

ESTUDIO PRELIMINAR SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL HERBICIDA GLIFOSATO EN DOS SUELOS DE EXTREMADURA

M.J. Calderón¹, M.A. Quintana¹, A. Lopez-Piñeiro², M.C. Hermosín¹ y J. Cornejo¹

¹Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla. CSIC. Av. Reina Mercedes, 10. 41012. Sevilla; mjcalderon@irnase.csic.es

²Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Ciencias. UNEX. Badajoz 06071; pineiro@unex.es

RESUMEN. El objetivo de este estudio ha sido comparar los resultados obtenidos tanto a nivel de laboratorio como a nivel de campo, y discutir los diferentes factores que pueden influir en el comportamiento de glifosato en suelo. Para ello se ha realizado un estudio de adsorción-desorción en dos suelos de Extremadura, P4, dedicado a laboreo convencional y P11, dedicado a siembra directa con cobertura de 8 años. Asimismo, se ha realizado un experimento de movilidad de glifosato en columnas empaquetadas a mano en dichos suelos. Por otro lado, se ha realizado un estudio de persistencia de glifosato a nivel de campo durante los años 2003 y 2004 en los suelos P11, suelo P4 dedicado a siembra directa (P4SD) y suelo P4 dedicado a siembra directa con cobertura de 1 año (P4SDC). En el estudio de adsorción en los suelos P4 y P11 se han observado unos valores de Kf bastante elevados (100 y 98 para P4 y P11, respectivamente) no existiendo grandes diferencias entre ambos. Además esta adsorción es prácticamente irreversible con valores de $n_f \ll n_d$ en ambos suelos. Varios autores han demostrado el importante papel que juegan parámetros como el pH y los óxidos de hierro y aluminio en la retención de glifosato en suelo. De hecho, estos parámetros son prácticamente iguales en ambos suelos (pH: 5.35 y 5.20 en P4 y P11, respectivamente; Fe_2O_3 : 1.48 y 1.71 en P4 y P11, respectivamente). En cuanto al estudio de movilidad se ha observado que no existen diferencias en las cantidades de glifosato lixiviadas en ambos suelos, siendo estas cantidades muy bajas (4%) corroborando lo anteriormente encontrado en el estudio de adsorción. En el estudio de persistencia en campo se ha observado que durante el año 2003 sólo aparecieron residuos de glifosato durante el mes de Marzo, mientras que en el año 2004 aparecieron residuos en los meses de Abril y Mayo, en ambos casos justo después de la aplicación del herbicida. Estos resultados indican la rápida desaparición de glifosato en suelo, especialmente durante el año 2003, ya sea por procesos de adsorción muy fuerte o por procesos de degradación de glifosato a su principal metabolito, ácido aminometilfosfónico (AMPA). En cualquier caso, todos los resultados obtenidos ponen de manifiesto el bajo potencial contaminante de glifosato de aguas superficiales y subterráneas.

ABSTRACT. The objective of this work was to compare

the results obtained from laboratory and field experiments of glyphosate in soils. The laboratory studies include adsorption-desorption isotherms and leaching experiments in handpacked soil columns. Soil samples come from two soils from Extremadura: P4, devoted to conventional tillage and P11, devoted to direct seeding with winter cover. The field experiment include a persistence study during two years (2003 and 2004) in three soils, P11, P4SD (direct seeding) and P4SDC (direct seeding with cover of one year). No differences in adsorption were observed between both soils. Kf is high in these two soils (100 and 98 in P4 and P11, respectively). Moreover, this adsorption was very irreversible in P4 and P11 ($n_f \ll n_d$). Some authors have demonstrated the important role played by pH and iron and aluminum oxides in glyphosate soil retention. In fact, these parameters were the same in both soils (pH: 5.35 and 5.20 in P4 and in P11, respectively; Fe_2O_3 : 1.48 and 1.71 in P4 and in P11, respectively). Also, no differences in glyphosate leaching (4%) were observed between P4 and P11. This is in agreement with the results obtained in adsorption-desorption experiments. In the field persistence study, only in March 2003 and in April and May 2004 glyphosate residues were found. In both years, glyphosate residues found were just after herbicide application, indicating a rapid dissipation of glyphosate from soil, especially in 2003. This could be due to a strong adsorption processes and/or glyphosate degradation to its main metabolite, aminomethylphosphonic acid (AMPA). All results indicate a low risk of surface and ground water contamination by glyphosate.

1. Introducción

Glifosato es un herbicida con un amplio espectro de acción, no selectivo y usado en post emergencia, principalmente en zonas agrícolas y para el control de vegetación en zonas no cultivadas. Este herbicida se suele usar principalmente en su forma de isopropilamina, cuyo producto comercial es Roundup-N[®]. Glifosato es un herbicida altamente polar, muy soluble en agua e insoluble en la mayoría de los solventes orgánicos siendo su

principal metabolito el ácido aminometilfosfónico (AMPA). Este herbicida es uno de los más ampliamente usados en la actualidad y que además está considerado como relativamente "sano" debido a su rápida inactivación en el suelo (Quinn, 1988). Sin embargo, el comportamiento de glifosato en suelo puede variar en función de las características del suelo sobre el que se aplique. En lo que muchos autores parecen estar de acuerdo es en el importante papel que ejercen los óxidos de hierro y aluminio, así como el pH del suelo en los procesos de adsorción de glifosato en suelo (de Jonge y de Jonge, 1999; de Jonge et al. 2001; Gimsing et al. 2004, Calderón et al. 2005). En lo que aun no se han puesto de acuerdo muchos autores es en el papel que juegan otros componentes del suelo como la materia orgánica (M.O.) y la arcilla (Miles y Moye, 1988; Spann y Phillip, 1994, Piccolo y Celano, 1994) en los procesos de retención de glifosato en suelo, tan importantes en la adsorción de la mayoría de los plaguicidas en suelo. No obstante, todas estas propiedades pueden ser modificadas en mayor o menor medida en función del tipo de laboreo al que se someta el terreno. De este modo el tipo de laboreo puede modificar las propiedades químicas de un suelo (Stearman et al. 1989) así como alterar las propiedades físicas que afectan a la superficie y subsuperficie hidrológica del suelo (Allmaras et al. 1967).

Por ello el objetivo de nuestro trabajo ha sido comprobar que factores van a afectar al comportamiento de glifosato en dos suelos de Extremadura que han sido sometidos a dos tipos de laboreo: laboreo tradicional (P4) y parcela con siembra directa con cobertura de 8 años (P11). Así mismo se ha realizado un seguimiento de la distribución de glifosato durante dos años en la parcela P11 y en dos subparcelas de P4, concretamente una dedicada a siembra directa, P4SD y otra dedicada a siembra directa con cobertura de 1 año, P4SDC.

2. Materiales y Métodos

2.1 Herbicida y suelo.

En el estudio en laboratorio se ha usado glifosato como producto técnico con una pureza del 98% suministrado por Dr. Ehrenstorfer (Alemania). En el estudio en campo se usó el producto comercial con una riqueza del 36% y en su forma de sal isopropilamina, suministrado por Du Pont Ibérica S.A. (Barcelona).

Los suelos elegidos para el estudio de laboratorio son el P4, dedicado a laboreo tradicional y P11, dedicado a siembra directa con cobertura de 8 años. Ambos suelos proceden de la finca Casas de Hito situada en el municipio de Navalvillar de Pela y que pertenece a la comarca de La Serena (Badajoz). El horizonte de suelo sobre el que se ha estado trabajando tiene una profundidad de 0-25 cm y cuyas principales características se encuentran resumidas en la Tabla 1. Los datos obtenidos son resultado de una media de tres replicados de 25 g cada uno.

Las muestras de suelo se secaron al aire, se tamizaron a 2 mm y se almacenaron en cámara frigorífica (4 °C). Las propiedades físico-químicas se determinaron en los

laboratorios de análisis del IRNAS con la metodología habitual y la mineralogía por difracción de rayos X en agregados orientados (Hermosín y Cornejo, 1987). El contenido en materia orgánica se determinó por oxidación con dicromato (Nelson y Sommers, 1982) y el contenido en Fe_2O_3 y Al_2O_3 se determinó por el método ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) (Mehra y Jackson, 1960).

Tabla 1. Propiedades físico-químicas de los suelos

	Prof. (cm)	pH	M.O. %	Fe_2O_3 %	Al_2O_3 %	CIC	Arcilla %	CO_3Ca %
P4	0-30	5.3	1.98	1.48	0.15	6.4	20.87	0.0
P11	0-30	5.2	2.97	1.71	0.29	9.2	18.90	0.0

2.2 Isotermas de adsorción-desorción.

Este estudio se ha llevado a cabo en una relación sólido-solución 1:10, haciendo interaccionar 1g de suelo con 10 ml de disolución de glifosato. Las concentraciones iniciales (Ci) de glifosato usadas han sido: 0.5, 1, 2.5, 5, 10, 25 y 50 ppm. Todas las experiencias se realizaron por duplicado y las suspensiones fueron agitadas en tubos de centrifuga de polipropileno de 50 ml de capacidad, durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, dichos tubos se centrifugaron durante 15 minutos a 15.000 r.p.m. y del sobrenadante de cada tubo se tomaron 5 ml que se filtraron para su posterior análisis por HPLC. Con objeto de conocer la concentración de equilibrio (Ce) y de aquí conocer la concentración de plaguicida adsorbida (Cs). De esta forma aplicando la ecuación de Freundlich podemos obtener los diferentes parámetros de la adsorción (Hermosín y Cornejo, 1987).

Para realizar la isoterma de desorción, se sustituyen los 5 ml de sobrenadante usados para el estudio de adsorción por otros 5 ml de Cl_2Ca 0.01 M. Tras tres diluciones sucesivas en las concentraciones 5 y 50 ppm se determinó la cantidad de herbicida en l solución de equilibrio y a partir de ahí se pudo calcular la cantidad de herbicida adsorbido tras cada paso de desorción.

2.3 Estudio de lixiviación en columnas empaquetadas a mano.

El estudio de lixiviación de glifosato en columnas de suelo empaquetadas a mano se ha realizado en condiciones de flujo saturado. Cada columna constaba de 6 anillos de metacrilato de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura. Los anillos estaban unidos entre sí con silicona para evitar el flujo preferencial a través de las paredes. Tanto el anillo superior como el anillo inferior se llenaron con arena de mar lavada, con objeto de homogeneizar la aplicación del herbicida y también evitar la pérdida de partículas de suelo hacia los lixiviados, respectivamente. Previa a la aplicación del herbicida, las columnas se saturaron con agua y tras dejar drenar libremente durante 24 horas se procedió a la aplicación del herbicida a una dosis de 2.24 kg ha^{-1} . Una vez aplicado el herbicida se añadió diariamente 25 ml de Cl_2Ca 0.01 M hasta la total lixiviación del herbicida con el fin de obtener las curvas

de elución relativa y acumulada de glifosato en dichos suelos.

2.4 Estudio de persistencia en campo.

El estudio de persistencia en campo se ha realizado en dos parcelas: una con suelo P11 y otra con suelo P4. Esta última a su vez está dividida en tres parcelas (P4, P4SD y P4SDC), tal y como se muestra en la Tabla 2. Glifosato se aplicó en el mes de Marzo del 2003 y en el mes de Abril del 2004, a una dosis de 2 l ha⁻¹ y en todas las subparcelas exceptuando la parcela P4 a la que no se le añadió glifosato. En cada una de estas miniparcelas se realizaron tres muestreos con una barrena de 5 cm de diámetro y a diferentes profundidades (0-5, 5-10, 10-30 y 30-60). Una vez tomadas las muestras se congelaron a -10° C hasta el momento en el que se realizaron los análisis.

Tabla 2. Esquema de las parcelas

A	B	C	D	Parcela P11
				Siembra directa con cobertura (8 años)
A	B	C	D	Parcela P4.
				Laboreo tradicional
A	B	C	D	Parcela P4SD.
				Siembra directa año 0
A	B	C	D	Parcela P4SDC.
				Siembra directa con cobertura (1 año)

2.5 Extracción y análisis de las muestras de suelo.

Muchos autores han conseguido porcentajes de extracción bastante pobres (20-50%) en los procesos de extracción de glifosato del suelo (Glass, 1983; Lundgren, 1986), dependiendo de diversos parámetros del suelo como contenido en arcilla, M.O., pH, etc. En nuestro caso los porcentajes de recuperación en ambos suelos fueron ligeramente superiores (65%) aunque seguían siendo bajos. No obstante, al evitarnos el paso de limpieza de la muestra tras la extracción simplificamos bastante el proceso y podría compensar los bajos niveles de recuperación. Concretamente la extracción de glifosato se llevó a cabo en 5 g de suelo usando como extractante KH₂PO₄ 0.1 M siguiendo el método desarrollado por Miles y Moye (1988). Tras la extracción se procedió a derivatizar la muestra con 9-fluorometil cloroformato (FMOC). Para ello se tomó una alícuota de 0.1 ml de muestra y se hizo reaccionar con 0.1 ml de FMOC. El producto derivatizado se mezcló con 0.9 ml de tampón borato y 0.9 ml de acetona HPLC, la mezcla se extrajo con 3x1 alícuotas de etil acetato pasando directamente a su análisis por HPLC. El análisis se llevó a cabo con un sistema Waters que consta de una bomba 1525, inyector 717 Plus y detector de fluorescencia 2475 multi λ . La fase móvil usada fue 80% KH₂PO₄ 0.05 M (pH 6) y 20% acetonitrilo. La λ de excitación fue 263 nm y la de emisión de 317 nm, usando una columna Nova-Pack 3.9x150 mm de C18 con temperatura de horno de 30 °C. Tanto el volumen de inyección como el flujo de análisis fueron 10 μ l y 1 ml min⁻¹, respectivamente.

3. Resultados y Discusión

3.1. Isotermas de adsorción-desorción.

En la siguiente tabla (Tabla 3) se encuentran resumidos los principales coeficientes obtenidos tras el estudio de adsorción-desorción de glifosato en los suelos P4 y P11.

Tabla 3. Coeficientes de adsorción-desorción de glifosato en los suelos P4 y P11 tras el ajuste a la ecuación de Freundlich (Kf, nf y r²), porcentaje de adsorción y coeficiente de histéresis (H).

		P4	P11
Adsorción	Kf	99.88	98.08
	nf	0.77	0.77
	r ²	0.95	0.99
% Adsorción		91	91
Desorción 5 ppm	Kfd	46.34	48.75
	nfd	0.01	0.01
	r ²	0.48	0.87
Desorción 50 ppm	Kfd	807.2	816.58
	nfd	0.01	0.02
	r ²	0.80	0.80
H 5 ppm		77	77
H 50 ppm		77	38

En la Tabla 3 se puede observar que no existen diferencias en los coeficientes de adsorción (Kf) entre los suelos P4 y P11 (99.88 y 98.08, respectivamente). Lo mismo ocurre con los porcentajes de adsorción ya que es exactamente el mismo en los dos suelos (91%). En la Tabla 1 se puede observar como el contenido en M.O. de los suelos es superior en el suelo P11 (2.97%) respecto al suelo P4 (1.98%). Esto pone de manifiesto el papel poco relevante de la M.O. en la adsorción de glifosato, al menos en estos dos suelos. Algunos autores han demostrado que existen otros parámetros, además de la M.O., que pueden influir en la adsorción de glifosato como la arcilla, pH, óxidos de hierro y aluminio, etc. (Miles y Moye, 1988; de Jonge et al. 2001). De hecho no existen grandes diferencias en estos parámetros entre los suelos P4 y P11 (Tabla 1). Autores como Sprankle et al. (1975) y McConnell y Hossner (1986) han observado que glifosato se adsorbe fuertemente a los minerales de la arcilla y que esta adsorción está influenciada por el pH. No obstante, el importante papel que juegan los óxidos de hierro y aluminio en la adsorción de glifosato en varios suelos quedó demostrado en experimentos realizados anteriormente (Calderón et al. 2005). De Jonge (2001) sugirió que la coordinación de los enlaces que se establecen entre el grupo fosfonato del glifosato y la superficie intercambiable de algunos cationes, especialmente Fe³⁺ y Al³⁺, juega un papel muy importante en la adsorción de glifosato al suelo.

Los valores de desorción mostrados en la Tabla 3, igualmente ponen de manifiesto la irreversibilidad de la adsorción de glifosato en ambos suelos, lo que se confirma por los bajos valores de nf_d respecto a nf (nf_d << nf). Esta irreversibilidad en la adsorción, medida como coeficiente de histéresis (H), es prácticamente igual para ambos suelos y para las dos concentraciones estudiadas (5 y 50 ppm). Exceptuando el caso del suelo P11 y para la concentración de 50 ppm, en la que se

observa una disminución en dicha irreversibilidad (Tabla 3).

3.2 Estudio de lixiviación

En las Fig(s). 1 y 2 se han representado las curvas de elución relativa y acumulada de glifosato en los suelos P4 y P11, respectivamente.

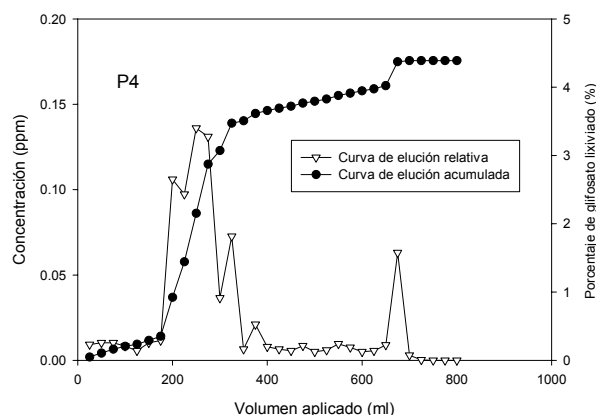


Fig. 1. Curva de elución relativa y acumulada de glifosato en el suelo P4

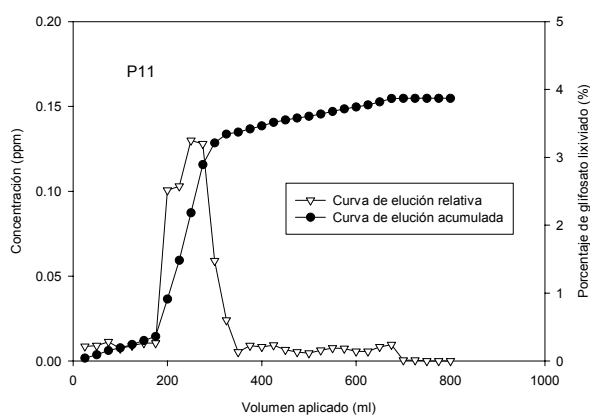


Fig. 2. Curva de elución relativa y acumulada de glifosato en el suelo P11

Al igual que ocurría con el estudio de adsorción-desorción, no existen diferencias en la lixiviación de glifosato en los dos suelos estudiados (Fig. 1 y Fig. 2). El máximo de lixiviación se ha alcanzado en ambos suelos a la vez, es decir, tras 250 ml de agua añadidos, al igual que el porcentaje total de glifosato lixiviado que también ha sido prácticamente igual en dichos suelos (4%). Esto vuelve a poner de manifiesto el papel poco importante que va a jugar la M.O. de los suelos en la retención de glifosato ya que ésta sería la principal diferencia existente entre los suelos P4 y P11. En cualquier caso, el porcentaje lixiviado es muy bajo lo que indica una baja movilidad de glifosato en estos suelos. Este hecho ha sido ya demostrado por varios autores, los cuales han observado como a pesar de la alta solubilidad de glifosato en agua, dicho herbicida presenta muy baja movilidad en suelos como consecuencia de los procesos de adsorción (Sprankle et al. 1975; Newton et al. 1994; Torstensson, 1985; Roy et al. 1989; Crisanto et al. 1994). Además hay que tener en cuenta la irreversibilidad de la adsorción de glifosato en los suelos estudiados lo que hace que una posible incorporación de este herbicida de

nuevo al suelo por procesos de desorción sea prácticamente despreciable.

3.3 Persistencia en campo

En las Fig(s). 3, 4 y 5 se encuentran representados los residuos de glifosato extraídos durante los meses de Marzo del 2003, Abril del 2004 y Mayo del 2004. Han sido los únicos meses en los que se han encontrado residuos de glifosato, coincidiendo en ambos años con los meses tras la aplicación del herbicida.

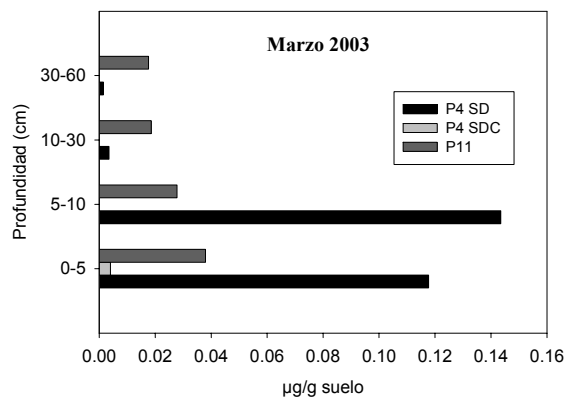


Fig. 3. Residuos de glifosato extraídos en campo durante el año 2003

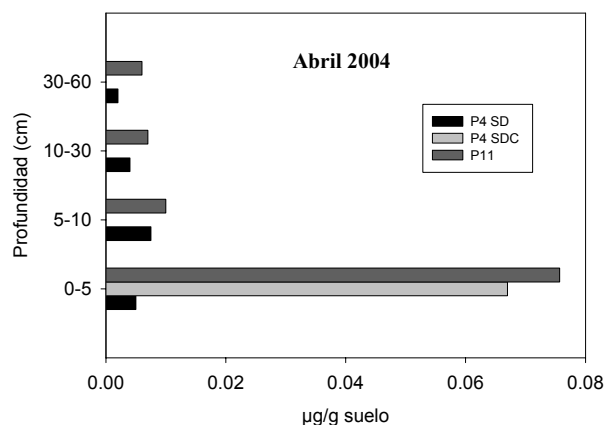


Fig. 4. Residuos de glifosato extraídos en campo durante el año 2004 (Abril)

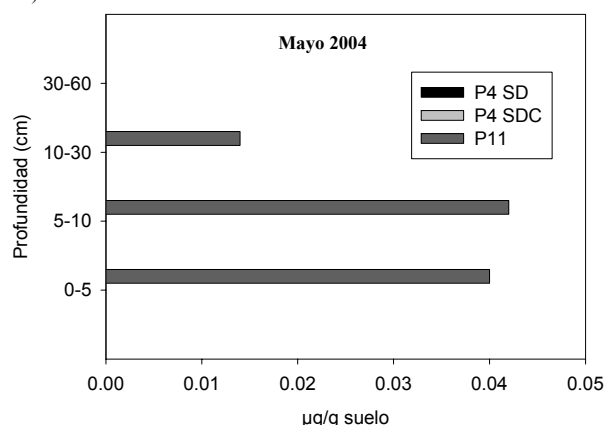


Fig. 5. Residuos de glifosato extraídos en campo durante el año 2004 (Mayo)

En el caso del año 2003, la mayor cantidad de residuos de glifosato se encontraron en la parcela P4SD y en los primeros centímetros de suelo (0-10 cm). En la parcela

P4SDC prácticamente no se encontraron residuos, mientras que en la parcela P11 sí se encontraron residuos en todas las profundidades (0-60 cm) aunque en menor cantidad que en P4 SD. La explicación a lo que ocurre en cada una de las parcelas sería muy variada y vendría dada por la propia heterogeneidad del terreno. En el caso de la parcela P4SDC podría existir una retención del herbicida aplicado en la cobertura de dicha parcela. Estudios previos han mostrado que el 15-80% de un herbicida aplicado será interceptado, dependiendo de la cantidad y tipo de residuos de cultivo, y de la vegetación que haya sobre el terreno (Gadhiri et al. 1984; Banks y Robinson, 1986; Sadeghi y Isensee, 2001). En cuanto a la parcela P11, podría existir un proceso de flujo preferencial, ya que se han encontrado residuos a grandes profundidades (60 cm). Este fenómeno también ha sido demostrado por varios autores los cuales encontraron una mayor incidencia de este tipo de proceso (flujo preferencial) en suelos sometidos a laboreo de conservación, ya que los canales naturales del suelo (lombrices, grietas,...) no son destruidos por las labores (Isensee et al. 1990; Zehe y Flühler, 2001). Esta variabilidad en los resultados vuelve a ponerse de manifiesto en el año 2004. En ambos meses (Abril y Mayo), las cantidades de glifosato recuperadas fueron sensiblemente menores a las encontradas durante el año 2003, además la distribución de los residuos fue muy diferente a los encontrados en el año anterior. En este caso las menores cantidades de glifosato se encontraron precisamente en la parcela P4SD, al contrario de lo que ocurría en el 2003. Respecto a la parcela P4SDC, el contenido en residuos de glifosato fue mayor comparado con el año anterior, permaneciendo acumulado en los primeros centímetros de suelo (0-5 cm). Mientras que en la parcela P11 vuelve a repetirse el fenómeno del año 2003, es decir, se vuelven a encontrar residuos a mayores profundidades (60 cm), aunque en menor cantidad que en dicho año. Además se puede observar como los residuos de esta última parcela (P11) son los únicos que permanecen en el siguiente muestreo (Mayo 2004). En cualquier caso, la heterogeneidad, tanto del terreno como de la aplicación del herbicida, hace que sea difícil obtener una conclusión clara de lo que ocurre en las diferentes parcelas. En líneas generales, lo más importante quizás es destacar la baja persistencia de glifosato en estos suelos, en los que después de un mes tras la aplicación del herbicida, los residuos encontrados son prácticamente nulos. Este hecho ya fue demostrado por Veiga et al. (2001) en suelos de Galicia donde después de un mes del tratamiento, tanto en las fases sólidas como líquidas, los niveles de glifosato eran muy bajos. La baja persistencia de glifosato, por tanto, probablemente sea debida a fenómenos de adsorción fuerte en los coloides del suelo, tal y como se demostró anteriormente. Tras la aplicación de residuos de maíz al suelo a un nivel del 8%, Accinelli et al. (2005) han encontrado una significativa reducción de la mineralización y adsorción de glifosato, demostrando que incluso bajo estas condiciones que existe una baja persistencia y una alta retención de glifosato en suelo. No hay tampoco que olvidar un fenómeno importante como es la degradación de glifosato que sería otra vía de disipación de glifosato en suelo junto a los procesos de adsorción (Quinn et al. 1988).

La degradación de glifosato es principalmente por vía microbiana, estando liderada por la población *Pseudomonas spp.*, lo que da lugar al principal metabolito de glifosato, el ácido aminometilfosfónico (AMPA) (Gimsing et al. 2004). A pesar de la posible importancia de los fenómenos de degradación de glifosato en suelo, la fuerte adsorción de éste a coloides como óxidos de hierro y de aluminio puede inducir a una protección de compuestos orgánicos como glifosato frente a la degradación microbiana, siendo los procesos de adsorción-desorción los que al final controlen la cantidad de glifosato en suelo (Scow y Hutson, 1992; Eberbach, 1998; Calderón et al. 2005).

4. Conclusiones

El principal proceso que controla el comportamiento de glifosato en los suelos estudiados es la adsorción. Concretamente se produce una adsorción fuerte a los coloides del suelo entre los que destacan los óxidos de hierro y aluminio, todo ello estrechamente ligado al pH. Además esta adsorción es irreversible protegiendo al herbicida de posibles fenómenos de degradación. Esto se traduce en una baja movilidad en suelo a pesar de su alta solubilidad y en una baja persistencia, ya que no se han encontrado residuos de glifosato después de un mes tras la aplicación del herbicida. No se han observado diferencias de comportamiento del glifosato en los dos suelos con diferente laboreo (tradicional y de conservación). Todo esto pone de manifiesto el bajo potencial contaminante de glifosato, tanto de aguas subterráneas como superficiales.

Agradecimientos. El presente trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto AGL2000-0463-P4-05, el CAO-01-010 de la Junta de Andalucía y el grupo RNM 0124 del PAI de la Junta de Andalucía

Referencias

- Accinelli, C., Koskinen, W.C., Seebinger, J.D., Vicari, A y Sadowsky, M. 2005. Effects of incorporated corn residues on glyphosate mineralization and sorption in soil. *J. Agric. Food Chem.* 53, 4110-4117.
- Allmaras, R.R., Burwell, R.E. y Holt, R.R. 1967. Plow-layer and surface roughness from tillage as influenced by initial porosity and soil moisture of tillage time. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31, 550-556.
- Banks, B.A. y Robinson, E.F. 1986. Soil reception and activity of acetochlor, alachlor and metolachlor as affected by wheat (*Triticum aestivum*) straw and irrigation. *Weed Sci.* 34, 607-611
- Crisanto T., Sanchez-Martín M.J. y Sanchez-Camazano M. 1994. Mobility of pesticides in soil. Influence of soil properties and pesticide structure. *Toxicol. Environ. Chem.* 45, 97-104
- Calderón, M.J., Celis R., Quintana, M.A., Durand, S. y Cornejo, J. 2005. Soil components as affecting glyphosate soil retention (unpublished results).
- De Jonge, H. y de Jonge, L.W.. 1999. Influence of pH and solution composition on the sorption of glyphosate and prochloraz to a sandy loam soil. *Chemosphere*, 39, 753-763
- De Jonge, H., de Jonge, L.W., Jacobsen, O.H., Yamaguchi, T. Y Moldrup, P. 2001. Glyphosate sorption in soils of different pH and phosphorus content. *Soil Science* 166, 230-238
- Eberbach, P. 1998. Applying non-steady-state compartmental analysis to investigate the simultaneous degradation of soluble and sorbed

- glyphosate (N-(phosphonomethyl)glycine) in four soils. *Pestic. Sci.* 52, 229-240
- Ghadiri, H., Shea, P.J. y Wicks, G.W. 1984. Interception and retention of atrazine by wheat (*Triticum aestivum* L.) stubble. *Weed Sci.* 32, 24-27
- Gimsing, A.L., Borggaard, O.K., Jacobsen, O.S., Aamand, J y Sørensen, J. 2004. Chemical and microbiological soil characteristics controlling glyphosate mineralisation in Danish surface soil. *Appl. Soil Ecol.* 27, 233-242
- Glass, R.L. 1987. Adsorption of glyphosate by soils and clay minerals. *J. Agric. Food Chem.* 35, 497-500
- Hermosín M.C. y Cornejo J. 1987. Maleic hydrazide adsorption by soil of the mole fraction form of Freundlich equation. *Soil Sci.* 144:250-256
- Isensee, A.R., Nash R.G. and Helling C.S. 1990. Effect of conventional vs. No-tillage on pesticide leaching to shallow groundwater. *J. Environ. Qual.* 19, 434-440
- Lundgen, L.N. 1986. A new method for the determination of glyphosate and (aminomethyl)phosphonic acid residues in soils. *J. Agric. Food Chem.* 34, 535-538
- McConnell, J.S. y Hossner, L.R. 1986. pH-Dependent adsorption isotherms of glyphosate. *J. Agric. Food Chem.* 33, 1075-1078
- Mehra O.P. y Jackson M.L. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. En: *Clays Clay Minerals, Proc. 7th Natl. Conf.*, Washington D.C. pp. 317-327
- Miles C.J. y Moye H.A. 1988. Extraction of glyphosate herbicide from soil and clay minerals and determination of residues in soils. *J. Agric. Food Chem.* 36, 486-491
- Nelson D.W. y Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. En: *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties* (Page, A.L. ed.) ASA. Madison, WI. Pp. 539-579
- Newton M., Horner L.M., Cowell J.E., White D.E. y Cole E.C. 1994. Dissipation of glyphosate and aminomethyl phosphonic acid in north American forest. *J. Agric. Food Chem.* 42, 1795-1802
- Quinn, J.P., Peden, J.M.M. y Dick, R.E. 1988. Glyphosate tolerance and utilization by the microflora of soils treated with the herbicide. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 29, 511-516
- Roy D. N., Konar S.K., Banerjee S., Charles D.A., Thompson D.G. y Prasad R. 1989. Persistence, movement and degradation of glyphosate in selected Canadian boreal forest soil. *J. Agric. Food Chem.* 37, 437-440
- Sadeghi, A.M. y Isensee, A.R. 2001. Impact of hairy vetch cover crop on herbicide transport under field and laboratory conditions. *Chemosphere* 44, 109-118
- Scow, K.M. y Hutson, J. 1992. Effect of diffusion and sorption on the kinetics of biodegradation: theoretical considerations. *J. Soil Sci. Soc. Am.* 56, 119-127
- Sprankle, P., Meggitt, W.F. y Penner, D. 1975. Rapid inactivation of glyphosate in soils. *Weed Sci.* 23, 224-228
- Stearman, G.K., Lewis, R.J., Tortorelli, L.J. y Taylor D.D. 1989. Herbicide reactivity of soil organic matter in no-tilled and tilled cotton. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 1690-1694.
- Torstensson L. 1985. Behaviour of glyphosate in soils and its degradation. En: *The herbicide glyphosate* (Grossbard E., Atkinson D., eds.). London: Butterworths, 137-149
- Veiga, F., Zapata, J.M., Fernandez-Marcos, M.L. y Alvarez, E. 2001. Dynamics of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in a forest soil in Galicia, north-west Spain. *The Sci. of the Total Environ.* 27, 135-144
- Zehe, E. y Flüher, H. 2001. Preferential transport of isoproturon at a plot scale and a field scale tile-drained site. *Journal of Hydrology* 247, 100-115.