

## MOVILIDAD DE HERBICIDAS EN SUELOS AGRÍCOLAS BAJO PRÁCTICAS DE LABOREO DEL SUELO TRADICIONALES Y DE CONSERVACIÓN

M.J. Carpio, M. Douibi, M.S. Rodríguez-Cruz, M.J. Sánchez-Martín y J.M. Marín-Benito\*

Procesos de Degradación del Medioambiente y su Recuperación, Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca (IRNASA-CSIC), C/Cordel de Merinas 40-52, 37008 Salamanca, España. E-mail: [jesusm.marin@irnasa.csic.es](mailto:jesusm.marin@irnasa.csic.es), web: <http://www.irnasa.csic.es>

**RESUMEN.** La interceptación parcial o total de herbicidas por residuos de cultivo de cobertura (acolchado en prácticas de laboreo de conservación puede modificar su destino medioambiental. En este trabajo se ha llevado a cabo un ensayo de campo en parcelas experimentales para estudiar la movilidad (0-50 cm) de los herbicidas S-metolachlor, tiencarbazona-metil y foramsulfuron en un suelo agrícola con dos contenidos en carbono orgánico (CO) superficial diferentes (S1 y S2) implementados con un sistema monocultivo de maíz bajo laboreo tradicional (LT) y de no laboreo (NL). La tiencarbazona-metil fue el herbicida que presentó mayor movilidad. La movilidad de los tres herbicidas fue mayor en el suelo S1, con menor contenido en CO, que en el S2 independientemente del tipo de laboreo del suelo. En general, la interceptación parcial de los herbicidas por el acolchado en los tratamientos NL retrasó y/o disminuyó su movilidad respecto a la observada en los suelos bajo LT. El inicio del riego una semana después de la aplicación de los herbicidas fue el factor principal que condicionó su movilidad a lo largo del perfil de todos los suelos.

**ABSTRACT.** The partial or total interception of herbicides by mulch crop residues in conservation tillage practices can modify their environmental fate. In this work, a field trial has been carried out in experimental plots to study the mobility (0-50 cm) of the herbicides S-metolachlor, thien carbazon-methyl and foramsulfuron in an agricultural soil with two different surface organic carbon (CO) contents (S1 and S2) implemented with a maize monoculture system under traditional tillage (LT) and no tillage (NL). Thien carbazon-methyl was the herbicide with the highest mobility. The mobility of the three herbicides was higher in S1, with lower CO content, than in S2 regardless of the type of soil tillage. In general, the partial interception of herbicides by the mulch in the NL treatments delayed and / or decreased their mobility with respect to that observed in the soils under LT. The start of irrigation one week after the application of the herbicides controlled their mobility along the profile of all soils.

### 1.- Introducción

Las prácticas de laboreo de conservación se caracterizan principalmente por la implantación de cultivos de cobertura durante el período de barbecho seguido por el no laboreo del suelo con acumulación de residuos de cultivos de cosecha en la superficie del suelo y la siembra directa sobre

estos restos vegetales. Estos restos vegetales conforman el conocido mantillo o acolchado que debe ocupar como mínimo un 30% de la superficie del suelo para protegerlo de un modo efectivo frente a la erosión (FAO, 2016; Gil Ribes et al., 2017). La acumulación de residuos de cultivos en la superficie del suelo permite interceptar el agua de lluvia, reducir la escorrentía y la erosión superficial del suelo. Además, contribuye a aumentar el contenido en materia orgánica superficial del suelo, a regular la temperatura de esta capa del suelo reduciendo la evaporación e incrementando su contenido en agua, así como a controlar las malas hierbas. Todo esto influye positivamente en la fertilidad del suelo y en la productividad de los cultivos (Gabriel et al., 2019; Gil Ribes et al., 2017). Por otro lado, el uso de cultivos de cobertura permite reducir la lixiviación de nitratos y aumentar el secuestro de carbono (Alonso-Ayuso et al., 2020; García-González et al., 2018). Por lo tanto, los numerosos beneficios medioambientales, económicos y sociales hacen que estos sistemas de cultivo sean alternativas a tener muy en cuenta frente a los sistemas tradicionales (Gil Ribes et al., 2017; Thierfelder et al., 2013; Trail et al., 2016). Sin embargo, el no laboreo del suelo hace frecuente la aplicación de herbicidas para el control de las malas hierbas en los sistemas de laboreo de conservación que pueden ser parcial o totalmente interceptados por el acolchado. En estos sistemas agrícolas, el comportamiento de los herbicidas que alcanzan el suelo puede verse directa o indirectamente modificado como resultado de los fuertes cambios inducidos por esta práctica agrícola en las propiedades fisicoquímicas e hidráulicas del suelo, la temperatura y humedad del suelo, la abundancia de fauna y población microbiana, la actividad biológica, etc. (Abdollahi y Munkholm, 2014; Alletto et al., 2010, 2013; Sampaio de Almeida et al., 2018; Gil Ribes et al., 2017; Soto-Gómez et al., 2019). En general, los sistemas de laboreo de conservación mejoran la conectividad de los macroporos. Esto aumenta la lixiviación de los herbicidas que alcanzan la superficie del suelo siendo éste el principal inconveniente directo de estas prácticas de agricultura de conservación (Alletto et al., 2010; Soto-Gómez et al., 2019). Por otro lado, el acolchado es un material lignocelulósico y puede modificar la lixiviación de herbicidas en los suelos por adsorción-desorción y degradación de estos compuestos interceptados parcial o totalmente por la capa de acolchado antes de alcanzar la superficie del suelo (Aslam et al., 2013; Cassigneul et al., 2018). Desde el punto de vista del riesgo medioambiental, la bibliografía recoge efectos positivos, negativos o

neutros de las prácticas de laboreo de conservación en el destino de los pesticidas en el suelo (Alletto et al., 2010, 2012, 2013; Aslam et al., 2015; Cueff et al., 2021; Okada et al., 2016; Soracco et al., 2018). De tal modo que el conocimiento de la movilidad vertical de los herbicidas en el suelo aplicados bajo estas prácticas agrícolas de conservación del suelo es particularmente importante y necesita ser cuidadosamente estudiado para evaluar y minimizar su potencial riesgo medioambiental en la calidad del suelo y el agua. En este sentido, la mayoría de los estudios de movilidad de pesticidas incluyendo cultivos de cobertura y acolchado han sido realizados a escala de laboratorio (Aslam et al., 2015; Cueff et al., 2020; Porfiri et al., 2015; Okada et al., 2016;) mientras que a escala de campo los estudios han sido escasos y simplemente han evaluado el impacto del laboreo o no laboreo del suelo en este proceso (Soracco et al., 2018, Villarreal et al., 2020).

Por tanto, el objetivo de este trabajo fue estudiar la distribución de los herbicidas S-metolacoloro, tiencarbazona-metil y foramsulfuron a lo largo del perfil de un suelo agrícola (0-50 cm) bajo prácticas de laboreo del suelo tradicionales (LT laboreo, suelo desnudo y monocultivo de maíz) y de conservación (NL, no laboreo, cultivo de cobertura, acolchado y monocultivo de maíz) durante un ciclo de maíz.

## 2.- Materiales y métodos

### 2.1. Suelo

Para realizar el experimento de campo, se seleccionó un suelo franco arenoso (14,9% arcilla, 4,7% limo y 80,4% arena) dedicado habitualmente al cultivo de cereal. El perfil de suelo de 50 cm de profundidad dividido en 4 horizontes (0-10, 10-20, 20-30 y 30-50 cm) correspondiente a un único suelo agrícola, pero con distinto contenido en carbono orgánico (CO) en el horizonte 0-30 cm (S1 y S2) fue fisicoquímica e hidráulicamente caracterizado. Las principales características de los suelos correspondientes a los 30 cm superficiales al inicio del experimento se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Características de los suelos S1 y S2 (0-30 cm) a tiempo 0 días.

Suelo/ Profundidad (cm)	Densidad suelo (g cm <sup>-3</sup> )	pH	CO (%)	N (%)	C/N	$\theta_{cc}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
S1						
0-10	1,50	6,81	0,69	0,09	7,93	0,219
10-20	1,50	6,77	0,69	0,08	8,27	0,228
20-30	1,49	6,82	0,73	0,09	8,21	0,229
S2						
0-10	1,44	7,67	1,01	0,12	8,72	0,252
10-20	1,40	7,83	1,24	0,14	9,11	0,247
20-30	1,40	7,67	1,26	0,14	8,97	0,248

La caracterización fisicoquímica se realizó por los métodos habituales de análisis de suelos (Carpio et al. 2020; Sparks 1996). El contenido en agua del suelo a capacidad de

campo ( $\theta_{cc}$ ,  $pF=2$ ) para cada horizonte del suelo fue estimada a partir de la textura y densidad del suelo utilizando el código RETC (RETention Curve (van Genuchten et al. 1991).

### 2.2. Herbicidas

Los herbicidas estudiados fueron el S-metolacoloro, tiencarbazona-metil y foramsulfuron que se aplican para controlar las gramíneas y malas hierbas de hoja ancha en maíz. El S-metolacoloro ((*aRS, lRS*)-2-cloro-6,-etil-*N*-(2-metoxi-1-metiletil) aceto-*o*-toluidida) es una cloroacetanilida con actividad herbicida de pre-emergencia selectiva con una moderada solubilidad en agua (480 mg L<sup>-1</sup>, 20°C), alta hidrofobicidad (log  $K_{ow}$ = 3,05), intermedia capacidad de lixiviación (índice GUS= 2,32), y no persistente en el suelo bajo condiciones de campo ( $DT_{50, \text{campo}}=23,2$  días). La tiencarbazona-metil (4-[(4,5-dihidro-3-metoxi-4-metil-5-oxo-1H-1,2,4-triazol-1-il) carboxamidofenil]-5-metiltiofeno-3-carboxilato de metilo) es un herbicida sistémico de pre-emergencia perteneciente a la familia de las triazolonas. Es un ácido débil ( $pK_a=3,0$ , 25°C) caracterizado por una moderada solubilidad en agua (436 mg L<sup>-1</sup>, 20°C), una baja hidrofobicidad (log  $K_{ow}$ = -1.98), intermedia capacidad de lixiviación (índice GUS= 2.46) y no persistente en el suelo ( $DT_{50, \text{campo}}=17$  días). El foramsulfuron (1(4,6-dimetoxipirimidin-2-il)-3-(2-dimetilcarbamoil-5-formamidofenil sulfonil) urea) es una sulfonilurea con actividad herbicida sistémica de post-emergencia. Este ácido débil ( $pK_a=4,6$ , 25°C) presenta una alta solubilidad en agua (3293 mg L<sup>-1</sup>, 20°C), una baja hidrofobicidad (log  $K_{ow}$ = -0,78) y alto potencial de lixiviación (índice GUS= 2,95), y es considerado como no persistente en el suelo (PPDB, 2021).

Los tres herbicidas fueron utilizados bajo las formulaciones comerciales Efica 960EC® (S-metolacoloro 96% p/v ADAMA Agriculture España, S.A., Madrid) y Monsoon Active® (tiencarbazona-metil 1% p/v y foramsulfuron 3,15% p/v, Bayer CropScience S.L., Valencia). Los patrones analíticos de los herbicidas (>98,5% pureza) fueron suministrados por Sigma Aldrich Química S.A. (Madrid).

### 2.3. Experimento de campo

El estudio de campo se llevó a cabo en parcelas experimentales de 81 m<sup>2</sup> ubicadas en la finca experimental Muñovela del IRNASA-CSIC (Salamanca, España). El diseño consistió en un total de 8 parcelas experimentales distribuidas al azar entre 4 tratamientos, resultantes de la combinación de 2 sistemas de laboreo y 2 suelos diferentes, y cada una de ellas con dos repeticiones. Los sistemas de laboreo corresponden a un laboreo tradicional con cultivador (25-28 cm) (S1+LT y S2+LT) y al no laboreo del suelo (S1+NL y S2+NL) en un sistema de monocultivo de maíz. El suelo se mantiene desnudo después de la cosecha del maíz en las parcelas S1+LT y S2+LT mientras que se utiliza trigo de invierno como cultivo de cobertura en las parcelas S1+NL y S2+NL durante el período de barbecho. El trigo se siembra

mediante siembra directa sobre los restos vegetales de la cosecha del maíz, se destruye mediante glifosato, se corta y deposita sobre la superficie del suelo cubriendo el 65-75% de ésta antes de la siembra directa del nuevo ciclo de maíz. Las parcelas fueron equipadas antes de la siembra del cultivo de cobertura (octubre 2019) con un tubo de PVC de 120 cm (largo) × 5.2 cm (diámetro interno) para medir periódicamente el contenido volumétrico en agua del suelo en el perfil de suelo y evaluar su evolución temporal cada 20 cm desde 20 hasta 100 cm de profundidad usando una sonda eléctrica Troxler Sentry 200-AP (Troxler International Ltd., NC, USA). Los herbicidas se aplicaron con un tractor en pre-emergencia del maíz en junio de 2020 a las dosis de 0.621 (S-metolacloro), 0.147 (tiencarbazona-metil) y 0.463 (foramsulfuron) kg i.a. ha<sup>-1</sup>. La aplicación se realizó sobre el suelo desnudo en los tratamientos S1+LT y S2+LT, mientras que los herbicidas fueron interceptados parcialmente por el acolchado de trigo en los tratamientos S1+NL y S2+NL. Todas las parcelas experimentales se regaron semanalmente (~26 mm/semana) por aspersión entre junio y septiembre de 2020 (333 mm de irrigación total). El primer riego se realizó 7 días después de la aplicación de los herbicidas (d.d.a.). Los datos meteorológicos (temperatura, humedad, velocidad del viento y precipitación) se registraron diariamente a lo largo del experimento en una estación meteorológica automática de la AEMET ubicada en el lugar del experimento. Las temperaturas variaron entre -3,4°C y 37,4°C (16,6°C temperatura media) durante el ciclo de cultivo del maíz (siembra en junio 2020, y cosecha en diciembre 2020) y la precipitación acumulada correspondiente a este período fue de 128,6 mm.

#### 2.4. Extracción y análisis de herbicidas

Cinco perfiles de suelo (0-50 cm) fueron muestreados a 1, 13, 27, 41, 62, 76 y 139 d.d.a. en cada una de las parcelas experimentales. Cada uno de ellos fue dividido en 5 segmentos de 10 cm cada uno. Las cinco sub-muestras de suelo contenidas en cada segmento correspondiente a la misma profundidad fueron homogéneamente mezcladas, tamizadas (<2 mm) y determinada su humedad. Se tomaron 2 muestras de suelo húmedo (40 g) de cada segmento de suelo y parcela, se sonicaron (1 h, 20°C) y se agitaron intermitentemente (24 h, 20°C) con 80 mL de metanol: agua ultrapura Milli-Q (Millipore) 50:50. A continuación se centrifugaron a 10000 rpm (30 min) y se filtraron con filtros Minisart NY 25 (<0.45 µm, Sartorius Stedim Biotech, Alemania). Posteriormente, se concentraron los herbicidas contenidos en el extracto mediante extracción en fase sólida. Para ello se mezclaron 50 mL de extracto con 445 mL agua ultrapura Milli-Q (Millipore) y 5 mL de ácido fórmico. La mezcla se hizo pasar a través de cartuchos poliméricos Bond Elut Plexa (60 mg, Agilent) mediante una bomba peristáltica Gilson MINIPULS 3 (Gilson, Inc., Middleton, WI, USA) a un flujo constante de 1 mL min<sup>-1</sup>. Los herbicidas retenidos en los cartuchos se eluyeron con 5 mL de metanol que se evaporó hasta sequedad bajo corriente de nitrógeno usando un evaporador EVA-EC2-L (VLM GmbH, Bielefeld, Alemania). Finalmente, el residuo se redisolvió en 0,75 mL de metanol. En los extractos de suelo,

los herbicidas se cuantificaron mediante cromatografía líquida de alta eficacia acoplado a detector de masas (HPLC- MS) (Waters Assoc., Milford, USA). La columna de separación utilizada fue una Phenomenex Luna PFP2 de 150 mm × 4.6 mm d.i., y 3µm de tamaño de partícula. La fase móvil empleada para la separación y cuantificación óptima de los tres herbicidas fue metanol: agua ultrapura Milli-Q (Millipore) + 5mM de formiato amónico (80:20). La velocidad de flujo de la fase móvil fue 0.4 mL min<sup>-1</sup>, el voltaje de cono fueron 20V para los tres herbicidas y el volumen de inyección 20 µL. La determinación de los herbicidas se realizó por monitorización del ion molecular positivo [m/z] [M]<sup>+</sup> 284,79 (S-metolacloro), 391.39 (tiencarbazona-metil), y 453,44 (foramsulfuron). Bajo estas condiciones de medida, los tiempos de retención de foramsulfuron, tiencarbazona-metil y S-metolacloro fueron 3,8, 5,6 y 11,3 min, respectivamente.

### 3.- Resultados y discusión

La evolución temporal de la humedad del suelo mostró la capacidad del acolchado para incrementar, o al menos mantener, la humedad superficial del suelo aunque este efecto sólo se observó en el S2 al comparar el S2+LT con el S2+NL (datos no mostrados).

La distribución del S-metolacloro, tiencarbazona-metil y foramsulfuron a través del perfil de los suelos S1 y S2 en las parcelas bajo laboreo tradicional y de conservación a tres tiempos seleccionados como representativos del comportamiento de movilidad observado (1, 13 y 27 días después de la aplicación (d.d.a.)) se muestra en la Fig. 1. Los perfiles de concentración mostraron el siguiente orden de movilidad para los 3 herbicidas: S1+LT > S1+NL > S2+LT > S2+NL. La interceptación parcial de los herbicidas por el acolchado durante su aplicación redujo el porcentaje de cada uno de los compuestos que alcanzó inicialmente la superficie del suelo hasta el 25.3% - 32.4% en el S1+NL y hasta el 49.6% - 74.1% en el S2+NL. Esto hizo que la movilidad de los herbicidas a lo largo del perfil de los suelos bajo laboreo de conservación se retrasase con respecto a la de los respectivos suelos con laboreo tradicional. La irrigación aplicada antes de los 13 d.d.a. (52 mm) lavó los herbicidas retenidos por el acolchado hacia el suelo incrementando a este tiempo de muestreo el balance total de cada uno de los herbicidas en el perfil de suelo hasta el 50.2% - 100% en el S1+NL y hasta el 48.3% - 100% en el S2+NL. La tiencarbazona-metil fue el único de los 3 herbicidas que se lavó totalmente del acolchado al suelo alcanzando un balance total del 100% a este tiempo de muestreo en ambos suelos.

El herbicida más hidrofóbico, S-metolacloro, fue determinado 13 d.d.a. en todo el perfil del S1+LT (3.9% de la dosis aplicada se movilizó hasta 40-50 cm) mientras que en el S1+NL no alcanzó esta profundidad hasta 139 d.d.a. (0.9%). Sin embargo, sólo se movilizó hasta 40 cm en el S2+LT (27 d.d.a., 0.6%) viéndose reducida dicha profundidad hasta los 20 cm en el S2+NL (máximo a 13 d.d.a., 8.8%) durante todo el experimento.

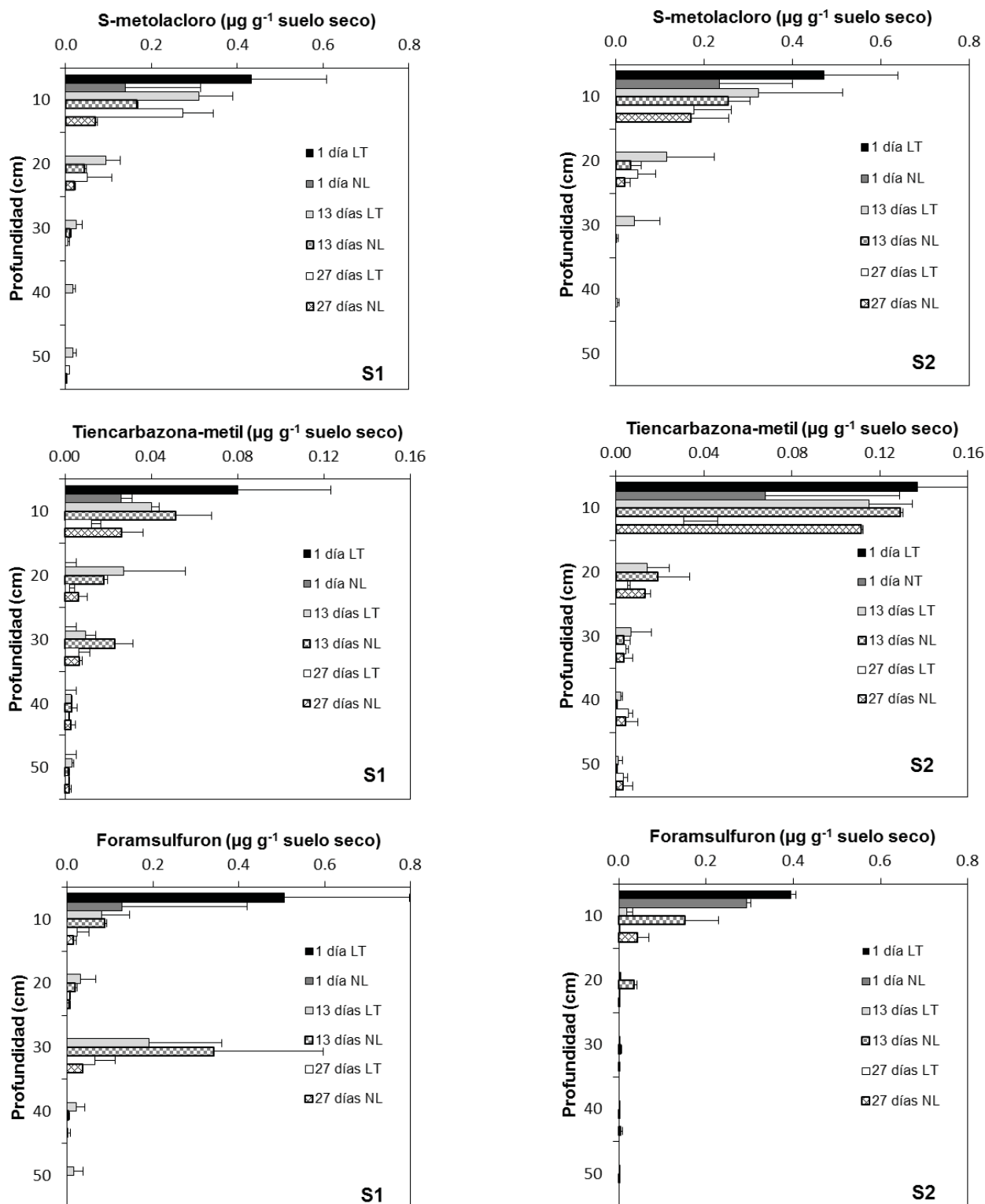


Fig. 1. Distribución en el perfil de los suelos S1 y S2 del S-metolachloro, tiencarbazona-metil y foramsulfuron en parcelas bajo laboreo tradicional (LT) y no laboreo (NL) a 1, 13 y 27 días después de la aplicación. Las barras de error representan la desviación estándar del valor medio (n=4).

La tiencarbazona-metil fue determinada en todo el perfil de suelo de todos los tratamientos entre 13 y 139 d.d.a. Mientras que la máxima profundidad a la que se determinó la presencia de foramsulfuron fue de 30 cm en el S2+LT (13 d.d.a., 0,4%), 40 cm en el S1+NL (máximo a 13 d.d.a., 0,9%) y S2+NL (máximo a 27 d.d.a., 0,9%), y 50 cm en el S1+LT (13 d.d.a., 3,1%). La rápida movilidad de los 3 herbicidas a lo largo del perfil del suelo, especialmente en el S1+LT, podría ser resultado del inicio del riego tan sólo 7 d.d.a. La movilidad de otros herbicidas altamente hidrofóbicos también se vio favorecida por el efecto de la lluvia registrada poco después de su aplicación en el suelo (Carpio et al., 2020; Willkommen et al., 2019).

Los porcentajes acumulados de cada uno de los herbicidas que alcanzaron la profundidad de 40-50 cm durante los diferentes tiempos de muestreo en los cuatro tratamientos ensayados se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Porcentaje acumulado de los herbicidas lixiviados hasta 40-50 cm del perfil de suelo durante los diferentes tiempos de muestreo a lo largo de los 139 días en los tratamientos de laboreo tradicional (S1+LT y S2+LT) y de no laboreo del suelo (S1+NL y S2+NL).

Herbicida/Tratamiento	S1+LT	S1+NL	S2+LT	S2+NL
S-metolacloro	6,4	0,9	0	0
Tiencarbazona-metil	9,4	11,3	4,3	5,4
Foramsulfuron	3,1	0	0	0

La movilidad de los 3 herbicidas fue siempre mayor en el S1 que en el S2 independientemente del tipo de laboreo del suelo. El mayor contenido en CO superficial del S2 en comparación con el S1 contribuyó a una mayor adsorción de los herbicidas determinada en el laboratorio (técnica batch en equilibrio), especialmente para el herbicida altamente hidrofóbico, S-metolacloro, en el S2 ( $K_d=2,0 \text{ mL g}^{-1}$ ) que en el S1 ( $K_d=1,3 \text{ mL g}^{-1}$ ) que podría explicar su menor movilidad a lo largo del perfil del S2 (Alletto et al., 2013). Este efecto fue menos acusado para la tiencarbazona-metil que con una solubilidad en agua similar a la del S-metolacloro se movilizó mucho más que este herbicida debido a su baja hidrofobicidad que hizo que presentase una ligera adsorción en el S2 ( $K_d=0,4 \text{ mL g}^{-1}$ ) y no adsorción en el S1 ( $K_d=0 \text{ mL g}^{-1}$ ). Respecto al foramsulfuron lixiviado hasta 50 cm de profundidad, los bajos porcentajes de este herbicida acumulados a esta profundidad en todos los tratamientos no están teóricamente de acuerdo con su elevada solubilidad en agua y baja adsorción determinada en ambos suelos ( $K_d=0$  y  $0,1 \text{ mL g}^{-1}$  en el S1 y S2, respectivamente) excepto si una cantidad importante de foramsulfuron fue movilizado a capas de suelo por debajo de 50 cm de profundidad entre los distintos tiempos de muestreo o fue rápidamente degradado antes de alcanzar esta profundidad. La detección de trazas del metabolito 2-amino-4,6-dimetoxipirimidina del foramsulfuron en muestras del perfil de suelo bajo los diferentes tratamientos ensayados a distintos tiempos de muestreo (datos no mostrados) apoya esta hipótesis. La baja adsorción de este herbicida en el suelo podría

predisponerlo para ser rápidamente biodegradado en el suelo como ha sido indicado en la bibliografía (EFSA, 2016; PPDB, 2021; Terralia, 2021). Por otra parte, teniendo en cuenta que el balance total de herbicida en todo el perfil de suelo de los tratamientos S1+NL y S2+NL 13 d.d.a. fue del 90,2% y 48,3% respectivamente, la degradación fotoquímica del foramsulfuron sobre el acolchado previo a su lavado con el riego hacia el suelo sería una ruta de disipación potencial, aunque no se han encontrado estudios que abordasen y corroborasen este proceso más allá de la existente fotodegradación del herbicida en agua (EFSA, 2016). Análogamente, el bajo balance total de S-metolacloro en todo el perfil de suelo de los tratamientos S1+NL (50,2%) y S2+NL (60,7%) 13 d.d.a. pone de manifiesto la existencia de otras posibles rutas de disipación de este herbicida diferentes a la movilidad por debajo de 50 cm del suelo. La disipación del S-metolacloro vía degradación microbiana en el suelo y/o acolchado fue corroborada por la presencia de trazas de los metabolitos metolacloro ácido etanosulfónico y metolacloro ácido oxanílico en muestras del perfil de suelo bajo los diferentes tratamientos ensayados a distintos tiempos de muestreo (datos no mostrados). Estos metabolitos han sido frecuentemente detectados tanto en suelo como en restos de cultivos de cobertura (Cassigneul et al., 2018; Marín-Benito et al., 2021; Schuhmann et al., 2019). La degradación fotoquímica de este herbicida también ha sido citada en la bibliografía como una potencial y rápida vía de disipación desde el suelo ( $DT_{50}=22$  días en verano, Terralia, 2021) y desde el cultivo (acolchado en nuestro caso) ( $DT_{50}=11,6$  días; PPDB, 2021).

Las cantidades remanentes de los 3 herbicidas a lo largo del perfil de suelo en cada uno de los tratamientos ensayados fueron inferiores al 8% al final del experimento (139 d.d.a.), no siendo posible diferenciar qué porcentaje de pérdida de los 3 herbicidas tuvo lugar vía degradación o vía lixiviación (entre otras).

#### 4.- Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que el contenido en CO del suelo y las características del herbicida tuvieron una mayor influencia en la movilidad de los compuestos que el tipo de laboreo. Además, el inicio del riego 7 d.d.a. de los herbicidas controló fuertemente su movilidad.

Hay que destacar que el experimento realizado muestra los resultados de un único año con el suelo bajo prácticas de laboreo de conservación siendo posiblemente un periodo limitado para observar el impacto que este tipo de prácticas agrícolas presentan en las propiedades del suelo a largo plazo y consecuentemente sobre su influencia en la movilidad de los herbicidas. En este sentido, un segundo año de estudio se encuentra actualmente en progreso. Además, los estudios complementarios de adsorción-desorción de los herbicidas sobre el acolchado, de degradación sobre los suelos y el acolchado, y de evolución de las comunidades microbianas del suelo bajo

los diferentes tratamientos, que se encuentran en curso, ayudarán a entender y explicar mejor este comportamiento de movilidad de los herbicidas.

*Agradecimientos.* Este trabajo fue financiado por MCIU/AEI/FEDER, UE (Proyecto RTI2018-101587-J-I00) y el proyecto “CLU-2019-05 – Unidad de Excelencia IRNASA-CSIC”, financiado por la Junta de Castilla y León y cofinanciado por la Unión Europea (FEDER “Europa impulsa nuestro crecimiento”). María José Carpio agradece a la Junta de Castilla y León por su contrato predoctoral cofinanciado por el Fondo Social Europeo. Marwa Douibi agradece al Ministerio de Educación Superior del Gobierno de Argelia por su beca predoctoral.

## 5.- Bibliografía

- Abdollahi, L., y L.J. Munkholm, 2014. Tillage system and cover crop effects on soil quality: I. Chemical, mechanical, and biological properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78, 262–270.
- Alletto, L., P. Benoit, B. Bolognesi, M. Couffignal, V. Bergheaud, V. Dumény, C. Longueval, y E. Barriuso, 2013. Sorption and mineralisation of S-metolachlor in soils from fields cultivated with different conservation tillage systems. *Soil Till. Res.* 128, 97–103.
- Alletto, L., P. Benoit, B. Bolognesi, M. Couffignal, V. Bergheaud, V. Dumény, C. Longueval, y E. Barriuso, 2013. Sorption and mineralisation of S-metolachlor in soils from fields cultivated with different conservation tillage systems. *Soil Till. Res.* 128, 97–103.
- Alletto, L., P. Benoit, E. Justes, y Y. Coquet, 2012. Tillage and fallow period management effects on the fate of the herbicide isoxaflutole in an irrigated continuous-maize field. *Agric. Ecosyst. Environ.* 153, 40–49.
- Alletto, L., Y. Coquet, P. Benoit, D. Heddadj, y E. Barriuso, 2010. Tillage management effects on pesticide fate in soils. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 367–400.
- Alonso-Ayuso, M., J.L. Gabriel, J.L. Pancorbo, y M. Quemada, 2020. Intersowing cover crops into maize: Characterization of species performance under Mediterranean conditions. *Field Crops Res.* 249, 107762.
- Aslam, S., A. Iqbal, M. Deschamps, S. Recous, P. Garnier, y P. Benoit, 2015. Effect of rainfall regimes and mulch decomposition on the dissipation and leaching of S-metolachlor and glyphosate: a soil column experiment. *Pest. Manage. Sci.* 71, 278–291.
- Aslam, S., P. Garnier, C. Rumpel, S.E. Parent, y P. Benoit, 2013. Adsorption and desorption behavior of selected pesticides as influenced by decomposition of maize mulch. *Chemosphere* 91, 1447–1455.
- Carpio, M.J., M.S. Rodríguez-Cruz, C. García-Delgado, M.J. Sánchez-Martín, y J.M. Marín-Benito, 2020. Mobility monitoring of two herbicides in amended soils: A field study for modeling Applications. *J. Environ. Manage.* 260, 110161.
- Cassigneul, A., P. Benoit, C. Nobile, V. Bergheaud, V. Dumény, V. Etiévant, A. Maylin, E. Justes, y L. Alletto, 2018. Behaviour of S-metolachlor and its oxanilic and ethanesulfonic acids metabolites under fresh vs. partially decomposed cover crop mulches: A laboratory study. *Sci. Total Environ.* 631–632, 1515–1524.
- Cassigneul, A., P. Benoit, C. Nobile, V. Bergheaud, V. Dumény, V. Etiévant, A. Maylin, E. Justes, y L. Alletto, 2018. Behaviour of S-metolachlor and its oxanilic and ethanesulfonic acids metabolites under fresh vs. partially decomposed cover crop mulches: a laboratory study. *Sci. Total Environ.* 631–632, 1515–1524.
- Cueff, S., L. Alletto, M. Bourdat-Deschamps, P. Benoit, y V. Pot, 2020. Water and pesticide transfers in undisturbed soil columns sampled from a Stagnic Luvisol and a Vermic Umbrisol both cultivated under conventional and conservation agriculture. *Geoderma* 377, 114590.
- Cueff, S., L. Alletto, V. Dumény, P. Benoit, y V. Pot, 2021. Adsorption and degradation of the herbicide nicosulfuron in a stagnic Luvisol and Vermic Umbrisol cultivated under conventional or conservation agriculture. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 15934–15946.
- EFSA (European Food Safety Authority), 2016. Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance foramsulfuron. *EFSA J.* 14, 4421 (119 pp).
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2016. Conservation Agriculture, en: *Save and grow in practice: maize, rice and wheat. A guide to sustainable cereal production.* Roma (Italia). ISBN 978-92-5-108519-6 (124 pp).
- Gabriel, J.L., M. Quemada, D. Martín-Lammerding, y M. Vanclouster, 2019. Assessing the cover crop effect on soil hydraulic properties by inverse modelling in a 10-year field trial. *Agric. Water Manage.* 222, 62–71.
- García-González, I., C. Hontoria, J.L. Gabriel, M. Alonso-Ayuso, y M. Quemada, 2018. Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land. *Geoderma* 322, 81–88.
- Gil Ribes, J.A., R. Ordóñez Fernández, E.J. González Sánchez, O. Veroz González, M. Gómez Ariza, y F. Sánchez Ruiz, 2017. Ed. Asociación Española Agricultura de Conservación Suelos Vivos (AEACSV). IFAPA Centro “Alameda del Obispo”. Edificio de Olivicultura. Avda. Menéndez Pidal, s/n. E-14004 Córdoba (España). ISBN: 978-84-617-9450-8. (136 pp.).
- Marín-Benito, J.M., E. Herrero-Hernández, J.M. Ordax, M.J. Sánchez-Martín, y M.S. Rodríguez-Cruz, 2021. The role of two organic amendments to modify the environmental fate of S-metolachlor in agricultural soils. *Environ. Res.* 195, 110871.
- Okada, E., J.L. Costa, y F. Bedmar, 2016. Adsorption and mobility of glyphosate in different soils under no-till and conventional tillage. *Geoderma* 263, 78–85.
- Porfiri, C., J.C. Montoya, W.C. Koskinen, y M.P. Azcarate, 2015. Adsorption and transport of imazapyr through intact soil columns taken from two soils under two tillage systems. *Geoderma* 251–252, 1–9.
- PPDB, 2021. *Pesticide Properties Data Base.* University of Hertfordshire. <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm>. [consulta: 10 junio 2021].
- Sampaio de Almeida, W., E. Panachuki, P.T. Sanches de Oliveira, R. da Silva Menezes, T. Alves Sobrinho, y D. Fonseca de Carvalho, 2018. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. *Soil Till. Res.* 175, 130–138.
- Schuhmann, A., G. Klammler, S. Weiss, O. Gans, J. Fank, G. Haberhauer, y M.H. Gerzabek, 2019. Degradation and leaching of bentazone, terbutylazine and S-metolachlor and some of their metabolites: A long-term lysimeter experiment. *Plant Soil Environ.* 65, 273–281.
- Soracco, C.G., R. Villarreal, L.A. Lozano, S. Vittori, E.M. Melani, y D.J.G. Marino, 2018. Glyphosate dynamics in a soil under conventional and no-till systems during a soybean growing season. *Geoderma* 323, 13–21.
- Soto-Gómez, D., P. Pérez-Rodríguez, L. Vázquez Juiz, J.E. López-Periago, y M. Paradelo, 2019. A new method to trace colloid transport pathways in macroporous soils using X-ray computed tomography and fluorescence macrophotography. *Eur. J. Soil Sci.* 70, 431–442.
- Sparks, D.L., 1996. *Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods.* Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI.
- Terralia, 2021. *Vademécum de productos fitosanitarios y nutricionales* (online). Ediciones Agrotécnicas S.L., Madrid. [https://www.terralia.com/vademecum\\_de\\_productos\\_fitosanitarios\\_y\\_nutricionales/view\\_composition?composition\\_id=885](https://www.terralia.com/vademecum_de_productos_fitosanitarios_y_nutricionales/view_composition?composition_id=885). [consulta: 12 junio 2021].
- Thierfelder, C., M. Mwila, y L. Rusinamhodzi, 2013. Conservation agriculture in eastern and southern provinces of Zambia: long-term effects on soil quality and maize productivity. *Soil Till. Res.* 126, 246–258.
- Trail, P., O. Abaye, W.E. Thomason, T.L. Thompson, F. Gueye, I. Diedhiou, M.B. Diatta, y A. Faye, 2016. Evaluating intercropping (living cover) and mulching (desiccated cover) practices for increasing millet yields in Senegal. *Agron. J.* 108, 1742–1752.
- van Genuchten, M.T., F. Leij, y S.R. Yates, 1991. The RETC code for quantifying hydraulic functions of unsaturated soils. Technical Report IAG-DW 12933934, US Salinity Laboratory, US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Riverside, CA.
- Villarreal, R., L.A. Lozano, N.G. Policha, M.P. Salazara, G.L. Bellora, M.J. Turinetti, y C.G. Soracco, 2020. Influence of soil water holding and transport capacity on glyphosate dynamics in two agricultural soils from Pampas Region. *Geoderma* 376, 114566.
- Willkommen, S., M. Pfannerstill, U. Ulrich, B. Guse, y N. Fohrer, 2019. How weather conditions and physico-chemical properties control the leaching of flufenacet, diflufenican, and pendimethalin in a tile-drained landscape. *Agric. Ecosyst. Environ.* 278, 107–116.