



Impacto del uso de fitosanitarios en sistemas agrícolas

Foto: Isabel García Carriquiry

Ing. Agr. (Mag) Isabel García Carriquiry^{1,2}, Ing. Agr. (Dra) Grisel Fernández²

1- Centro Universitario Regional Litoral Norte, Universidad de la República

2- Facultad de Agronomía, Universidad de la República

1– Introducción

El uso de productos fitosanitarios, para el manejo de adversidades como plagas, enfermedades y malezas se ha intensificado fuertemente en los sistemas agrícolas del Cono Sur y notoriamente en Uruguay. Diversas razones como la característica práctica del doble cultivo anual en nuestra agricultura asociado a alta frecuencia de aplicación de fitosanitarios, con uso de mezclas de tanque e incrementos progresivos en las dosis, permiten explicar que se alcancen al presente, intensidades de uso del orden de 7 y 8 kg por hectárea (Faostat, 2025).

Las elevadas y complejas cargas de fitosanitarios observadas superan el alcance de las evaluaciones de riesgo convencionales, centradas en compuestos individuales, lo que evidencia la necesidad de estudios bajo condiciones

más realistas. Dado que la salud del ecosistema agrícola —y especialmente la del suelo— constituye el pilar de la producción sostenible, resulta estratégico analizar cómo las prácticas actuales afectan la integridad biológica que sustenta la productividad a largo plazo.

En este contexto, la siguiente exposición pretende realizar un desarrollo breve sobre el problema que se está planteado y presentar los resultados de un grupo de estudios que tuvieron por objetivo determinar los impactos del uso de secuencias de herbicidas, aplicadas en condiciones reales de producción, sobre un conjunto de funcionalidades claves del suelo para la sustentabilidad del agroecosistema.

2– El desafío oculto de los fitosanitarios: más allá del efecto deseado

Desde un punto de vista agronómico, tradicionalmente centramos la atención en los efectos visibles: el control efectivo de la especie objetivo maleza, insecto o patógeno por parte del fitosanitario aplicado. Sin embargo, los efectos no visibles representan una amenaza compleja. Estudios recientes como el de Knuth et al. (2024) han demostrado

la persistencia generalizada de mezclas complejas de residuos de pesticidas en suelos agrícolas europeos, incluso en campos bajo manejo orgánico sin aplicación de fitosanitarios durante más de cinco años. El riesgo ambiental de estos residuos en suelo, reside en una potencial cascada de efectos indirectos y subletales que no son inmediatamente perceptibles, pero que pueden comprometer la estabilidad del ecosistema a mediano y largo plazo. Los efectos derivados de concentraciones subletales pueden no matar a los organismos no-blanco, pero sí alterar su comportamiento, reproducción o funciones fisiológicas, disminuyendo así sus habilidades de supervivencia en el ecosistema.

El mecanismo de acción de los fitosanitarios explica por qué sus consecuencias se extienden por el ecosistema en una cascada de eventos. Las rutas metabólicas interferidas por los fitosanitarios no son exclusivas de las plagas, patógenos o malezas, sino que pueden ser compartidas por un sinnúmero de especies que coexisten en el agroecosistema y que cumplen funciones o servicios imprescindibles en la sostenibilidad de la producción. Por ejemplo, el glifosato inhibe la enzima EPSPS en la vía del shikimato, presente en plantas, pero también presente en bacterias y hongos. De manera similar, los insecticidas organofosforados inhiben la acetilcolinesterasa, crucial para la transmisión nerviosa en insectos, pero también, en lombrices, peces y mamíferos.

El marco regulatorio actual presenta limitaciones significativas para abordar esta complejidad. Los estudios pre-

lanzamiento al mercado suelen centrarse en fitosanitarios individuales, se realizan en condiciones controladas de laboratorio y utilizan organismos estandarizados. Este enfoque predictivo no refleja la realidad de los agroecosistemas, donde los organismos nativos están expuestos a mezclas complejas de compuestos en secuencias variables, bajo condiciones ambientales muchas veces estresantes. Debido a estas carencias, es fundamental realizar estudios en contextos de uso real para obtener una evaluación más precisa y ecológicamente relevante del riesgo.

3– Un enfoque en condiciones reales de producción

Para abordar las limitaciones de las evaluaciones de riesgo ambiental convencionales, se llevó a cabo una estrategia experimental que combinó el uso de un mesocosmos (experimento en condiciones semi-controladas) y ensayos de campo repetido en dos años consecutivos en Paysandú. Este enfoque permite evaluar el impacto de secuencias de herbicidas en un contexto directamente aplicable a la agricultura uruguaya, generando conocimiento semi-diagnóstico sobre las prácticas actuales. Por más detalles en metodología y resultados podrán consultarse las publicaciones García Carriquiry et al (2024, 2025a, 2025b).

El diseño experimental se fundamentó en los siguientes pilares para asegurar su relevancia práctica:

- **Contexto de uso real:** Se utilizaron mezclas de tanque con las dosis recomendadas en la etiqueta de los productos, replicando las prácticas comunes de los productores.
- **Secuencia temporal realista:** Las aplicaciones se realizaron siguiendo un cronograma real del ciclo de un cultivo, permitiendo un período de disipación entre cada una.
- **Componentes nativos:** Se emplearon suelos y organismos locales en los ensayos de campo, garantizando que los resultados reflejen las interacciones ecológicas propias del entorno productivo uruguayo.

El estudio se centró en un cultivo de soja, con una secuencia de tres aplicaciones de herbicidas. En campo la primera aplicación fue 30 días antes de la siembra (glifosato + clethodim + dicamba); la segunda, en pre siembra (glifosato + s-metolachlor + flumioxazin); y la tercera en postemergencia 45 días post-siembra aproximadamente (fomesafen). Se evaluaron tres tratamientos: un control sin aplicación, con desmalezado a mano (dosis 0), la dosis de etiqueta (dosis 1) y una doble dosis (dosis 2). La inclusión de la doble dosis se justifica por escenarios realistas como el solapamiento de aplicaciones o condiciones ambientales extremas que impiden la degradación normal de los compuestos. En el mesocosmos se aplicaron únicamente las primeras dos aplicaciones y en la segunda no se aplicó el glifosato.

Para cuantificar el impacto de estos tratamientos, se



Emergencia de soja post aplicaciones de herbicidas

midieron las siguientes funcionalidades clave del suelo y la planta:

- Biomasa de la planta de soja en V4 y R3.
- Colonización de raíces por hongos micorrícicos arbusculares en V4 y R3.
- Nodulación como indicador de la fijación biológica de nitrógeno en V4 y R3.
- Potencial de nitrificación del suelo, únicamente en el ensayo a campo, 7 días posterior a cada aplicación.
- Tasa de degradación del rastrojo evaluada a los 4.5 meses de haber sido enterrado posterior a la primera aplicación. Evaluado únicamente en el ensayo a campo.

Esta metodología permitió obtener datos robustos sobre cómo las prácticas de manejo de herbicidas afectan procesos ecológicos esenciales, cuyos resultados se presentan a continuación.

4– Resultados principales: impactos sobre las funcionalidades clave del suelo

El hallazgo general de los estudios es que, si bien los efectos en condiciones de campo pueden ser transitorios y más complejos de detectar que en ambientes controlados, el uso de secuencias de herbicidas generó impactos negativos medibles sobre funciones ecológicas esenciales para la salud del suelo y la nutrición del cultivo. Los hallazgos para cada funcionalidad evaluada se sintetizan a continuación:

- **Residuos de Herbicidas:** No se encontraron muestras de suelo libres de residuos de herbicidas, ni siquiera en las parcelas de control. En general, las concentraciones de los compuestos aplicados fueron en promedio entre 1,4 y 3,5 veces mayores en las condiciones de mesocosmos en comparación con los ensayos a campo.
- **Plantas de soja:** En el mesocosmos se observó un efecto transitorio en V4 sobre la biomasa de las plantas en los tratamientos aplicados respecto al control, que no fue observado en la biomasa de plantas en R3. En el ensayo a campo no se observaron efectos significativos de los tratamientos sobre la biomasa de la planta en sus diferentes etapas ni sobre el rendimiento final de la cosecha.
- **Micorrización:** En el mesocosmos, se observó un efecto negativo dosis-dependiente, con una reducción significativa en la colonización total de las raíces y en la formación de arbusculos (estructuras de intercambio de nutrientes) en V4, y paralelamente una menor concentración de fósforo en planta. En R3 permanecieron estas diferencias únicamente en la colonización total, pero no en la formación de arbusculos, sin diferencias en la concentración de fósforo entre tratamientos. En el experimento de campo, no se detectó un efecto claro de los tratamientos en las variables micorrícicas estudiadas ni en el fósforo en planta.

- **Nodulación:** En el mesocosmos, el peso de los nódulos se redujo en forma dosis-dependiente con la aplicación de herbicidas en V4, mientras que en R3, persistió la reducción significativa del peso de nódulos en el tratamiento con la doble dosis, siendo 80% menor al control. En campo, se observó un efecto negativo transitorio en el tratamiento de dosis recomendada, que mostró un menor peso de nódulos en V4 en comparación con el control durante el primer año, mientras que la doble dosis presentó un comportamiento intermedio. Cabe aclarar que, en el segundo año, las condiciones hídricas a V4 impidieron el normal desarrollo de los nódulos en todos los tratamientos en esta etapa, recuperándose sin diferencias significativas con el control en R3.

- **Ciclo del Nitrógeno:** En el ensayo de campo, se detectó un efecto negativo sobre el potencial de nitrificación del suelo después de la tercera aplicación de herbicidas a ambas dosis, en el primer año del ensayo.

- **Descomposición de rastrojo:** A mediano plazo, se observó una disminución en la velocidad de degradación del rastrojo de avena en campo; efecto que fue significativo en el tratamiento de doble dosis el segundo año.



Evaluación del potencial de nitrificación en suelo siete días post aplicación

5– Discusión y reflexiones finales de los estudios conducidos

Los resultados obtenidos en mesocosmos y en campo reflejan en parte la complejidad que presenta el abordaje de esta problemática. El mesocosmos, al ser un experimento bajo condiciones parcialmente controlados sin interferencia del rastrojo en superficie del suelo, así como con mínimas pérdidas por deriva y/o volatilización en comparación con las condiciones de campo, permitió la llegada de la dosis de manera completa al suelo, y mostró una clara relación dosis-respuesta. En cambio, en el campo, los efectos no fueron tan claros en primera instancia porque la intercepción del rastrojo condicionó parcialmente la llegada de los herbicidas al suelo, al mismo tiempo que otros factores bióticos o abióticos pudieron enmascarar los efectos observados en el mesocosmos. Esto no invalida los hallazgos de mesocosmos; por el contrario, estos demuestran el potencial de daño inherente de las prácticas evaluadas y sirven como una advertencia crítica sobre su ecotoxicidad, la cual se manifestó parcial y transitoriamente en condiciones de campo.

La detección de efectos transitorios sobre la nodulación y la nitrificación resulta particularmente relevante. Cuando la fijación biológica de nitrógeno se ve afectada, el cultivo recurre en mayor medida a las reservas edáficas para satisfacer su demanda, lo que reduce la eficiencia y compromete la sostenibilidad económica y ambiental. La nitrificación, por su parte, constituye el principal proceso que regula la disponibilidad de formas inorgánicas de nitrógeno aprovechables por las plantas (Prosser y Nicol, 2008). Aun cuando estos impactos no sean permanentes, la disrupción de la fijación biológica implica un menor aporte de nitrógeno atmosférico y una mayor extracción del suelo, alterando el balance de este nutriente.

En cuanto a los efectos del tratamiento bajo la doble dosis en campo, se destaca la menor tasa de descomposición del rastrojo durante el segundo año. Este resultado podría evidenciar un enlentecimiento en el ciclado de la materia orgánica, proceso esencial en términos tanto productivos como ecológicos.

Cabe destacar que en este trabajo solo se aplicaron herbicidas, por lo que la evaluación no incluye el efecto potencial de todo el paquete tecnológico utilizado en la producción (insecticidas, fungicidas, etc). A pesar de ello, estas observaciones conducen a una serie de reflexiones finales clave para la sostenibilidad de los agroecosistemas:

- **Insuficiencia de las evaluaciones de riesgo:** Es evidente que los métodos regulatorios actuales, basados en estudios de laboratorio con compuestos individuales, son insuficientes para proteger adecuadamente a los agroecosistemas de los efectos combinados y secuenciales de las prácticas de uso reales.

- **Urgencia del manejo responsable:** A pesar de las lagunas de conocimiento, la evidencia disponible subraya la urgencia de adoptar un uso más responsable de los fitosanitarios e implementar de manera decidida estrategias de manejo integrado disponibles que reduzcan la dependencia química.

- **Criterios de decisión:** El debate debe trascender la eficiencia de control y el costo del uso de herbicidas. Es necesario preguntarnos: ¿cuánto del ambiente estamos dispuestos a hipotecar? y ¿cuán lejos estamos del punto de no retorno? Los criterios de selección de un fitosanitario deberían también incluir sus posibles consecuencias ambientales en la toma de decisiones.

En síntesis, la complejidad del campo no niega el impacto de los herbicidas, sino que nos obliga a desarrollar herramientas de evaluación más sofisticadas y a adoptar un principio de precaución en su manejo.

6– Conclusión

Los resultados de los estudios conducidos demuestran que el uso de secuencias de herbicidas, en dosis y momentos que replican las prácticas agrícolas actuales en Uruguay, genera desequilibrios medibles en las funcionalidades del suelo. Desde una perspectiva productiva, la biomasa y el rendimiento del cultivo no mostraron efectos inmediatos en las condiciones de este estudio, lo que constituye un desafío adicional al comunicar la importancia de esta problemática al sector. No obstante, se observaron impactos negativos, generalmente transitorios pero ecológicamente relevantes, sobre procesos vitales como las simbiosis microbianas, el ciclo del nitrógeno y la descomposición de la materia orgánica. Estos hallazgos reafirman que la salud biológica del suelo presenta vulnerabilidad a la intensificación química. Por lo tanto, se hace un llamado a la comunidad agrícola, científica y regulatoria para integrar activamente todas las estrategias disponibles de producción que contemplen la protección de la biodiversidad y las funciones del suelo como un pilar indispensable para garantizar la sostenibilidad y resiliencia de la agricultura.

Bibliografía

García Carriquiry, I.; Silva, V.; Raevel, F.; Harkes, P.; Osman, R.; Bentancur, O.; ... & Geissen, V. (2024). *Effects of mixtures of herbicides on nutrient cycling and plant support considering current agriculture practices*. Chemosphere, 349, 140925.

García Carriquiry, I.; Silva, V.; Inchausti, P.; Trasante, T.; Niell, S.; Azziz, G.; ... & Geissen, V. (2025a). *Field assessment of sequential herbicide mixtures on nitrogen cycle-related functions in soybean production*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 379, 109339.

García Carriquiry, I.; Silva, V.; Inchausti, P.; Niell, S.; BerroA.; ... & Geissen, V. (2025b). *The effects of sequential herbicide applications on phosphorus cycling and mycorrhization in soybean: A two-year field study*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 392, 109754.

Knuth, D.; Gai, L.; Silva, V.; Harkes, P.; Hofman, J.; Sudoma, M.; ... & Geissen, V. (2024). *Pesticide residues in organic and conventional agricultural soils across Europe: measured and predicted concentrations*. Environmental science & technology, 58(15), 6744-6752.

Wan, N. F.; Fu, L.; Dainese, M.; Kiær, L. P.; Hu, Y. Q.; Xin, F.; ... & Scherber, C. (2025). *Pesticides have negative effects on non-target organisms*. Nature communications, 16(1), 1360.



Evaluación de descomposición de rastrojo.