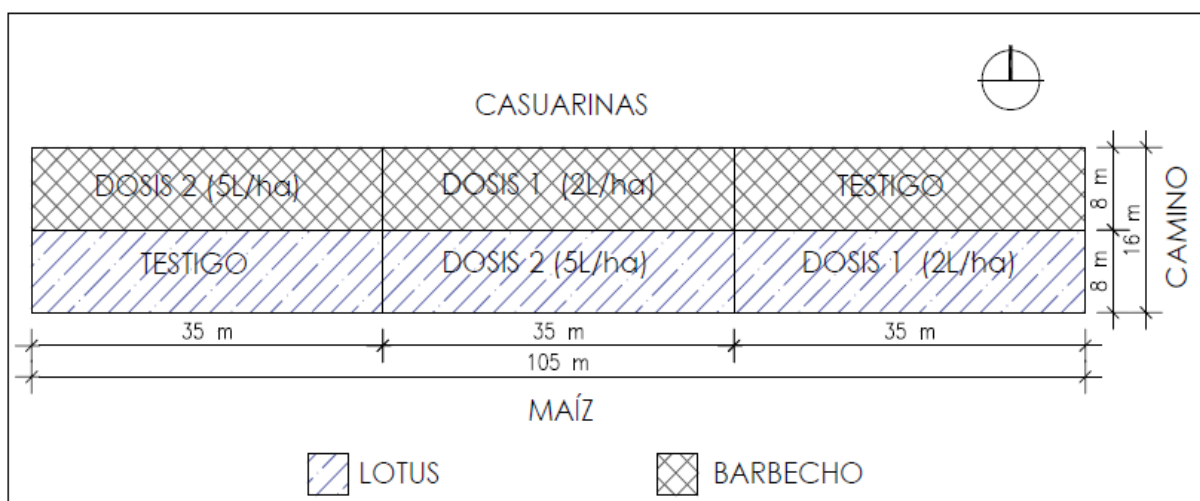


Figura 6. Diseño experimental

La aplicación de las dosis de glifosato se realizó el 28/05/2024 utilizando un dron pulverizador y la siembra de lotus se realizó el día 31/05/2024 empleando una dosis de siembra de 16 kg ha^{-1} . Las mediciones se realizaron en dos momentos: otoño (03/06/2024, luego de la aplicación de los tratamientos de glifosato y la siembra de lotus) y primavera (28/10/2024, a los 147 días desde la aplicación de los tratamientos de glifosato)

2.2.1) DETERMINACIONES Y METODOLOGÍAS DE MUESTREO

En cada sub-parcela de estudio se definió una transecta con cuatro puntos de muestreo separados 5 m entre sí, en cada uno de los cuales se extrajo una muestra para el análisis de macrofauna. Las mismas consistieron en monolitos de suelo de 25 cm de lado por 20 cm de profundidad, que fueron extraídos con pala y colocados en bolsas plásticas rotuladas para su posterior procesamiento en laboratorio (adaptado de Anderson e Ingram, 1993). En cada muestra se separaron manualmente los organismos presentes, los cuales fueron colocados en solución conservante de

alcohol al 70% V/V (Anderson e Ingram, 1993) Los organismos colectados fueron determinados hasta el nivel de orden, y familia en los casos en que fue necesario, mediante la observación con lupa estereoscópica y el empleo de la correspondiente clave taxonómica (Stehr, 1991; Borrór *et al.*, 1992; Morrone y Coscarón, 1998; Claps *et al.*, 2008)

Entre las variables relevadas se definió la abundancia (número de individuos) mediante conteo manual y la riqueza (número de taxones) a través de la determinación de los individuos colectados (Moreno, 2001). Asimismo, se evaluó la estructura de las comunidades de macrofauna asignando cada taxón a un grupo trófico según la información disponible en la bibliografía. Para ello, se definieron los siguientes grupos y se cuantificó la abundancia de cada uno: herbívoros (HER), predadores (PRE), detritívoros (DET) y hormigas (HOR) (Montero, 2008; Swift *et al.*, 2012). Las HOR (Hymenoptera: Formicidae) se consideraron como un grupo trófico independiente debido a que la mayoría de las especies explotan diversas fuentes de recursos de modo oportunista (Stuntz *et al.*, 2002). Con la información disponible se calcularon las relaciones funcionales entre grupos tróficos, las cuales consistieron en el cociente entre la abundancia de organismos DET y los restantes grupos tróficos (HER, PRE y HOR) y entre la abundancia de lombrices (LOM) y HOR (Cabrera Dávila *et al.*, 2017). Para el cálculo de la diversidad α se empleó el índice de Shannon-Weaver (H') (Pielou, 1966) (Ecuación 1) el cual expresa una medida del grado de incertidumbre en predecir a qué especie pertenecerá un individuo escogido al azar dentro de una muestra o colección (Jost y González-Oreja, 2012). Dicho índice asume que los individuos son seleccionados al azar y que todas las especies están representadas en la muestra. Sus valores varían entre cero, cuando está presente una sola especie, y el logaritmo de S cuando todas las especies están representadas con el mismo número de individuos (son equiprobables) (Magurran, 1988).

$$H' = - \sum p_i \ln p_i \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: p_i : frecuencia relativa de individuos de la especie i en la muestra.

Para la estimación de los indicadores que conforman el Índice de Evaluación del Hábitat Edáfico (IEHE), sobre los puntos de muestreo definidos a lo largo de cada transecta, además del relevamiento de la abundancia de macrofauna (MAF), se midió la cobertura superficial (COB) mediante una grilla de 25 cm \times 25 cm, registrando el porcentaje de suelo cubierto con vegetación viva y residuos. Luego se evaluó la calidad estructural superficial (CES) utilizando la metodología de análisis visual

adaptada de Ball et al. (2007). La misma consistió en la extracción de una porción de suelo de 20 cm de profundidad y entre 5 y 7 cm de espesor, sobre la cual se determinaron los estratos en los que se diferenció la misma, identificando su espesor y categoría de calidad (ANEXO, Tabla A3). En relación a esta última, se emplearon las categorías de referencia elaboradas por los autores anteriores, las cuales se identifican con un valor de 1 a 5, indicando la peor y la mejor calidad estructural, respectivamente. Finalmente, en cada parcela se tomó una muestra compuesta de suelo (0-20 cm), constituida por 12 submuestras, para la determinación en laboratorio del contenido de carbono orgánico (COT) mediante el método de Walkley y Black (1934).

Para la estimación del IEHE en cada una de las parcelas de uso del suelo y dosis de glifosato se calcularon los valores normalizados de los indicadores COT, COB, CES y MAF, dado que los mismos presentaron diferentes rangos de valoración y unidades de medida (Ecuación 2). De esta manera, los valores se expresaron en una escala de 0 a 1, cuyos extremos indicaron la peor y la mejor condición del indicador, respectivamente.

$$Vn=(Vmed-Vmin)/(Vmax-Vmin) \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde: Vmed: valor medio del indicador; Vmin: valor mínimo del indicador; Vmax: valor máximo del indicador.

En el caso del COT, donde sólo se tomó una muestra compuesta por parcela, la normalización se realizó a partir de los valores máximo (3.09%) y mínimo (1.33%) obtenidos por Sainz Rozas et al. (2019) a partir de un relevamiento de variables edáficas en numerosos sitios de la región pampeana. El IEHE se calculó en base a los valores normalizados de los indicadores y empleando la siguiente ecuación:

$$\text{IEHE} = 0,49. \text{COT} + 0,17 (\text{COB} + \text{CES} + \text{MAF}) \quad \text{Ecuación 3}$$

Para cada uno de los indicadores que lo componen (COT, COB, CES y MAF) se establecieron rangos y categorías cualitativas con intervalos de 0,25 unidades en la escala normalizada (0–1), a fin de facilitar su interpretación. Los valores entre 0 y 0,25 se clasificaron como Malo, entre 0,25 y 0,50 como Regular, entre 0,50 y 0,75 como Bueno, y superiores a 0,75 como Muy bueno.

Los valores posibles del IEHE (0-1) se agruparon en tres clases que caracterizaron cuán favorable resultó el suelo como hábitat para los organismos de la macrofauna: 0-0,33 (poco favorable), 0,33-0,66 (favorable), 0,66-1 (muy favorable).

2.2.2) ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Las variaciones en abundancia, riqueza y diversidad de macrofauna en los distintos momentos de muestreo, dosis de glifosato y uso de suelo se evaluaron mediante Modelos Lineales Generalizados y Mixtos. Se consideraron las interacciones entre dosis y momento de muestreo, uso de suelo y dosis, uso de suelo y momentos de muestreo y dosis y momento de muestreo y uso de suelo. Las familias de distribución utilizadas para plantear los modelos fueron Poisson y Binomial negativa. Para cada variable se compararon los valores Criterio de Akaike (AIC) y Criterio Bayesiano de Información (BIC), seleccionando los modelos que presentaron el menor valor. En caso de existir diferencias significativas entre factores, las mismas se evaluaron mediante la prueba LSD Fisher ($\alpha=0,05$). Los cálculos se realizaron a través de la interfaz de R incluida en el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2020).

3) RESULTADOS

3.1) PARÁMETROS DE LAS COMUNIDADES DE MACROFAUNA

3.1.1) ABUNDANCIA

En el muestreo de otoño, la macrofauna edáfica estuvo representada mayoritariamente por dos clases principales: Hexapoda y Diplopoda. En el caso de Hexapoda, los taxones pertenecieron al orden Coleoptera, dentro del cual se identificaron las familias Scarabaeidae, Elateridae, Curculionidae, Coccinellidae y Staphylinidae, siendo la más abundante Scarabaeidae, con 33 individuos. La clase Diplopoda estuvo representada por el orden Julida, familia Pseudonannolenidae, con un total de 43 individuos (Figura 7). Estas dos clases representaron, en conjunto, el 92 % de los individuos colectados, mientras que Oligochaeta aportó el 6 % y Arachnida y Chilopoda aparecieron en proporciones menores.

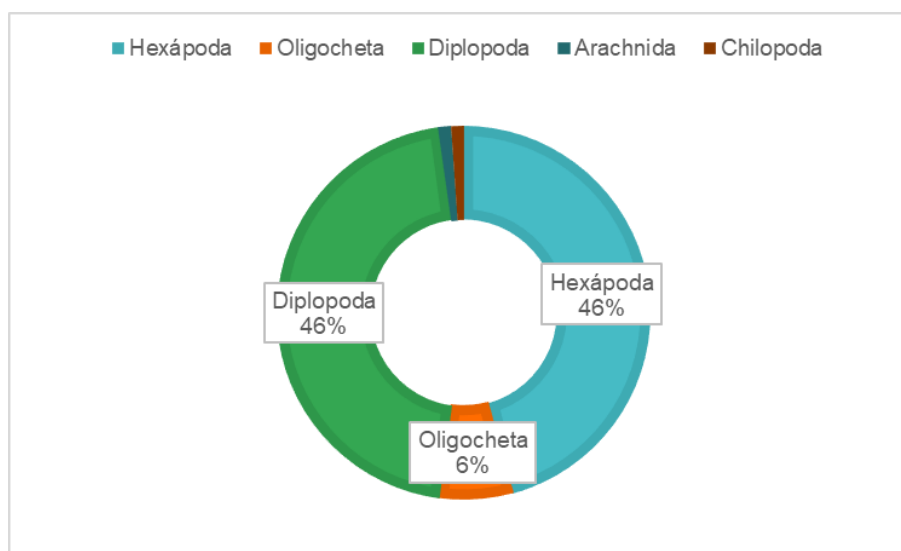


Figura 7. Composición y abundancia relativa de la macrofauna edáfica según clases taxonómicas (Hexapoda, Diplopoda, Oligochaeta, Arachnida y Chilopoda) en el muestreo de otoño, en parcelas con distintos usos del suelo y dosis de glifosato.

En la evaluación de primavera, la abundancia aumentó en todos los tratamientos con respecto al otoño, presentando los mayores valores las parcelas con lotus. Durante la primavera (Figura 8), la mayor abundancia correspondió a las clases Hexapoda y Diplopoda. Dentro de la primera, se registraron individuos de los órdenes Coleoptera e Hymenoptera. En Coleoptera se identificaron las familias Scarabaeidae, Elateridae, Tenebrionidae y Staphylinidae, siendo Elateridae la más abundante con 23 individuos.

En el caso de Hymenoptera, se registró la familia Formicidae, con un total de 26 individuos. Por su parte, la clase Diplopoda estuvo representada por el orden Julida, familia Pseudonannolenidae, con 51 individuos, constituyendo el grupo más numeroso en este muestreo. Además, Oligochaeta mostró una mayor abundancia relativa en primavera (11 %), mientras que Chilopoda, prácticamente ausente en otoño, alcanzó un 33 % en esta estación. Arachnida fue la clase menos representada en ambos momentos de muestreo.

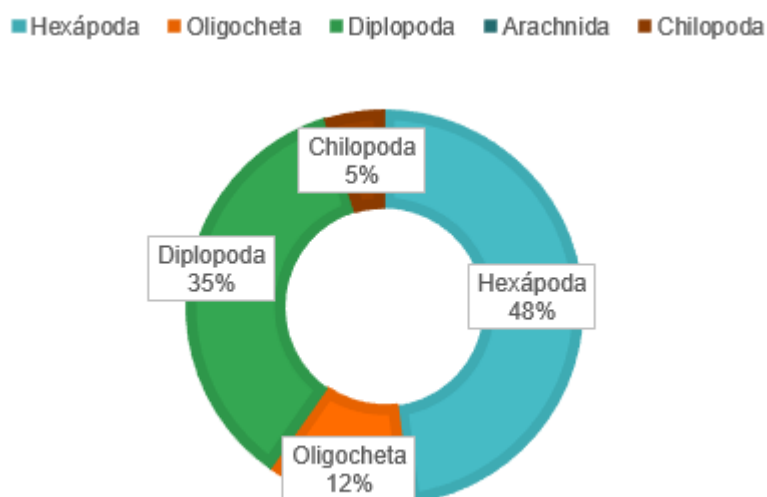


Figura 8. Composición y abundancia de la macrofauna edáfica según clases taxonómicas (Hexapoda, Diplopoda, Oligochaeta, Arachnida y Chilopoda) en el muestreo de primavera, en parcelas con distintos usos del suelo y dosis de glifosato.

La Tabla 2 presenta los valores promedio y desvío estándar de la abundancia total de macrofauna según momento de muestreo, uso de suelo y dosis. Se observó que la mayor abundancia se registró en barbecho con la dosis 2, tanto en otoño ($14,50 \pm 4,86$ organismos) como en primavera ($13,75 \pm 4,62$ organismos). Los tratamientos de barbecho con la dosis 1 también mostraron valores elevados en otoño ($10,00 \pm 3,46$ organismos), aunque menores que con la dosis 2. En contraste, los tratamientos con lotus y dosis 2 presentaron valores más bajos, particularmente en primavera ($2,75 \pm 1,19$ organismos). Los testigos sin aplicación de herbicida en ambos usos de suelo y momentos de muestreo mostraron valores intermedios o bajos en relación con los tratamientos que incluyeron glifosato, sin evidenciar un patrón definido entre estaciones.

Tabla 2. Valores promedio de abundancia de la macrofauna edáfica y error estándar para los distintos momentos de muestreo, usos del suelo y dosis de glifosato aplicadas.

Momento muestreo	Uso de suelo	Dosis	Valor promedio y error estándar (nº organismos)
Otoño	Lotus	Dosis 1 (2L/ha)	7,50 ± 2,69
		Dosis 2 (5L/ha)	4,50 ± 1,75
		Testigo	7,00 ± 2,53
	Barbecho	Dosis 1 (2L/ha)	10,00 ± 3,46
		Dosis 2 (5L/ha)	14,50 ± 4,86
		Testigo	3,25 ± 1,35
Primavera	Lotus	Dosis 1 (2L/ha)	6,00 ± 2,22
		Dosis 2 (5L/ha)	2,75 ± 1,19
		Testigo	4,25 ± 1,67
	Barbecho	Dosis 1 (2L/ha)	3,75 ± 1,51
		Dosis 2 (5L/ha)	13,75 ± 4,62
		Testigo	6,50 ± 2,37

Sólo existió interacción significativa entre el uso del suelo y las dosis de glifosato ($p=0,0084$) (Figura 9).

En barbecho, la aplicación de la dosis 2 de glifosato produjo la mayor abundancia de organismos, con una diferencia estadísticamente significativa respecto al testigo y a la dosis 1. La dosis 1 y el testigo mostraron valores intermedios y no difirieron significativamente entre sí.

En las parcelas con lotus no se detectaron diferencias significativas entre las dosis de glifosato y el testigo, lo que indicaría que, en este uso del suelo, el aumento de la dosis de glifosato no generó cambios relevantes en la abundancia de macrofauna.

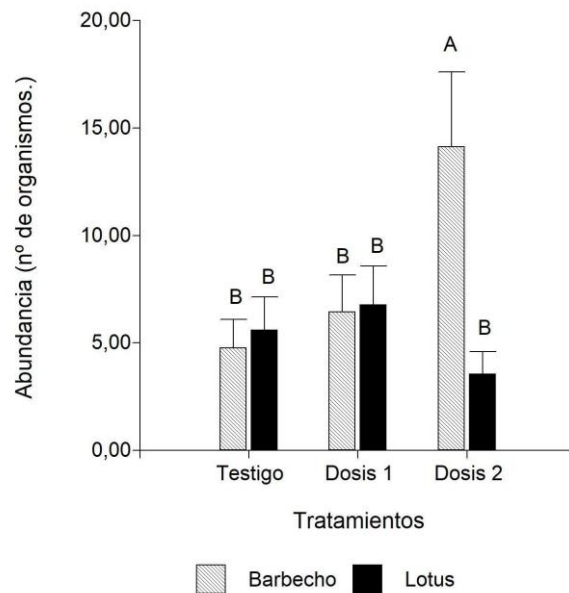


Figura 9. Valores promedio y desvío estándar de abundancia de macrofauna en los distintos usos del suelo y dosis de glifosato. *Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos y uso de suelo ($p < 0,05$).*

3.1.2) RIQUEZA

El análisis de la riqueza no mostró interacción ni diferencias significativas entre tratamientos, dosis de glifosato ni momentos de muestreo ($p > 0,05$). Sin embargo, los valores más altos se registraron en barbecho durante la primavera, particularmente con la dosis 2 ($3,00 \pm 0,87$ taxones) y el testigo ($2,75 \pm 0,83$ taxones). En contraste, los valores más bajos correspondieron a lotus con dosis 2 en otoño ($1,00 \pm 0,50$ taxones) (Tabla 3).

Se observó que los tratamientos con barbecho tendieron a presentar valores de riqueza ligeramente superiores en comparación con los de lotus, aunque sin alcanzar diferencias estadísticamente significativas. Las medias y desvíos estándar reflejan una baja variabilidad general entre tratamientos, lo que coincide con la ausencia de diferencias detectadas por el análisis estadístico.

Tabla 3. Valores promedio de riqueza de la macrofauna edáfica y error estándar para los distintos momentos de muestreo, usos del suelo y dosis de glifosato.

Momento muestreo	Uso de suelo	Dosis	Valor promedio y error estándar (nº taxones)
Otoño	Lotus	Dosis 1 (2L/ha)	2.25 ± 0.75
		Dosis 2 (5L/ha)	1 ± 0.5
		Testigo	1.75 ± 0.66
	Barbecho	Dosis 1 (2L/ha)	2.75 ± 0.83
		Dosis 2 (5L/ha)	2.5 ± 0.79
		Testigo	1.25 ± 0.56
Primavera	Lotus	Dosis 1 (2L/ha)	2.5 ± 0.79
		Dosis 2 (5L/ha)	1.75 ± 0.66
		Testigo	2.25 ± 0.75
	Barbecho	Dosis 1 (2L/ha)	2.5 ± 0.79
		Dosis 2 (5L/ha)	3 ± 0.87
		Testigo	2.75 ± 0.83

3.1.3) DIVERSIDAD

En la Tabla 4 y la Figura 10 se muestran los valores promedio y desvío estándar del índice de diversidad de Shannon-Weaver según uso de suelo, dosis de glifosato y momento de muestreo.

Durante el otoño, barbecho dosis 1 presentó la mayor diversidad de macrofauna (0,88 ± 0,20), siendo significativamente superior al testigo (0,25 ± 0,20) y a la dosis 2 (0,30 ± 0,20) (Figura 10)

En la primavera, la diversidad fue, en general, más alta que en el otoño, especialmente en el testigo (0,73 ± 0,20) y el barbecho dosis 1 (0,74 ± 0,20), aunque las diferencias entre dosis no fueron significativas.

Comparando ambas estaciones, la diversidad en el testigo y en la dosis 2 fue significativamente mayor en la primavera que en el otoño, mientras que los valores de

la dosis 1 se mantuvieron similares entre ambos momentos de muestreo. Esto podría indicar que la diversidad de organismos edáficos respondería tanto al momento de muestreo como a la combinación de dosis y uso del suelo, con una tendencia general a valores más altos en primavera.

Tabla 4. Valores promedio de diversidad de la macrofauna edáfica y error estándar para los distintos momentos de muestreo, usos del suelo y dosis de glifosato.

Momento muestreo	Uso de suelo	Dosis	Valor promedio y error estándar
Otoño	Lotus	Dosis 1 (2L/ha)	0.68 ± 0.2
		Dosis 2 (5L/ha)	0.30 ± 0.2
		Testigo	0.25 ± 0.2
	Barbecho	Dosis 1 (2L/ha)	0.88 ± 0.2
		Dosis 2 (5L/ha)	0.61 ± 0.2
		Testigo	0.17 ± 0.2
Primavera	Lotus	Dosis 1 (2L/ha)	0.4 ± 0.2
		Dosis 2 (5L/ha)	0.56 ± 0.24
		Testigo	0.73 ± 0.2
	Barbecho	Dosis 1 (2L/ha)	0.74 ± 0.2
		Dosis 2 (5L/ha)	0.69 ± 0.2
		Testigo	0.82 ± 0.2

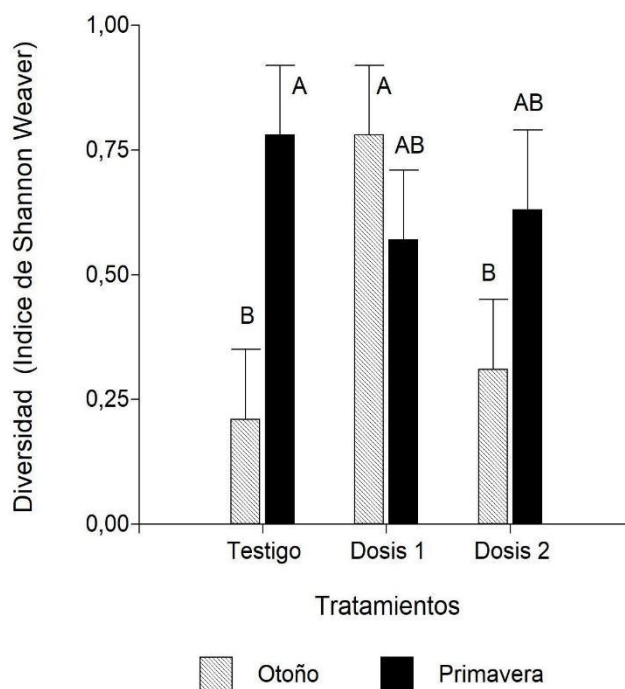


Figura 10. Valores promedio y desvío estándar de diversidad de macrofauna en las dosis y momentos de muestreo evaluados. *Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos y uso de suelo ($p < 0,05$).*

3.2) GRUPOS TRÓFICOS Y RELACIONES FUNCIONALES

La cuantificación de la participación de los distintos grupos tróficos en el ambiente edáfico resulta relevante porque cada grupo cumple funciones esenciales en los procesos del suelo y en la conformación de redes tróficas más o menos complejas (Erktan et al., 2020; Brose y Scheu, 2014).

En la Tabla 5 se presenta la abundancia total de organismos según grupos tróficos y las relaciones funcionales entre ellos. Durante el otoño y los tratamientos con lotus, la mayor abundancia correspondió a los DET y HER. En barbecho, el testigo alcanzó el valor más alto de detritívoros (19 individuos), seguido por la dosis 2 (10 individuos). Los PRE y HOR presentaron valores bajos o nulos en la mayoría de los tratamientos.

En la primavera se registró un aumento de HOR en lotus dosis 1 (15 individuos), mientras que en barbecho el testigo mostró la mayor cantidad de DET (46 individuos). Por su lado, los HER y PRE mantuvieron valores bajos y sin un patrón consistente.

En cuanto a las relaciones funcionales, los valores más altos del cociente DET/HER+PRE+HOR se observaron en barbecho testigo durante la primavera,

mientras que la relación LOM/HOR fue la máxima en la misma condición, indicando una mayor proporción de LOM respecto a HOR.

Tabla 5. Abundancia de organismos de la macrofauna según grupos tróficos y valores de las relaciones funcionales según usos del suelo, dosis y momentos de muestreo.

OTOÑO									
USO SUELO	DE	DOSIS	DET	LOM	HOR	PRE	HER	DET/HER+PRE+HOR	LOM/HOR
LOTUS		DOSIS 1 (2L/ha)	8	1	0	0	7	1.1	-
		DOSIS 2 (5L/ha)	2	0	0	0	7	0.3	-
		TESTIGO	10	1	0	0	4	2.5	-
BARBECHO		DOSIS 1 (2L/ha)	0	1	0	2	5	0	-
		DOSIS 2 (5L/ha)	10	3	0	1	9	1	-
		TESTIGO	19	0	0	1	9	1.9	-
PRIMAVERA									
USO SUELO	DE	DOSIS	DET	LOM	HOR	PRE	HER	DET/HER+PRE+HOR	LOM/HOR
LOTUS		DOSIS 1 (2L/ha)	1	0	15	2	3	0.1	-
		DOSIS 2 (5L/ha)	2	1	0	3	6	0.2	-
		TESTIGO	3	3	0	1	13	0.2	-
BARBECHO		DOSIS 1 (2L/ha)	11	4	9	0	5	0.8	0.4
		DOSIS 2 (5L/ha)	8	2	0	0	7	1.1	-
		TESTIGO	46	7	2	2	5	5.1	3.5

La Figura 11 muestra la abundancia relativa de los grupos tróficos de macrofauna edáfica en otoño, según uso del suelo y dosis de glifosato. En los tratamientos con lotus, los grupos DET y HER fueron los más representados. En particular, lotus dosis 1 presentó la mayor proporción de HER (43,8 %) y DET (43,7 %), mientras que en lotus dosis 2 se observó un aumento relativo de HER (77,8 %) y una menor proporción de DET (22,2 %). En lotus testigo, los DET fueron dominantes (66,7 %), seguidos por los HER (26,7 %).

En barbecho, la proporción de detritívoros fue mayor que en lotus, siendo que barbecho testigo presentó la proporción más alta de DET (65,5 %) y HER (31 %), seguido por barbecho dosis 2 (43,5 % de DET y 39,1 % de HER). En barbecho dosis 1, los HER fueron el grupo más abundante (62,5 %), mientras que no hubo presencia de DET, evidenciando una marcada diferencia respecto de los otros tratamientos.

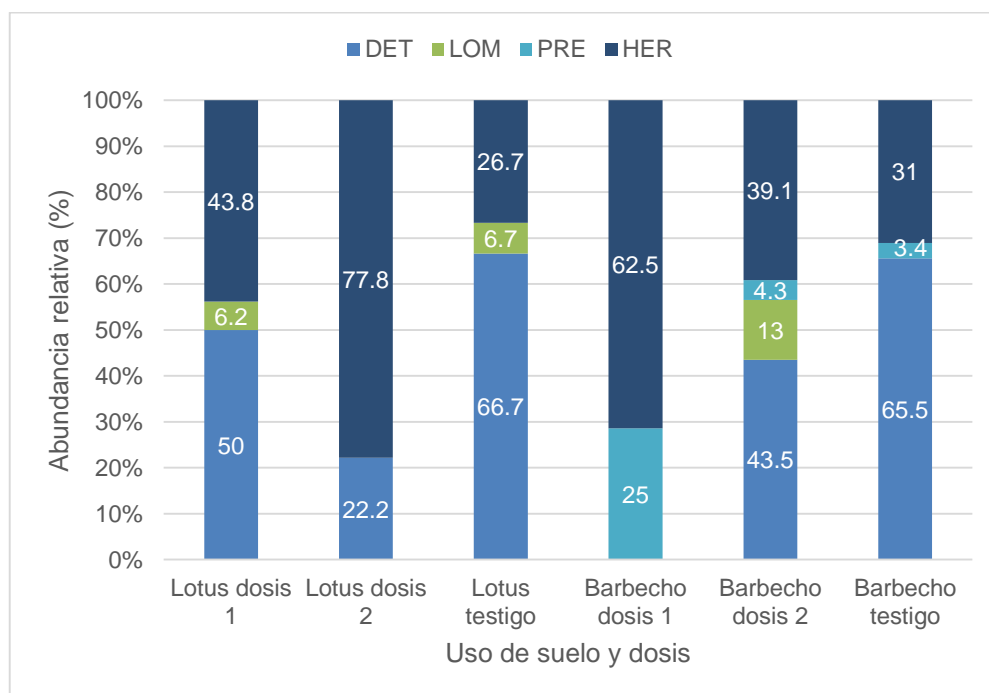


Figura 11. Composición porcentual de la abundancia relativa de grupos tróficos de macrofauna edáfica en otoño, según uso del suelo y dosis de glifosato.

La Figura 12 muestra la composición porcentual de la abundancia relativa de los grupos tróficos de macrofauna edáfica en primavera, según uso del suelo y dosis de glifosato.

En lotus testigo la proporción de HER fue dominante. En lotus dosis 1, las HOR representaron el 71,4 %, seguidos por HER (14,3 %) y PRE (9,5 %), en tanto que en

lotus dosis 2 los HER alcanzaron el 50 %, mientras que los DET representaron 16,7 % y los PRE el 25 %. El lotus testigo presentó 65 % de HER, 15 % de DET y 5 % de PRE, evidenciando una mayor diversidad relativa de grupos.

En barbecho se observaron proporciones elevadas de detritívoros. Barbecho testigo presentó la mayor proporción de DET (74,2 %) y una menor proporción de HER (8,1 %). En barbecho dosis 1, los DET representaron el 37,9 %, seguidos por las HOR (31 %) y HER (17,2 %). En barbecho dosis 2, la proporción de DET fue 47,1 %, mientras que los HER alcanzaron 41,2 %.

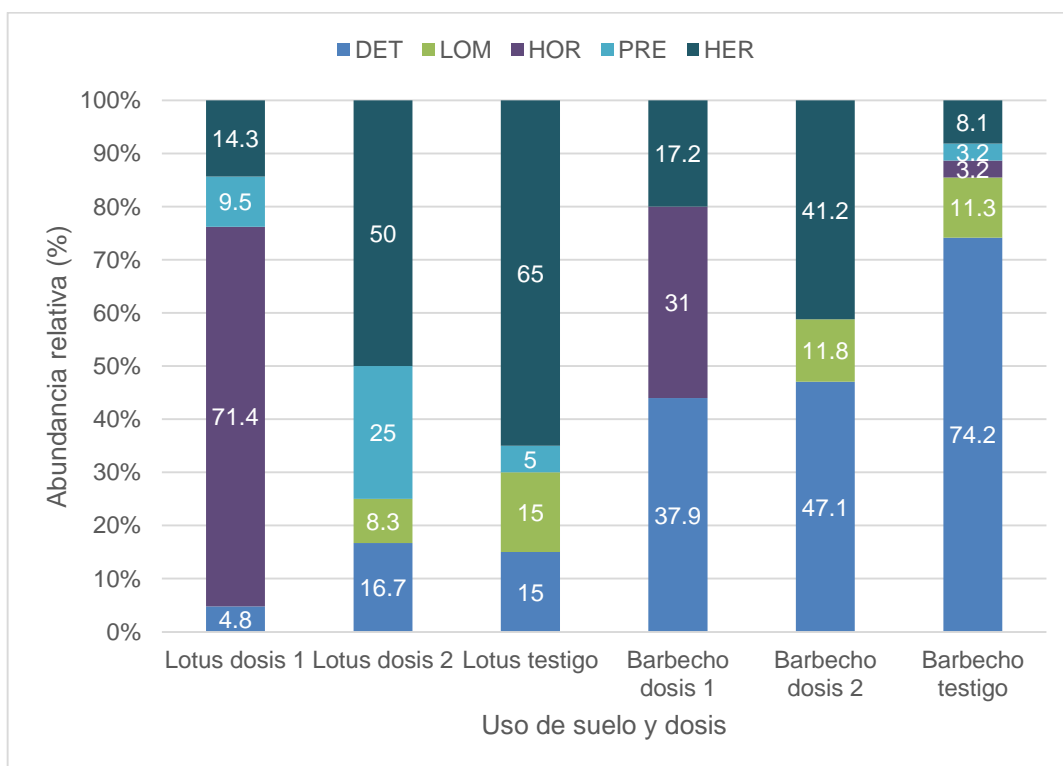


Figura 12. Composición porcentual de la abundancia relativa de grupos tróficos de macrofauna edáfica en primavera, según uso del suelo y dosis de glifosato.

3.3) ÍNDICE EVALUACIÓN DEL HÁBITAT EDÁFICO

La Tabla 6 presenta los valores de COT, COB, CES, MAF e IEHE en ambos momentos de muestreo.

Todos los tratamientos fueron clasificados como favorables (FAV) para el IEHE (Figura 13), aunque se evidenciaron diferencias en los componentes evaluados.

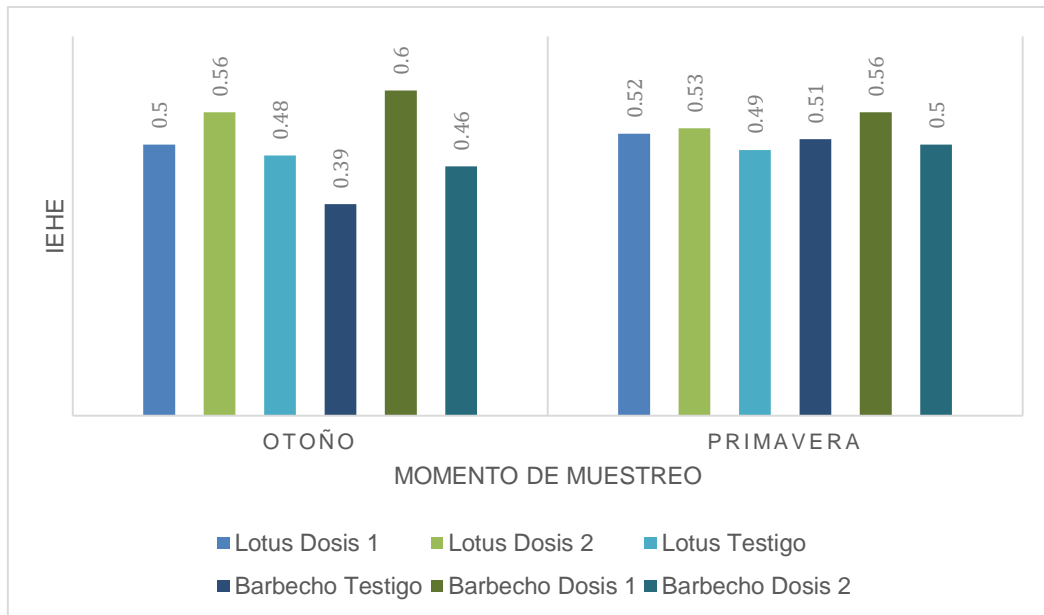
En el otoño, los valores de MAF fueron más bajos en los tratamientos con lotus, mientras que en barbecho se registraron valores superiores. El COT presentó valores similares entre tratamientos de dosis y uso del suelo, clasificándose como "bueno", mientras que la CES y la COB presentaron los valores más bajos en barbecho testigo.

En la primavera se observó un incremento en los valores de CES, alcanzando la categoría de "muy bueno" en barbecho testigo y en algunos tratamientos de lotus. El COT y la COB permanecieron en rangos similares a lo registrado en el otoño, mientras que los valores de MAF continuaron siendo bajos en lotus y más altos en barbecho.

Tabla 6. Valores normalizados y categorías cualitativas de los indicadores COT, COB, CES y MAF para cada uso de suelo y momento de muestreo.

OTOÑO						
	Lotus Dosis 1 (2L/ha)	Lotus Dosis 2 (5L/ha)	Lotus Testigo	Barbecho Testigo	Barbecho Dosis 1 (2L/ha)	Barbecho Dosis 2 (5L/ha)
COT	0.61	0.68	0.59	0.54	0.64	0.52
	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
COB	0.56	0.68	0.5	0.4	0.94	0.39
	Bueno	Bueno	Regular	Regular	Muy bueno	Regular
CES	0.44	0.55	0.47	0.29	0.46	0.4
	Regular	Bueno	Regular	Regular	Regular	Regular
MAF	0.2	0.11	0.18	0.07	0.27	0.41
	Malo	Malo	Malo	Malo	Regular	Regular
PRIMAVERA						
COT	0.61	0.68	0.59	0.54	0.64	0.52
	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
COB	0.43	0.63	0.34	0.48	0.63	0.38
	Regular	Bueno	Regular	Regular	Bueno	Regular
CES	0.71	0.45	0.75	0.79	0.71	0.65
	Bueno	Regular	Muy Bueno	Muy bueno	Bueno	Bueno
MAF	0.18	0.08	0.13	0.19	0.11	0.4
	Malo	Malo	Malo	Malo	Malo	Regular

Figura 13. Valores del IEHE en los muestreos de otoño y primavera para los distintos usos de suelo y dosis.



4) DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mostraron que la abundancia de macrofauna edáfica respondió de manera diferencial según el uso del suelo, la dosis de glifosato y el momento de muestreo (Tabla 2; Figura 9). En ambas estaciones, las parcelas de barbecho con la dosis más alta (5 L ha^{-1}) registraron las mayores abundancias, mientras que, en los tratamientos con lotus, la abundancia se mantuvo baja y relativamente uniforme entre dosis. Esto indicaría que la eliminación de la cobertura vegetal y la reducción de la competencia por recursos en el barbecho podrían favorecer la proliferación de organismos oportunistas o tolerantes al disturbio, coincidiendo con lo señalado por Hagner et al. (2019). Sin embargo, este aumento de abundancia no necesariamente reflejaría un mejor estado ecológico ya que el mismo estuvo representado por comunidades menos diversas y dominadas por pocos taxones, en línea con lo planteado por Altieri (1999) sobre la simplificación funcional en agroecosistemas perturbados.

Las lombrices son reconocidas como indicadores positivos de salud edáfica debido a su sensibilidad a cambios en la humedad, estructura y aporte de materia orgánica, además de su rol en la bioturbación y el ciclado de nutrientes. En contraste, las hormigas, por su plasticidad ecológica y hábitos generalistas, pueden incrementar su abundancia en ambientes perturbados, por lo que se consideran indicadoras de degradación (Cabrera, 2012; Schmidt et al., 2013). En este estudio, las lombrices presentaron abundancias bajas en la mayoría de los tratamientos, con la mayor relación LOM/HOR registrada en barbecho testigo en primavera, indicando una mayor proporción relativa de lombrices respecto a hormigas en esa condición. Por su parte, las hormigas mostraron un incremento marcado en lotus dosis 1 en primavera (15 individuos), lo que sugiere una respuesta favorable de este grupo a condiciones de menor cobertura y posibles situaciones de perturbación. La combinación de estos resultados con la interpretación funcional de los grupos tróficos sugiere que los sistemas con mayor relación LOM/HOR y predominancia de detritívoros (como barbecho testigo en primavera) presentarían mejores condiciones de salud del suelo. En cambio, la mayor presencia relativa de hormigas en lotus con bajo desarrollo y déficit hídrico estaría asociada a ambientes menos favorables para la macrofauna

benéfica, coincidiendo con la sensibilidad del componente MAF del IEHE registrado en estos tratamientos.

En cuanto a la diversidad, evaluada mediante el índice de Shannon-Weaver (Tabla 4; Figura 10), se observó que los valores fueron generalmente más altos en la primavera que en el otoño, lo cual concuerda con estudios previos que asociaron la mayor diversidad a condiciones climáticas más favorables (teniendo en cuenta, principalmente, temperatura y humedad) y mayor disponibilidad de recursos durante esta estación (Coleman et al., 2004). Los tratamientos testigo y barbecho con la dosis más baja mostraron mayor diversidad relativa en primavera, mientras que barbecho con la dosis más alta en otoño presentó la menor diversidad. Esto sugiere que el efecto combinado del herbicida y las condiciones más restrictivas del otoño, por ejemplo, en relación a las temperaturas, favorecieron el desarrollo de comunidades menos equilibradas. Resultados similares han sido reportados por Giménez y Sasal (2013) y Bedano y Domínguez (2016), quienes destacaron que el glifosato podría modificar la estructura de las comunidades edáficas, principalmente a través de cambios indirectos en el hábitat.

La riqueza de macrofauna edáfica (Tabla 3) no presentó diferencias significativas entre tratamientos, dosis ni momentos de muestreo. No obstante, se observó una tendencia hacia valores más altos en barbecho durante la primavera y más bajos en lotus con dosis alta en el otoño. Este patrón coincide con lo señalado por Coleman et al. (2004) y Bedano y Domínguez (2016) quienes destacaron que la riqueza suele ser menos sensible a perturbaciones de corto plazo que la abundancia, dependiendo en gran medida de la heterogeneidad del hábitat y de la oferta de microambientes favorables para la fauna edáfica.

La presencia de lotus, al aportar cobertura vegetal y actividad radicular, actúa como generadora de hábitat en el suelo, mejorando la estructura y ofreciendo microambientes favorables para la macrofauna. Comparado con el barbecho, donde la ausencia de cobertura reduce la oferta de refugios y recursos, la inclusión de vegetación favorecería la presencia y el mantenimiento de organismos edáficos. Sin embargo, en este estudio, a pesar de que el lotus mostró valores más altos de COB y CES que el barbecho, la abundancia y diversidad de macrofauna se mantuvieron relativamente bajas, posiblemente por el escaso desarrollo del cultivo bajo condiciones de déficit hídrico. Esto resalta la importancia de evaluar qué grupos

funcionales predominan en cada uso del suelo y qué indican respecto a la salud edáfica, ya que la presencia de vegetación, por sí sola, no garantizaría incrementos en la riqueza o diversidad de la comunidad.

En este estudio, la relación LOM/HOR mostró los valores más altos en barbecho testigo en primavera (3,5), lo que sugiere un ambiente más favorable para organismos beneficiosos, mientras que en lotus dosis 1 en primavera se registró la mayor abundancia de hormigas (15 individuos), asociada posiblemente a las limitaciones impuestas por el bajo desarrollo del cultivo y el déficit hídrico. Esta información permite vincular la presencia y proporción relativa de estos grupos con la salud del suelo y aporta un criterio biológico adicional para interpretar el efecto de los tratamientos evaluados.

El análisis de la composición funcional (Tablas 5 y 6; Figuras 11 y 12) mostró diferencias claras en relación a los grupos tróficos según usos del suelo, dosis de glifosato y momentos de muestreos. Durante el otoño, los DET y HER fueron predominantes en la mayoría de los tratamientos, mientras que los PRE y HOR mostraron valores bajos. En primavera, se registró un incremento marcado de hormigas (familia Formicidae) en varios tratamientos, especialmente en lotus con dosis 1, lo que alteró la proporción relativa de los grupos tróficos. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Hagner et al. (2019), quienes observaron que ciertas especies oportunistas podrían proliferar en ambientes alterados por agroquímicos.

En este sentido, se observó que los detritívoros constituyeron el grupo con mayor proporción en la mayoría de los tratamientos, especialmente en barbecho testigo (Figura 11), mientras que la presencia de herbívoros fue más relevante en los tratamientos con lotus. Asimismo, en primavera, los detritívoros dominaron en barbecho, especialmente en el testigo, mientras que los herbívoros presentaron mayor proporción en los tratamientos con lotus (Figura 12), lo que refleja un efecto del tipo de cobertura sobre la composición de la macrofauna.

La relación DET/No DET evidenció que en barbecho con dosis baja de glifosato la proporción de DET fue menor en ambas estaciones, lo que sugiere un empobrecimiento funcional en estos ambientes. Estos organismos cumplen un rol clave en la descomposición de la materia orgánica y el reciclado de nutrientes (Lavelle et al., 2006), por lo que su disminución podría afectar negativamente la salud del suelo.

Además, la relación LOM/HOR fue baja en todos los tratamientos, indicando una escasa presencia de lombrices, organismos reconocidos como indicadores de calidad edáfica (Pelosi et al., 2013). Esta baja abundancia podría explicarse tanto por las condiciones de déficit hídrico del período considerado en el experimento, como por los efectos combinados del glifosato sobre el hábitat y la disponibilidad de alimento (González y Ortega, 2022).

El IEHE integró variables físicas, químicas y biológicas para evaluar la calidad del suelo (Tabla 6). Todos los tratamientos fueron clasificados como “favorables”, aunque sus componentes mostraron diferencias importantes.

En cuanto al IEHE (Figura 13), en el otoño los valores más altos correspondieron a barbecho dosis 2 (0,60) y lotus dosis 2 (0,58), mientras que el más bajo se registró en barbecho testigo (0,39). En primavera, las diferencias entre tratamientos fueron menos marcadas, con valores en un rango estrecho entre 0,49 y 0,56, lo que sugiere cierta homogeneidad en la condición del hábitat edáfico hacia el final del período evaluado. Este patrón indica que, si bien la cobertura de lotus y el barbecho con dosis alta de glifosato pueden alcanzar puntualmente valores más elevados del índice, las condiciones generales del hábitat se mantuvieron estables y dentro de un rango favorable para la macrofauna en todas las combinaciones de uso del suelo y dosis de herbicida.

En primavera, los valores de CES aumentaron en la mayoría de los tratamientos, mientras que COB mostró variaciones según la combinación de uso del suelo y dosis de glifosato. En particular, algunos tratamientos con lotus alcanzaron mayores valores de CES, reflejando un efecto positivo sobre la estabilidad de los agregados y la protección del suelo frente a la erosión, en concordancia con Blanco-Canqui y Rylander (2017). Sin embargo, la MAF registró valores bajos en los tratamientos con lotus, lo que podría indicar que la presencia del lotus no fue suficiente para sostener comunidades abundantes y diversas de macrofauna. Esta respuesta limitada podría explicarse por el escaso desarrollo del cultivo debido al déficit hídrico registrado durante el ensayo, factor que restringió la generación de biomasa y, por ende, de refugios y recursos para la fauna, como fue señalado por Massot et al. (2016).

Respecto al glifosato, aunque no se considera un herbicida de alta persistencia comparado con otros fitosanitarios, su comportamiento en el suelo depende de

propiedades edáficas como contenido de arcilla, materia orgánica, pH y humedad, que influyen en su adsorción y degradación microbiana (Caprile y Aparicio, 2016). Estudios realizados en suelos pampeanos han mostrado que el glifosato puede permanecer disponible en el suelo por semanas o meses, especialmente cuando las condiciones ambientales reducen la actividad microbiana y la degradación (Aparicio et al., 2013). En este ensayo, que se extendió por aproximadamente 150 días, es probable que la concentración de glifosato haya disminuido progresivamente, aunque los efectos sobre la macrofauna edáfica podrían estar más asociados a cambios indirectos en el hábitat (como variaciones en la cobertura y la estructura del suelo por posibles impactos sobre la actividad microbiana) que a la toxicidad directa del herbicida. Esta interpretación coincide con estudios que señalan que, aun cuando los residuos de glifosato disminuyen con el tiempo, los impactos sobre la biota edáfica pueden persistir a través de modificaciones del ambiente del suelo (Bedano y Domínguez, 2016).

Los tratamientos de barbecho con dosis alta de glifosato presentaron la mayor abundancia total (Tabla 2), pero acompañada de comunidades con menor diversidad (Tabla 4; Figura 10) y dominadas por taxones oportunistas. Esto coincide con lo detallado por Altieri (1999) y Hagner et al. (2019), quienes sostienen que la abundancia, por sí sola, no es indicativa de un ecosistema saludable cuando se asocia a especies resistentes y pérdida de funcionalidad.

El uso del IEHE demostró la importancia de combinar indicadores físicos, químicos y biológicos para evaluar la calidad del suelo. Tal como señalan Sainz Rozas et al. (2019), el uso de indicadores biológicos es esencial para evitar sobreestimaciones de la calidad del hábitat basadas únicamente en parámetros físico-químicos. En este estudio, el lotus mostró potencial como herramienta de manejo y fitorremediación, aunque su eficacia estuvo condicionada por su bajo desarrollo y por el corto período de evaluación.

En conjunto, los resultados evidenciaron que la macrofauna edáfica respondió de manera diferencial al manejo del suelo y al uso de glifosato, coincidiendo con estudios previos que la reconocen como un bioindicador clave de la calidad edáfica (Giménez y Sasal, 2013; Bedano y Domínguez, 2016). El aumento de abundancia observado en barbecho con dosis alta de glifosato no se tradujo en un ecosistema más equilibrado, sino en comunidades simplificadas y dominadas por taxones oportunistas, en línea con lo planteado por Altieri (1999) sobre la pérdida de resiliencia en sistemas agrícolas

intensivos. El lotus mostró un efecto positivo en parámetros físicos y de cobertura (COB y CES), pero su capacidad para favorecer la macrofauna fue limitada por la baja biomasa generada durante el ensayo. Tal como señalaron Massot et al. (2016), la eficacia de esta especie como fitorremediadora dependería de su desarrollo radicular y aéreo, así como de las condiciones ambientales que permitan su implantación plena.

Estos hallazgos resaltan la importancia de integrar indicadores biológicos en la evaluación de la salud del suelo y de continuar con investigaciones de mayor duración y en distintos escenarios ambientales. Estudios futuros deberían incluir la medición de residuos de glifosato en el suelo, la dinámica de la microbiota edáfica y la interacción entre plantas, microorganismos y macrofauna, con el fin de validar el potencial del lotus como herramienta de fitorremediación y manejo sostenible en agroecosistemas. En este sentido, también habría que evaluarlo en otros ambientes climáticos y edáficos, en diferentes esquemas productivos y ante distintas tecnologías de manejo de suelos y de cultivos.

5) CONCLUSIONES

El suelo es un sistema vivo, complejo y dinámico, cuya salud depende del equilibrio entre sus componentes físicos, químicos y biológicos. Los resultados obtenidos en este trabajo mostraron que la macrofauna es un bioindicador sensible de las perturbaciones del manejo, con variaciones detectables en su abundancia, diversidad y estructura funcional, así como en el desempeño del hábitat edáfico evaluado mediante el IEHE.

Respecto de las hipótesis planteadas, la primera, que postulaba la existencia de diferencias entre usos del suelo (barbecho y lotus), se vio respaldada ya que el barbecho tendió a concentrar valores extremos de abundancia y a simplificar la composición trófica, mientras que la presencia de lotus generó mejores condiciones de COB y CES en relación al hábitat edáfico y atenuó los contrastes entre dosis de glifosato, aunque sin traducirse siempre en incrementos proporcionales de abundancia de MAF. La segunda hipótesis, que preveía un efecto negativo del aumento de la dosis de glifosato sobre la macrofauna, se confirmó parcialmente porque los efectos más notorios se observaron sobre la diversidad y la estructura en determinadas combinaciones de uso del suelo y estación (especialmente en barbecho y en otoño), mientras que la abundancia total no siguió un patrón único. La tercera hipótesis, la cual planteaba la existencia de diferencias en la composición por grupos tróficos, fue consistente con los resultados obtenidos, evidenciándose variaciones claras entre usos, dosis y momentos de muestreo. Finalmente, la cuarta hipótesis, que anticipaba diferencias del IEHE entre tratamientos, también se validó de manera parcial ya que todos los tratamientos presentaron una condición del hábitat favorable, pero sus componentes mostraron respuestas variables en función de la estacionalidad y del manejo. No obstante, en relación a la MAF se observó que las valoraciones fueron más bajas en relación a los demás indicadores.

Estos hallazgos, enmarcados en un período de evaluación acotado (mayo–octubre), sugieren que el lotus, empleado con propósito fitorremediador, posee potencial para amortiguar efectos del glifosato sobre el hábitat edáfico, condicionados por su nivel de implantación y por las condiciones climáticas del momento de muestreo. A la vez, resaltan que la interpretación de la “calidad” del suelo no puede basarse sólo en parámetros físico químicos, sino que también sería importante incorporar indicadores

biológicos, tales como la macrofauna y su estructura funcional, lo cual permitiría captar ciertos cambios que inciden en la estabilidad y el funcionamiento del sistema.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados invitan a profundizar estrategias que integren el uso dirigido de especies con potencial fitorremediador como el lotus, las evaluaciones de indicadores biológicos y el correcto manejo de las dosis de glifosato empleadas, especialmente en barbecho. Para robustecer la evidencia, se recomienda avanzar con evaluaciones multianuales y de mayor duración, incorporar mediciones directas de residuos de glifosato, incluir a la microbiota del suelo y explorar combinaciones de especies y prácticas que favorezcan la recuperación del hábitat edáfico.

En síntesis, esta investigación aportaría bases pseudoempíricas para sostener que la macrofauna edáfica constituye un eje clave en la evaluación de la salud del suelo y que el uso de lotus, con enfoque fitorremediador, podría contribuir a mitigar efectos del glifosato bajo determinadas condiciones. Consolidar estas tendencias, como se sugirió anteriormente, requerirá series de tiempo más largas y un abordaje integrador que articule indicadores físicos, químicos y biológicos en distintos escenarios de manejo y clima.

6) BIBLIOGRAFÍA

Altieri, M. A. (1999). *The ecological basis of agroecology*. CRC Press.

Anderson, J. M. & Ingram, J. S. I. (1993). *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods* (2ª ed.). CAB International.

Aparicio, V. C., De Gerónimo, E., Marino, D., Primost, J. & Carriquiriborde, P. (2013). Environmental fate of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in surface waters and soil of agricultural basins. *Chemosphere*, 93(9), 1866–1873. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.06.041>

Bacigaluppo, S., Gerster, G. & Salvagiotti, F. (2017). Ecorregión Pampeana centro sur de Santa Fe: Sistema productivo agrícola continuo. En M. G. Wilson (Ed.), *Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina* (pp. 259–265). Ediciones INTA.

Ball, B. C., Batey, T. & Munkholm, L. J. (2007). Field assessment of soil structural quality – A development of the Peerlkamp test. *Soil Use and Management*, 23(4), 329–337. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00102.x>

Barriuso, E., Benoit, P. & Dubus, I. G. (2012). Environmental impact of glyphosate and its metabolites. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(1), 219–230. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0584-1>

Bedano, J. C. & Domínguez, A. (2016). Glyphosate effects on soil biota in agricultural contexts. *Soil Biology & Biochemistry*, 92, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.09.010>

Bedano, J. C. & Domínguez, A. (2016). Soil macrofauna communities under different management systems in the Argentine Pampas. *Applied Soil Ecology*, 108, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.07.002>

Bedmar, F., Gianelli, V. & Panaggio, H. (2022). *Herbicidas en el suelo en sistemas de siembra directa*. INTA–Aapresid.

Bianchi, A. R. & Cravero, S. A. C. (2010). *Atlas climático digital de la República Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Blanco-Canqui, H. & Rylander, M. (2017). No-till and cover crops. En *Soil and water conservation for productivity and environmental protection* (pp. 165–194). Elsevier.

Borror, D. J., Triplehorn, C. A. y Johnson, N. F. (1992). *An introduction to the study of insects*. Sunders College Publishing

Brose, U. y Scheu, S. (2014). Into darkness: unravelling the structure of soil food webs. *Oikos*, 123, 1153-1156.

Brown, G. G., Barois, I. & Lavelle, P. (2015). Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere. *European Journal of Soil Biology*, 69, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.04.002>

Caprile, A. C. & Aparicio, V. C. (2016). Drenaje y transporte vertical de herbicidas en dos molisoles de la Pampa Ondulada Argentina. *Contaminación del suelo y calidad del medio ambiente*, 35(1).

Cabrera, G. (2012). La macrofauna edáfica como indicador biológico del estado de conservación/perturbación del suelo: Resultados obtenidos en Cuba. *Pastos y Forrajes*, 35(4), 349-364.

Cabrera Dávila, G., Socarrás, A. A., Hernández, G., Ponce de León, D., Menéndez, Y. I., & Sánchez, J. A. (2017). Evaluación de la macrofauna como indicador del estado de salud en siete sistemas de uso de la tierra, en Cuba. *Pastos y Forrajes*, 40(2), 118-126.

Chiappero, J., Sasal, M. C., Wilson, M. & Mastrángelo, M. (2024). Agricultural intensification and its effects on soil biodiversity: A global meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 904, 167321. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167321>

Coleman, D. C., Crossley, D. A. & Hendrix, P. F. (2004). *Fundamentals of soil ecology* (2.ª ed.). Academic Press.

Di Rienzo J. A., Casanoves F., Balzarini M. G., González L., Tablada M. y Robledo C. W. (2020). *InfoStat* (Versión 2020). Córdoba: Centro de Transferencia InfoStat

Domínguez, A., Bedano, J. C. & Arolfo, R. V. (2018). Soil macrofauna diversity as a key element for building sustainable agriculture in Argentine Pampas. *Acta Oecologica*, 92, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2018.08.012>

- Erktan, A., Or, D. y Scheu, S. (2020). The physical structure of soil: determinant and consequence of trophic interactions. *Soil Biology and Biochemistry*, 148, 107876.
- García, J., Pérez, M. & Ruiz, C. (2020). Lotus corniculatus: A potential phytoremediator in agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 300, 106962. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106962>
- Giménez, D. & Sasal, M. C. (2013). Efecto de la aplicación de glifosato sobre la macrofauna edáfica en sistemas agrícolas de la región pampeana. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 39(3), 245–256.
- González, M. & Ortega, J. (2022). Glyphosate effects on soil biota in agricultural contexts. *Soil Biology & Biochemistry*, 164, 108530. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108530>
- Hagner, M., Mikola, J., Saloniemi, I., Saikkonen, K. & Helander, M. (2019). Effects of a glyphosate-based herbicide on soil animal trophic groups and associated ecosystem functioning in a northern agricultural field. *Scientific Reports*, 9, 8540. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44988-5>
- Jost, L., & González-Oreja, J. A. (2012). Midiendo la diversidad biológica: más allá del índice de Shannon. *Acta Zoológica Lilloana*, 56(1–2), 3-14.
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., ... Rossi, J. P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42 (Suppl. 1), S3–S15. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.10.002>
- Magurran, A. E. (1988). *Ecological diversity and its measurement*. Princeton University Press
- Martínez, R., López, S. & Fernández, D. (2021). The dual role of Lotus species in mitigating glyphosate impacts on soil macrofauna. *Plant and Soil*, 459(1–2), 345–359. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04735-3>
- Massot, M. (2018). *Fitotoxicidad y rizorremediación de glifosato en suelos con Lotus corniculatus L.* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Río Cuarto].

Massot, M., Iorio, A., & Permingeat, H. (2016). *Lotus corniculatus: Tolerancia a glifosato y posibles usos en fitorremediación*. XXV Congreso de la Ciencia del Suelo, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.

Montero, G.A (2008). Comunidades de artrópodos en vegetación de áreas no cultivadas del sudeste de Santa Fe. (Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Rosario.)

Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad*. Zaragoza, España: CYTED, ORCYT-UNESCO & Sociedad Entomológica Aragonesa (SEA).

Morrone, J. J. y Coscarón, S. (1998). *Biodiversidad de artrópodos argentinos* (Vol. 1). Ediciones Sur.

Pelosi, C., Barot, S., Capowiez, Y., Hedde, M. & Vandenbulcke, F. (2013). Pesticides and earthworms: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 176, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.05.014>

Pielou, E. C. (1966). The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 13, 131-144.

Sainz Rozas, H. R., Calviño, P. A. & Echeverría, H. E. (2019). *Indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina*. INTA.

Schmidt, F. A., Ribas, C. R., & Schoereder, J. H. (2013). How predictable is the response of ant assemblages to natural forest recovery? Implications for their use as bioindicators. *Ecological Indicators*, 24, 158-166.

Swift, M. J., Bignell, D., Moreira, F., & Huising, E. J. (2012). El inventario de la diversidad biológica del suelo: conceptos y guía general. En F. Moreira, E. J. Huising, & D. E. Bignell (Eds.), *Manual de biología de suelos tropicales: Muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo suelo* (pp. 29-52). Instituto Nacional de Ecología de México.

Stehr, F. W. (1991). *Immature insects* (1a ed., Vol. 2). Kendall-Hunt Publishing Company.

Stuntz, S.; Ziegler, C.; Simon, U.; Zotz, G. 2002. Diversity and structure of the arthropod fauna within three canopy epiphyte species in central Panama. *Journal of Tropical Ecology* 18: 161-176.

Walkley, A. & Black, I. A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>

7) ANEXO

Tabla A1. Detalle taxonómico de la macrofauna edáfica en otoño, grupos tróficos y abundancia.

Clase	Orden	Familia	Grupo trófico	Abundancia (n° de org.)
Hexapoda	Coleoptera	Scarabidae	HER	33
		Elateridae	HER	5
		Curculionidae	HER	2
		Coccinellidae	PRE	1
		Staphylinidae	PRE	1
		Indeterminado	HER	1
Oligochaeta	Haplotaxida	Lumbricidae	DET	5
	Enchytraeida	Enchytraeidae	DET	1
Diplopoda	Julida	Pseudonannolenidae	DET	43
Arachnida	Araneae		PRE	1
Chilopoda	Geophilomorpha	Geophilidae	PRE	1

Tabla A2. Detalle taxonómico de la macrofauna edáfica en primavera, grupos tróficos y abundancia.

Clase	Orden	Familia	Grupo trófico	Abundancia (n° de org.)
Hexapoda	Coleoptera	Scarabidae	HER	16
		Elateridae	HER	23
		Tenebrionidae	DET	3
		Staphylinidae	PRE	1
	Hymenoptera	Formicidae	HOR	26
Oligochaeta	Haplotaxida	Lumbricidae	DET	17
Diplopoda	Julida	Pseudonannolenidae	DET	51

Tabla A3. Categorías de CES y atributos diferenciales de cada una (Adaptado de Ball *et al.*, 2007).

Categorías de CES	Facilidad de ruptura (suelo húmedo)	Tamaño y apariencia de los agregados	Porosidad visible	Raíces
5 – FRIABLE <i>La porción de suelo se desmorona y tiende a caer de la pala</i>	Facilidad de ruptura de los agregados con los dedos.	< 6 mm luego de la ruptura.	Altamente poroso.	Presentes en toda la porción de suelo. Atraviesan los agregados.
4 – INTACTA <i>La porción de suelo queda retenida en la pala como un bloque (mantiene su forma original)</i>	Facilidad de ruptura de los agregados con la mano.	Mezcla de agregados porosos, redondeados, de entre 2 y 70 mm. Terrones ausentes.	La mayoría de los agregados son porosos.	Presentes en toda la porción de suelo. Atraviesan los agregados.
3 – FIRME	Poco dificultosa.	Mezcla de agregados porosos de entre 2 mm y 10 cm. Menos del 30% son de menos de 1 cm. Pueden estar presentes algunos bloques angulares, poco porosos.	Presencia de macroporos y grietas. Baja porosidad intra-agregados.	La mayoría de las raíces rodean los agregados.
2 – COMPACTA	Difícultosa	Mayormente bloques subangulares de más de 10 cm de largo con escasa porosidad. Menos del 30% de los bloques son de menos de 7 cm. Posibilidad de aparición de estructura laminar.	Escasos macroporos y grietas.	Todas las raíces están agrupadas en los macroporos y alrededor de los agregados.
1 – MUY COMPACTO	Bastante dificultosa	Mayormente bloques angulares poco porosos de más de 10 cm de largo. Muy pocos de menos de 7 cm de largo.	Muy reducida. Puede haber macroporos presentes y contener zonas anaeróbicas.	Pocas o ninguna. Si hay algunas, están restringidas a las grietas.