

6. EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE RESIDUOS DE PLAGUICIDAS

Francisco Tapia Flores

Jorge Jerez Briones

María Stella Moyano Arancibia

En las páginas siguientes se aborda la temática de los residuos de plaguicidas: insecticidas, fungicidas y herbicidas que fueron utilizados por los productores en los distintos módulos evaluados en el manejo de sus cultivos o huertos frutales.

En primer término, se presenta una descripción general de los efectos de los residuos de plaguicidas sobre el ambiente, la salud humana y animal, así como los factores que determinan su movilidad y contaminación de acuíferos. Posteriormente, se hace un análisis y discusión respecto de la movilidad de dichos residuos en el agua de riego y la eficiencia de los biofiltros en la reducción de su concentración en el agua superficial.

6.1. EFECTO DE LOS RESIDUOS DE PLAGUICIDAS SOBRE EL AMBIENTE

El aumento de la población mundial ha llevado al desarrollo de la agricultura a una escala industrial con la finalidad de producir el alimento necesario. El uso intensivo de plaguicidas para controlar las plagas y enfermedades que reducen la cosecha o disminuyen su calidad, ha contribuido a aumentar los rendimientos y bajar los costos de producción. No obstante, desde comienzos de la década del 70 comenzó a hacerse notorio que estos productos ocasionaban efectos adversos sobre el medio ambiente. Estudios desarrollados en el extranjero han determinado la presencia de plaguicidas en el agua superficial y subsuperficial, afectando su calidad y los ecosistemas.

Las evaluaciones demostraron que los plaguicidas podían llegar al agua aun cuando hubieran sido empleados correctamente. Ello condujo a los países a exigir mayores estudios para aprobar su utilización, y a mejorar las prácticas de aplicación, además de desarrollar sistemas de mitigación con el fin de evitar que sus residuos lleguen a cursos de agua superficiales. Usualmente la cantidad de plaguicida que llega a las aguas superficiales es baja, entre un 1 y 2% de lo aplicado. Pero la flora y la fauna pueden ser afectadas a bajas concentraciones, por lo cual esos volúmenes suelen ser más que suficientes para dañar los ecosistemas.

El manejo moderno de los plaguicidas se orienta a reducir la probabilidad de causar efectos adversos sobre la salud de las personas y el medio ambiente. En la actualidad en Chile se distribuyen más de 668 productos comerciales, los que contienen 386 principios activos (SAG, 2004).

Los factores que afectan la cantidad de plaguicidas que llega al agua incluyen las condiciones ambientales (clima, suelo), manejo agronómico (métodos de aplicación, dosis, riego) y las características fisicoquímicas de los agroquímicos (solubilidad en agua, vida media, interacción con el suelo). A continuación se describe, en forma simplificada, cómo los distintos factores influyen sobre el movimiento de los plaguicidas en el medio ambiente.

Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales que más influyen en el movimiento de los plaguicidas son el clima (lluvia, temperatura, humedad) y el suelo.

Los microorganismos del suelo juegan un rol muy importante en la degradación de los plaguicidas, antes de que alcancen las aguas subsuperficiales. Condiciones que facilitan su desarrollo activo, como son temperaturas moderadas, entre 20° y 30°C, contribuyen a una degradación rápida. Inversamente, luego de la aplicación de plaguicidas la ocurrencia de lluvias en períodos próximos aumenta la probabilidad de que alcancen los cursos de agua.

El suelo juega un rol preponderante. Además de la actividad microbiológica, las partículas más finas del suelo, como las arcillas y principalmente la materia orgánica, interactúan con los plaguicidas y reducen su movilidad. Suelos con baja materia orgánica, menor a 1%, y texturas gruesas, como los arenosos, presentan una escasa capacidad para retener los plaguicidas y aumentan la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas. Suelos con altos contenidos de materia orgánica, como los trumaos, que pueden tener entre 10 y 20% de materia orgánica, poseen una alta capacidad de retención de plaguicidas y reducen el riesgo de contaminación del agua.

Manejo agronómico

El manejo agronómico, que considera la aplicación y la formulación de los productos, y el manejo del riego, incide en la biodisponibilidad de los residuos. A mayor uso de plaguicidas, las probabilidades de contaminar el agua superficial o subterránea aumentan, por lo cual se debe incorporar conceptos como el manejo integrado de plagas y evitar el uso de aplicaciones por calendario.

La utilización de plaguicidas aplicados al suelo aumenta la posibilidad de que lleguen a las fuentes de agua, debido a que la cantidad de producto que potencialmente se puede movilizar es mayor. Aquellos aplicados al follaje son afectados por factores ambientales, como la luz solar, que los degradan, y la cantidad de plaguicidas que llega al suelo es una fracción menor de la distribuida inicialmente.

El riego puede transportar los plaguicidas a las aguas, especialmente en los sistemas superficiales, como el riego por surco, debido a que se utilizan altos volúmenes del recurso hídrico. Además, un aspecto poco evaluado es que el mal manejo del riego tiende a producir erosión, movilizándolo hasta los cursos de agua los plaguicidas que se encuentran adheridos a la materia orgánica y las arcillas.

Propiedades fisicoquímicas

Las propiedades fisicoquímicas más relevantes para el movimiento de los plaguicidas son la solubilidad en agua, la vida media y el coeficiente de partición por carbón orgánico.

La solubilidad es una medida de la afinidad del agroquímico para ser transportado por el agua. Aquellos de alta solubilidad (mayor a 30 miligramos por litro) presentan mayores posibilidades de ser movilizados disueltos en el agua.

La adsorción es la tendencia de los compuestos a adherirse a las partículas del suelo, especialmente a la materia orgánica y las arcillas. Esta tendencia se estudia mediante isotermas de adsorción, para lo cual diferentes concentraciones de plaguicidas son adicionadas a una masa de suelo. Se ha observado que los plaguicidas orgánicos, no iónicos, muestran una alta afinidad por la materia orgánica y en menor medida por las arcillas.

La afinidad de los plaguicidas por las partículas de suelo es determinada mediante un coeficiente

que relaciona la cantidad del producto en el suelo con la concentración de éste en una solución. El coeficiente indicado es altamente variable en los distintos tipos de suelo. Sin embargo, se ha observado que la variación se reduce cuando se considera el porcentaje de materia orgánica presente en el suelo. Este coeficiente es conocido como el coeficiente de partición por materia orgánica (K_{om}) o coeficiente de partición por carbón orgánico (K_{oc}). A mayor valor K_{oc} , menor movilidad del plaguicida en forma soluble y, por tanto, menor riesgo de contaminación del agua subterránea. Sin embargo, al estar fuertemente adherido a las partículas de suelo, usualmente en los primeros centímetros, existe mayor riesgo de contaminación por arrastre de las aguas superficiales.

Cuadro 11. Clasificación de plaguicidas de acuerdo a su afinidad a la materia orgánica.

Afinidad a la materia orgánica	Koc
Muy baja	< 50
Baja	50-150
Media	150-500
Alta	500-2.000
Muy alta	> 2.000

La vida media describe la persistencia de los plaguicidas sobre un determinado sustrato y condición. Existen valores de vida media para el follaje y suelo en condiciones aeróbicas y anaeróbicas. La vida media es el tiempo, usualmente medido en días, requerido para que la mitad de la masa del ingrediente activo sea degradada. Este concepto incluye una serie de procesos a través de los cuales los plaguicidas son degradados, por ejemplo degradación microbiana y química, absorción por la planta, hidrólisis, etc.

La vida media, al ser un factor que incluye la participación de las comunidades microbianas, no es un valor absoluto. Es más bien un rango de días que varía entre las distintas series de suelo y que es afectado por condiciones de humedad, temperatura, materia orgánica, pH del suelo y actividad microbiana. Los plaguicidas con mayor resistencia a la degradación tienen vidas medias mayores. La clasificación de la vida media de los plaguicidas se presenta en el cuadro 12.

Cuadro 12. Clasificación de persistencia de los plaguicidas sobre la base de su vida media.

Persistencia	Vida media (DT_{50} , días)*
Extrema	> 120
Alta	120-60
Media	60-30
Ligera	30-15
No persistente	< 15

* DT_{50} : tiempo requerido (en días) para convertir el 50% de un plaguicida en otra(s) sustancias(s), en cualquiera de las matrices: suelo y agua.

Un plaguicida que presenta una vida media baja y alto K_{oc} , utilizado en un suelo con alta materia orgánica y fuentes de agua lejanas al área tratada, tiene una baja probabilidad de llegar al agua. Por el contrario, existe una alta posibilidad de que al menos una parte del plaguicida llegue si tiene vida me-

dia alta, es aplicado a un suelo con bajo contenido de materia orgánica y las fuentes de agua (esteros, napas freáticas) se encuentran cercanas al área tratada.

Los suelos que tienen la capacidad para retener los plaguicidas por un mayor tiempo, no permiten que éste pase a contaminar las aguas subsuperficiales, degradándose los plaguicidas con anterioridad. Por esa misma degradación, tampoco el suelo queda contaminado.

6.2. PLAGUICIDAS EVALUADOS

En el cuadro 13 se indica los plaguicidas empleados por los productores, en cada módulo, en el control de plagas y enfermedades que afectaron a sus cultivos durante el período de estudio.

Cuadro 13. Plaguicidas (ingredientes activos) empleados por los productores en el manejo de sus cultivos y huertos frutales.

Ingrediente activo	Requinoa	San Fernando	Pichidegua	Chimbarongo	Teno	Curicó	Sagrada Familia	Molina
Acetoclor								
Atrazina								
Clorpirifos								
Diazinon								
Dicofol								
Dimetoato								
Glifosato								
Kresoxim-methyl								
Metidathion								
Metolaclor								
Miclobutanil								
Oxifluorfen								
Propiconazol								
Triadimefon								

Dado que en el estudio de INIA se pretendió evaluar el movimiento de los plaguicidas en el agua de riego y determinar la eficiencia de los biofiltros en la reducción de su concentración, es necesario, primeramente, conocer algunas propiedades físicas y químicas de los productos empleados por los agricultores en el manejo de sus cultivos y huertos frutales. El cuadro 14 presenta su solubilidad en agua, presión de vapor, coeficiente de partición, coeficiente de adsorción y vida media.

Presión de vapor es la capacidad que tiene el plaguicida de pasar al aire. A mayor presión de vapor, mayor es la probabilidad de que el producto se volatilice.

Cuadro 14. Propiedades físicas y químicas de los ingredientes activos empleados por los productores.

Ingrediente activo	Solubilidad en agua (mg/l)	Presión de vapor (mPa)	Coefficiente de partición (log Kow)	Coefficiente de adsorción Koc (mg/g)	Vida media (días)
Acetoclor	223	0,04	3,03	200	14
Atrazina	28	0,04	2,34	100	64
Clorpirifos	2	2,5	4,69	6.070	21
Diazinon	40	0,097	3,11	1.000	18,4
Dicofol	0,8	0,25	4,0	6.064	45
Dimetoato	25.000	1,1	0,7	20	7,2
Glifosato	12.000	2,5	3,22	24.000	12
Kresoxim-methyl	30	2,3	3,4	308	16
Metidathion	240	186	4,72	400	7
Metolaclor	530	1,7	3,45	200	21
Miclobutanil	142	0,00016	2,94	400	35
Oxifluorfen	0,116	0,026	4,86	17.636	35
Propiconazol	100	1,3		656	214
Triadimefon	260	< 0,1	3,18	300	26

Fuente: The Agrochemicals Handbooks, 1990.
www.extoxnet.com

Considerando las propiedades señaladas, es posible estimar la posibilidad de encontrar residuos de plaguicidas movilizándose en el agua de riego, según se indica en el cuadro 15.

Cuadro 15. Probabilidad de movilizarse en el agua de riego de 14 plaguicidas empleados por los productores, de acuerdo a las propiedades de sus ingredientes activos.

Solubilidad en agua y afinidad por los sólidos del suelo	Ingrediente activo	Probabilidad de movilizarse en la fase líquida del suelo
Muy solubles en agua y baja afinidad por los sólidos del suelo	Metolaclor, Dimetoato, Atrazina	Alta
Baja solubilidad en agua y baja retención por sólidos del suelo	Acetoclor, Kresoxim-methyl, Triadimefon, Miclobutanil, Metidathion	Regular
Baja solubilidad en agua y alta afinidad por sólidos del suelo	Clorpirifos, Propiconazol, Diazinon, Dicofol, Oxilurfen	Baja
Muy alta solubilidad en agua y muy alta afinidad por sólidos del suelo	Glifosato	Indeterminada*

*El comportamiento de Glifosato es impredecible debido a que, siendo muy soluble en agua, es también fuertemente adsorbido por el suelo.

En el cuadro se aprecia que ingredientes activos como Metolaclor, Dimetoato y Atrazina, presentan alta probabilidad de movilizarse en el agua de riego. Glifosato, en cambio, tiene una alta solubilidad en el agua y, simultáneamente, una alta afinidad por los sólidos del suelo, lo cual hace impredecible determinar la probabilidad de encontrarlo en el agua de riego. Por lo tanto, en un estudio de esta naturaleza es fundamental conocer estas propiedades para poder comprender la dinámica de los residuos de plaguicidas en el suelo y en el agua.

Aun cuando los agroquímicos con una alta afinidad por los sólidos del suelo presentan baja probabilidad de movilizarse en la fase líquida, existe un riesgo potencial. En caso de un gran escurrimiento y erosión, el producto será transportado adsorbido en las partículas de suelo. Tal como se desprende del cuadro 15, Diazinon, Clorpirifos y Glifosato presentan una baja probabilidad de llegar al agua subterránea, porque no se mueven con facilidad en la fase líquida, pero sí pueden llegar a cursos de agua en los sedimentos arrastrados por el agua de lluvia o el riego. Los plaguicidas solubles presentan el riesgo de contaminar el agua subterránea y el agua superficial.

Para analizar el comportamiento de los plaguicidas en el agua, tanto de riego como de lluvias, así como la eficiencia de los biofiltros en su reducción, se separan aquellos aplicados al follaje de los cultivos o frutales y aquellos aplicados al suelo (del tipo "residual"), dado que conforman grupos con distintas propiedades.

6.3. PLAGUICIDAS APLICADOS AL FOLLAJE

Dentro de este grupo se analiza el comportamiento de Metidathion, Triadimefon, Dimetoato, Diazinon y Propiconazol, que fueron sistemáticamente empleados por los productores durante las tres temporadas de evaluación.

Movilidad en el agua

El estudio comparó las temporadas de riego con las de invierno, donde se analizaba el agua de lluvia que escurría por el predio. Entre ambas épocas se observó una gran diferencia en la cantidad de veces que fue posible determinar residuos de estos plaguicidas en las muestras de agua. La figura 7 presenta las detecciones de residuos de plaguicidas expresadas como porcentaje del número de muestreos, para cada residuo estudiado, en las temporadas de riego y de lluvias, respectivamente.

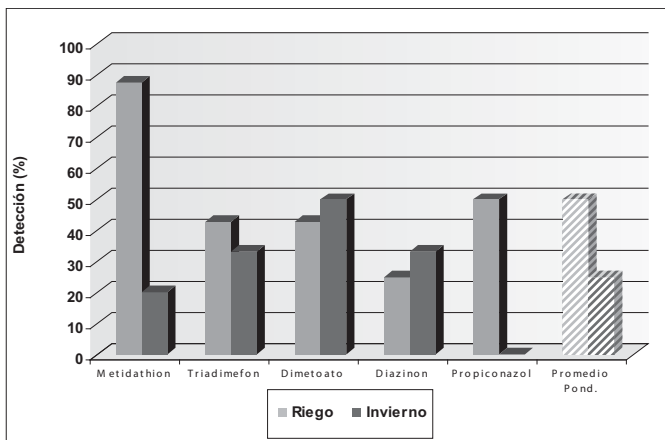


Figura 7. Detecciones de residuos de plaguicidas aplicados al follaje (%) en el agua de riego y en el agua de lluvias, en relación al número de muestreos.

Se puede deducir de la figura 7 que los plaguicidas, con excepción de Dimetoato y Diazinon, evidencian una reducción importante en las frecuencias con que son encontrados, al comparar la temporada de riego con la de lluvias. En promedio, en las temporadas de primavera-verano, en el 50% de las muestras es posible determinar la presencia de plaguicida en el agua de riego. En las temporadas de invierno, en cambio, es posible encontrar la presencia de alguno de estos agroquímicos sólo en el 25% de los casos. En otras palabras, luego de su aplicación en primavera-verano normalmente los plaguicidas no residuales son degradados rápidamente, inactivados por acción de luz solar o bien lixiviados con los riegos sucesivos.

Por otra parte, la concentración de residuos en el agua de lluvia que escurre en el predio durante el invierno es menor en un 59,4% respecto de la concentración en el agua de riego en las temporadas de verano (cuadro 16).

Cuadro 16. Concentración promedio de plaguicidas en el agua de riego y de lluvia.

Ingrediente activo	Concentración promedio al ingreso en el BF (µg/l)		Reducción en invierno (%)
	Riego	Invierno	
Metidathion	1,02	0,32	68,2
Triadimefon	0,05	0,01	79,9
Dimetoato	0,02	0,02	0,0
Diazinon	0,26	0,13	49,5
Propiconazol	1,81	0,01	99,7
Promedio			59,4

Los datos del cuadro 16 ratifican que los plaguicidas aplicados al follaje, en general, se degradan rápidamente o bien se pueden lixiviar en el perfil del suelo.

Eficiencia de los biofiltros en la reducción de residuos de plaguicidas no residuales, aplicados al follaje

Al contrastar la concentración de los residuos de plaguicidas al ingreso del área de los biofiltros, con su concentración a la salida, luego de pasar por BF₁ y BF₂, se estimó la eficiencia de estas asociaciones vegetales en la reducción de dichos contaminantes.

Dado que bajo condiciones de invierno el agua de lluvia presenta bajísimas concentraciones de residuos de plaguicidas, cualquier variabilidad analítica puede representar incrementos o reducciones porcentuales de gran magnitud, lo que no hace aconsejable determinar la eficiencia de los biofiltros para esa condición.

En el cuadro 17 se presenta la eficiencia de los biofiltros durante la temporada de riego. En general se evidencia que, dada la pequeñez de las concentraciones de estos residuos en el agua de riego, la eficiencia de los biofiltros también es baja, excepto en Propiconazol. El promedio fluctúa entre 10,5% y 18,6%. Ello, con grandes diferencias entre los ingredientes activos y los biofiltros evaluados, propias del trabajo con datos de esa magnitud, muy sensibles a la variabilidad de los muestreos, de los procedimientos analíticos y de las determinaciones.

Cuadro 17. Eficiencia de los biofiltros en la reducción de residuos de plaguicidas aplicados al follaje, en el agua de riego.

	Eficiencia en reducción (%) en temporadas de riego	
	BF1	BF2
Metidathion	14,4	1,0
Triadimefon	6,3	50,1
Dimetoato	0,0	3,7
Diazinon	0,0	2,2
Propiconazol	31,9	36,1
Promedio	10,5	18,6

Los plaguicidas de este grupo tienen una vida media relativamente corta, porque se degradan por hidrólisis, volatilización o por acción de microorganismos, y presentan una baja afinidad por los coloides del suelo. Considerando tales características y propiedades generales, se puede concluir que son residuos con una moderada a baja probabilidad de movilizarse en el agua. Ocasionalmente pueden encontrarse en el agua de riego o lluvias que escurre en el predio, en bajas concentraciones, o bien podrían lixiviarse en el perfil del suelo.

6.4. PLAGUICIDAS RESIDUALES

En este grupo se analiza el comportamiento de Metolaclor, Atrazina, Clorpirifos y Acetoclor, que fueron empleados sistemáticamente por los productores durante los tres años de evaluación, especialmente en el cultivo de maíz.

Movilidad en el agua

Se comparó las temporadas de riego con las de invierno (agua de lluvia). Entre ambas épocas se

observó una gran diferencia en la cantidad de veces que fue posible determinar residuos de estos plaguicidas en las muestras de agua. En la figura 8 se grafica las detecciones de residuos de plaguicidas expresadas como porcentaje del número de muestreos, para cada residuo estudiado, en las temporadas de riego y de lluvias, respectivamente.

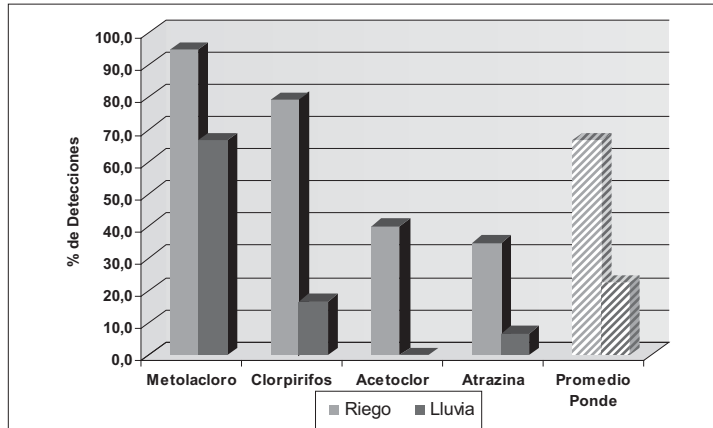


Figura 8. Detecciones de residuos de plaguicidas residuales (%) en el escurrimiento de aguas de riego y lluvias, en relación al número de muestreos.

En la figura 8 se aprecia que sólo Metolaclor, dado que es un residuo muy soluble en agua y de baja afinidad por los coloides del suelo, se moviliza con facilidad en el agua. Es detectado en el 94,7% de los muestreos en la temporada de riego y en el 66,7% en el escurrimiento de aguas de lluvia.

Clorpirifos, es determinado en el 79,2% de las muestras durante las temporadas de riego y sólo en el 16,7% de los muestreos de invierno, puesto que este ingrediente activo se pierde rápidamente por volatilización y fotólisis, siendo, en general, inestable en agua.

Atrazina, a pesar de ser soluble en agua, es encontrado sólo en el 34,8% de los muestreos realizados durante las temporadas de riego y en el 6,7% de los efectuados en el invierno. Esto se puede explicar porque se trata de un ingrediente activo que se degrada rápidamente a diferentes metabolitos (Mahía y Díaz-Raviña, 2007).

Al considerar el promedio ponderado para los cuatro residuos, mientras en la temporada de riego es posible detectar estos plaguicidas en el 66,7% de los muestreos, en la de invierno son determinados sólo en el 22,4% de las muestras.

Es posible concluir que estos plaguicidas son transportados principalmente en los riegos dados luego de su aplicación. Además, durante el invierno se observa una escasa presencia en las aguas lluvias que escurren superficialmente, en especial con precipitaciones inferiores a 30 mm.

Adicionalmente, al analizar las concentraciones de residuos de plaguicidas en las aguas lluvia, se aprecia que están muy por debajo de las encontradas en la temporada de riego, tal como se evidencia en las figuras 9; 10; 11 y 12.

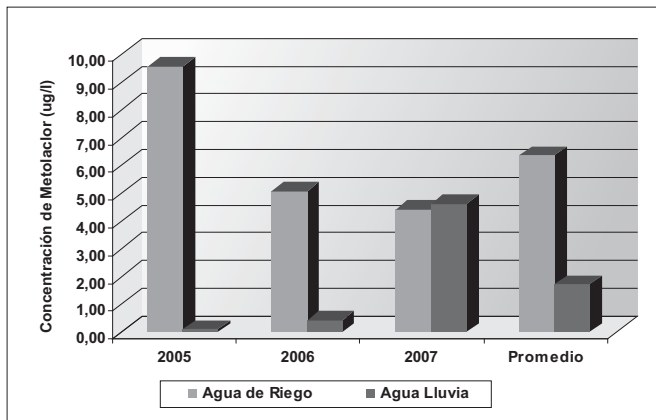


Figura 9. Concentración de Metolaclor ($\mu\text{g/l}$) al ingreso del área de biofiltros, bajo condiciones de riego y de lluvia. Promedio de tres (3) temporadas.

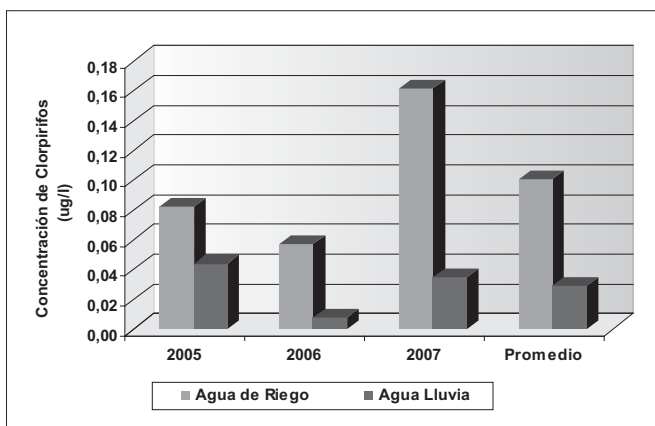


Figura 10. Concentración de Clorpirifos ($\mu\text{g/l}$) al ingreso del área de biofiltros, bajo condiciones de riego y de lluvia. Promedio de tres (3) temporadas.

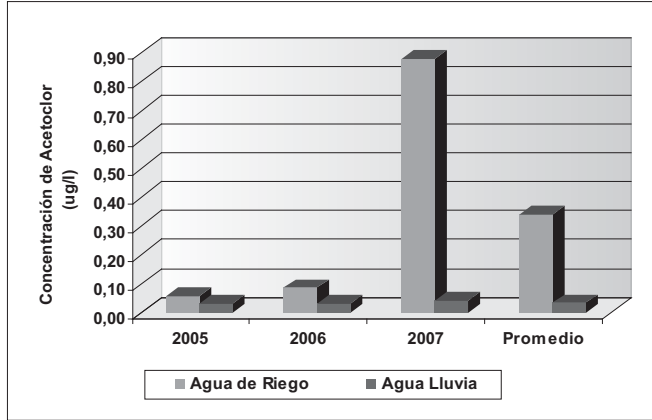


Figura 11. Concentración de Acetochlor ($\mu\text{g/l}$) al ingreso del área de biofiltros, bajo condiciones de riego y de lluvia. Promedio de tres (3) temporadas.

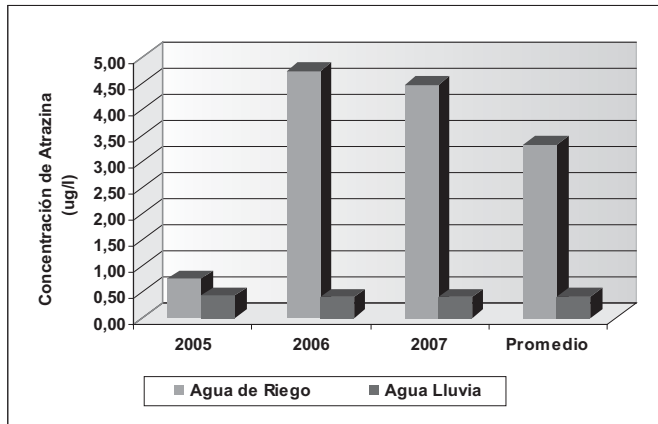


Figura 12. Concentración de Atrazina ($\mu\text{g/l}$) al ingreso del área de biofiltros, bajo condiciones de riego y de lluvia. Promedio de tres (3) temporadas.

Las concentraciones de Metolaclor (figura 9) durante el invierno, cuando es posible su determinación, se reducen a $1,72 \mu\text{g/l}$, es decir en un 73,0%, en promedio, respecto a las determinaciones realizadas en la temporada de riego. La concentración de Clorpirifos (figura 10) en el agua lluvia es de sólo $0,03 \mu\text{g/l}$, con una disminución de un 71,1%. En Acetochlor (figura 11) la concentración baja a $0,03 \mu\text{g/l}$, vale decir en un 90,2%. Atrazina (figura 12) se reduce a sólo $0,41 \mu\text{g/l}$, o sea un 87,7% menos respecto de las determinaciones realizadas en el agua de riego. En la figura 13 se resume esta situación.

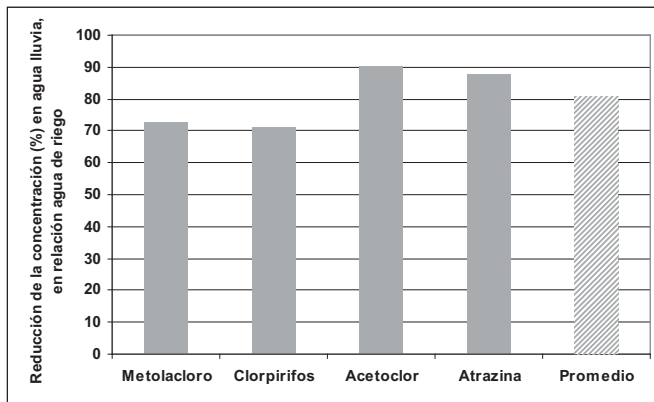


Figura 13. Reducción de la concentración de residuos de plaguicidas residuales (%) en agua lluvia, en relación al agua de riego. Promedio de tres (3) temporadas.

El bajo número de muestras en que es posible detectar estos ingredientes activos durante el invierno y la notable reducción en su concentración en las aguas lluvias que escurren en el predio (en promedio un 80,5%), permiten concluir que el problema de los residuos de plaguicidas toma su real importancia durante las temporadas de riego.

Eficiencia de los biofiltros en la reducción de residuos de plaguicidas residuales

Se contrastó la concentración de de plaguicidas residuales en el agua que ingresa al área de los biofiltros y la que sale, luego de atravesar la asociación vegetal.

En Metolacolor, Clorpirifos y Atrazina, fue posible constatar una tendencia, cosa que no ocurrió con Acetoclor, debido a la variabilidad observada en las eficiencias a través del tiempo en los módulos estudiados. Por ello esta última variable no se considera en el análisis siguiente.

En las figuras 14 y 15, se ilustra la eficiencia promedio, luego de tres temporadas de evaluaciones, del BF₁ y BF₂, bajo condiciones de riego y de lluvias (invierno), respectivamente.

Mientras en la temporada de riego se logra una eficiencia promedio de 32,4% en BF₁ y de 28,5% en BF₂, en invierno, aunque el número de detecciones es muchísimo menor, la eficiencia de los biofiltros es incluso superior, puesto que BF₁ alcanza en promedio un 48,3% y BF₂ un 38,4%.

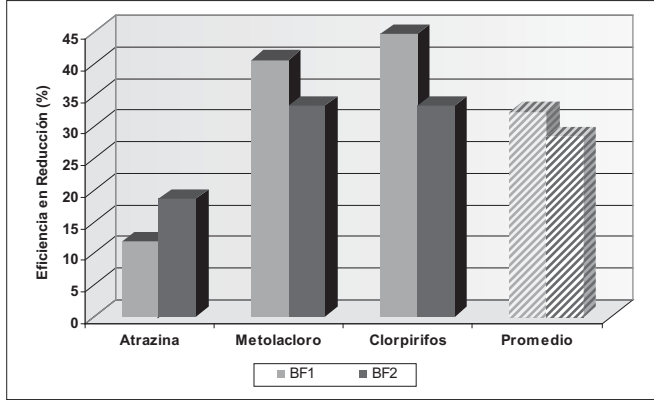


Figura 14. Eficiencia de los biofiltros, promedio de tres temporadas, en la reducción de residuos de plaguicidas en el agua de riego.

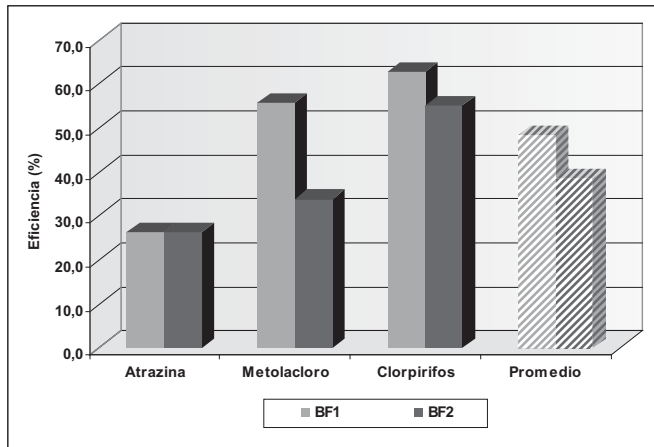


Figura 15. Eficiencia de los biofiltros, promedio de tres temporadas, en la reducción de residuos de plaguicidas en agua lluvia.

Un aspecto relevante al analizar el comportamiento promedio en las temporadas de riego y de lluvias, es que el BF₁ alcanzó una eficiencia de un 40,3%, mientras que el BF₂ logró un 33,5% (figura 16). Para todos los residuos analizados, con excepción de Atrazina, el BF₁ presentó una eficiencia mayor al BF₂.

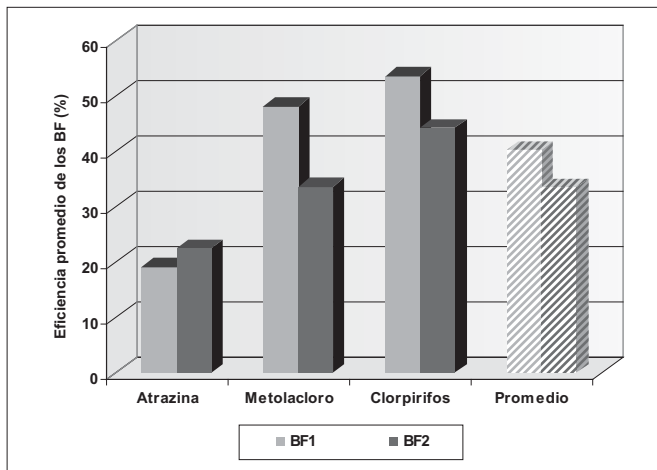


Figura 16. Eficiencia promedio de los biofiltros, durante tres temporadas, en la reducción de residuos de plaguicidas en agua de riego y de lluvias.

Por tanto se puede estimar que para el caso de los residuos de plaguicidas es importante incluir al menos dos estratas, una herbácea y otra arbustiva/arbórea. Esto permitiría capturar en forma más eficiente los residuos, ya que la pradera reduce la velocidad del agua y aumenta su tiempo de residencia, en tanto que la estrata arbustiva–arbórea otorga al suelo una mayor porosidad y mejor capacidad de infiltración del agua que se mueve superficialmente sobre él.

Bagdon, et al. (2000), en trabajos realizados por el USDA, reportan estudios sobre la eficiencia de los biofiltros en la remoción de plaguicidas en agua de escorrentía superficial. Indican que el aumento en la infiltración del agua es el factor que de mejor manera permite explicar la reducción de plaguicidas en ella. Sus resultados son corroborados por investigadores de Washington State University (2006, <http://pnw-ag.wsu.edu/AgHorizons/index.htm>), quienes señalan que, para mejorar la eficiencia en la remoción de plaguicidas solubles, un factor importante es propiciar la infiltración del agua o maximizar la superficie de contacto (escorrentía–suelo–vegetación), lo cual facilita la adsorción del contaminante. Estos últimos autores señalan, además, que la masa de raíces de árboles o arbustos permite el establecimiento de microorganismos comunes en el suelo, capaces de degradar las cadenas carbonadas que conforman los plaguicidas y utilizarlas como fuentes de carbono para sus procesos metabólicos.

Los resultados permiten concluir que el mayor problema de los residuos de plaguicidas corresponde al grupo de los residuales aplicados al suelo durante la temporada de riego.

A continuación se presenta en forma detallada el comportamiento de los plaguicidas residuales (Metolaclo, Clorpirifos y Atrazina) durante las tres temporadas de primavera–verano evaluadas (2004/05; 2005/06 y 2006/07) y la eficiencia de los biofiltros en su reducción.

Metolaclor

Movilidad en el agua de riego

Herbicida ampliamente empleado en numerosos cultivos, especialmente en maíz, para el control de malezas gramíneas. Presenta una moderada persistencia en el suelo. Sin embargo, posee una alta persistencia en el agua, con una vida media superior a 200 días en ella.

El nivel de “traza” definido es de 0,18 µg/l, mientras que el nivel de “no detección” es de 0,09 µg/l, para los residuos en el agua de riego. En la que ingresó a los potreros en los módulos en estudio, las concentraciones de Metolaclor encontradas correspondieron sólo a nivel de trazas. La única excepción fue una muestra tomada en Chimbarongo durante la temporada de riego 2006/07, que superó este límite e incrementó el promedio. La concentración del mismo ingrediente activo en el agua de riego al ingreso del área de biofiltros delata un importante incremento (cuadro 18). Los valores promedio fluctúan entre 4,4 y 7,3 µg/l, niveles superiores en 2.594 y 5.741% (4.385% más, en promedio de todas las mediciones) respecto al agua antes de pasar por el potrero.

Cuadro 18. Concentración de Metolaclor (µg/l) en el agua de riego al ingreso a potrero y al área de biofiltros. Promedio de tres temporadas.

Módulo	Ingreso a potrero (µg/l)	Ingreso al área de biofiltros (µg/l)	Incremento de Metolaclor en relación al ingreso a potrero (%)
Chimbarongo	0,272	7,326	2.594
San Fernando	0,092	5,374	5.741
Curicó*	0,090	4,429	4.821
Promedio	0,151	5,710	4.385

*Se registró información sólo en la temporada 2006/07.

Las cifras evidencian que los residuos de Metolaclor se transportan fácilmente en el agua de riego, contaminando cursos de agua y acuíferos subterráneos, con los consiguientes riesgos para el ambiente y la salud humana. Como se aplica normalmente de presiembra incorporado, la mayor parte de este ingrediente activo es transportado en el primer riego. Por tanto, resulta vital que los productores tomen las debidas precauciones: emplear las dosis adecuadas y trabajar con equipos en buenas condiciones de operación, debidamente regulados. En la figura 17, donde se grafica la situación descrita, queda claramente establecido que los incrementos se manifiestan principalmente en los primeros muestreos, en estrecho vínculo con la época de aplicación.

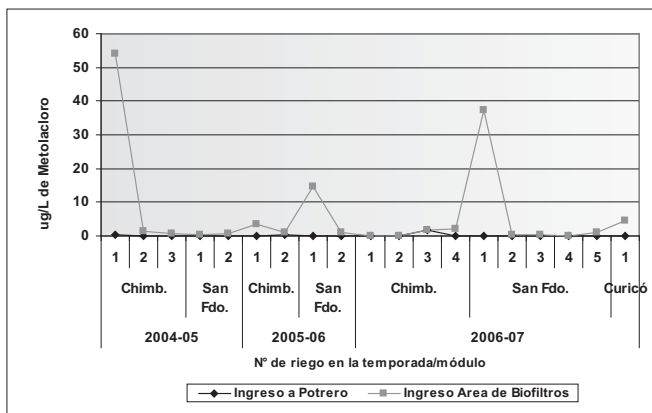


Figura 17. Concentración de Metolaclor ($\mu\text{g/l}$), en el agua de riego al ingreso del potrero y del área de biofiltro, en cada evento de riego, para las tres temporadas en los tres módulos en que se empleó este Ingrediente Activo.

El cuadro 19 indica la concentración de Metolaclor a la salida de los biofiltros, en las tres temporadas de evaluación. Al contrastarla con la carga de ingreso es posible estimar la eficiencia en la reducción de la concentración de este plaguicida.

Módulo	Concentración de Metolaclor ($\mu\text{g/l}$) en el agua de riego al ingreso del área de biofiltros			Concentración de Metolaclor ($\mu\text{g/l}$) en el agua de riego a la salida de BF1			Concentración de Metolaclor ($\mu\text{g/l}$) en el agua de riego a la salida de BF2			Eficiencia en la remoción de Metolaclor en BF1 (%)			Eficiencia en la remoción de Metolaclor en BF2 (%)			Eficiencia promedio en la remoción de Metolaclor (%)	
	2004/05	2005/06	2006/07	2004/05	2005/06	2006/07	2004/05	2005/06	2006/07	2004/05	2005/06	2006/07	2004/05	2005/06	2006/07	BF1	BF2
Chimbarongo	18,70	2,27	1,007	10,32	0,36	0,69	11,18	0,84	0,54	44,8	84,1	31,5	40,2	63,0	46,4	53,5	49,9
San Fernando	0,42	7,90	7,8	0,14	17,53	6,54	0,31	7,04	6,73	66,7	0,0	16,2	26,4	10,9	13,7	27,6	17,0
Promedio										55,8	42,1	23,8	33,3	36,9	30,0	40,6	33,4

Cuadro 19. Concentración de Metolaclor ($\mu\text{g/l}$) al ingreso y salida del área de biofiltros, y eficiencia de los biofiltros en su remoción (%).

El cuadro 19 señala que el BF₁, conformado por una estrata herbácea y otra arbustiva y/o arbórea, presenta en promedio una eficiencia de un 40,6%. La cifra es superior al BF₂, constituido sólo por una pradera, cuya eficiencia alcanza al 33,4%. La eficiencia lograda por ambos biofiltros en la remoción de este contaminante se considera como media.

Rango de funcionamiento de los biofiltros para Metolaclor

Con la finalidad de definir la eficiencia de los biofiltros en la reducción de Metolaclor según la concentración en el agua, se estableció una regresión entre las dos variables, que arrojó la siguiente ecuación:

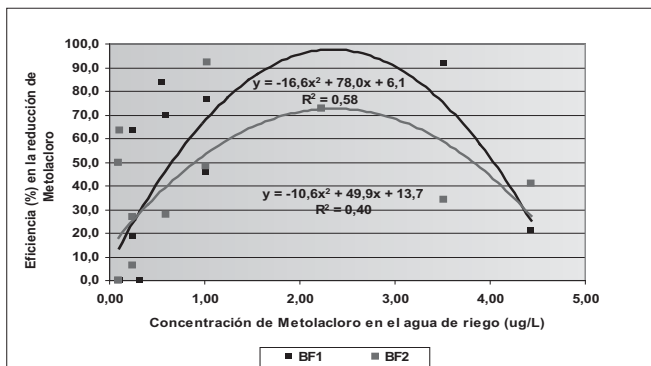


Figura 18. Eficiencia en la reducción de Metolacloro, según su concentración en el agua de riego.

Al integrar todos los registros, se evidencia que el BF₁ presenta una mayor eficiencia, pudiendo llegar a un máximo de un 96%, mientras que el BF₂ puede lograr sólo un 72%. Ambos alcanzan su mejor nivel cuando la concentración de Metolacloro en el agua de riego fluctúa entre 2 y 3 µg/l, disminuyendo hacia ambos extremos.

La mayor eficiencia de BF₁ se puede explicar porque corresponde a una asociación vegetal conformada por al menos dos estratas. En ellas se encuentra un mayor volumen de raíces, especialmente en profundidad, lo que da al suelo una mayor capacidad de infiltración del agua en su perfil. Este proceso facilita la remoción de los residuos que viajan adsorbidos a partículas sólidas o materia orgánica y se produce una depositación en capas superficiales del suelo, con la consecuente remoción del ingrediente activo del sistema.

Clorpirifos

Movilidad en el agua de riego

Insecticida muy utilizado en numerosos cultivos, sobre todo para el control de insectos del suelo. Su permanencia en el agua depende más que nada de su formulación: es mayor cuando se aplica como emulsión concentrada o polvo mojable. Sin embargo, se pierde rápidamente por volatilización y fotólisis; en general es inestable en agua.

El nivel de "traza" definido es de 0,013 µg/l, mientras que el nivel de "no detección" es de 0,0065 µg/l, para los residuos encontrados en el agua de riego.

Durante todos los muestreos, sólo en Requínoa el agua que ingresaba al potrero presentó niveles inferiores al determinado como "traza". En las otras localidades en varias oportunidades el agua que accedía al potrero presentó niveles superiores a 0,013 µg/l. El promedio de todas las temporadas llegó a 0,032 µg/l. Es decir que, a pesar de ser considerado, por sus propiedades físicas y químicas, como de baja probabilidad de movilizarse en el agua de riego, este ingrediente activo es transportado desde predios o potreros contiguos. El amplio uso del insecticida Clorpirifos en estas regiones constituye la causa más probable del fenómeno (cuadro 20).

Cuadro 20. Concentración promedio de Clorpirifos ($\mu\text{g/l}$) en el agua de riego al ingreso a potrero y al área de biofiltros. Promedio de tres temporadas.

Módulo	Ingreso a potrero ($\mu\text{g/l}$)	Ingreso al área de biofiltros ($\mu\text{g/l}$)	Incremento Clorpirifos (%)
Pichidegua	0,056	0,082	46
S. Familia	0,019	0,169	784
Requinoa	0,010	0,055	466
Chimbarongo	0,078	0,133	70
San Fernando	0,018	0,064	262
Teno	0,027	0,058	110
Curicó	0,018	0,281	1.432
Promedio	0,032	0,120	453

La concentración de Clorpirifos tiene un importante incremento entre el ingreso del agua de riego al potrero y su llegada al área de biofiltros. El cuadro 20 evidencia valores promedio que fluctúan entre 0,055 y 0,281 $\mu\text{g/l}$, lo cual representa aumentos entre 46 y 1.432% respecto de lo detectado al inicio, con un promedio en todos los módulos de un 453%. Los mayores incrementos se alcanzan en Sagrada Familia, Chimbarongo y Curicó, predios donde se cultiva maíz y maravilla, con aplicaciones importantes para el control de insectos del suelo.

Los resultados revelan que, a pesar de sus propiedades, este ingrediente activo se moviliza en el agua de riego, probablemente adsorbido a las partículas del suelo, con los riesgos ambientales que ello implica dado su masivo uso como insecticida, especialmente aplicado al suelo. Se pudo observar que la mayor cantidad es transportada en el primer riego luego de su aplicación, como se grafica en la figura 19.

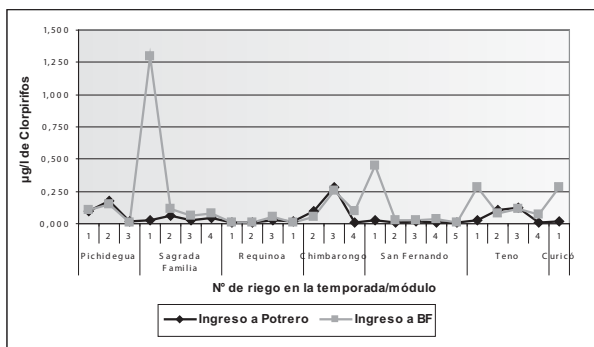


Figura 19. Concentración de Clorpirifos ($\mu\text{g/l}$) en el agua de riego al ingreso del potrero y del área de biofiltros, en cada evento de riego, para la temporada 2006/07.

El cuadro 21 presenta la concentración promedio de Clorpirifos al ingreso y salida del área de biofiltros, así como la eficiencia de éstos en la remoción del ingrediente activo en las tres temporadas de evaluación.

Cuadro 21. Concentración de Clorpirrifos ($\mu\text{g/l}$) al ingreso y salida del área de biofiltros, y eficiencia de los biofiltros en su reducción (%).

Módulo	Concentración de Clorpirrifos ($\mu\text{g/l}$) en el agua de riego al ingreso del área de biofiltros		Concentración de Clorpirrifos ($\mu\text{g/l}$) en el agua de riego a la salida de BF1		Concentración de Clorpirrifos ($\mu\text{g/l}$) en el agua de riego a la salida de BF2		Eficiencia en la remoción de Clorpirrifos en BF1 (%)			Eficiencia en la remoción de Clorpirrifos en BF2 (%)		Eficiencia promedio en la remoción de Clorpirrifos (%)				
	2004-05	2005-06	2004-05	2005-06	2004-05	2005-06	2004-05	2005-06	2006-07	2004-05	2005-06	2006-07	BF1	BF2		
Pichidegua	0,017	0,141	0,011	0,032	0,056	0,056	0,011	0,056	35,3	77,3	36,4	35,3	60,3	14,8	49,7	36,8
S. Familia	0,078	0,042	0,040	0,004	0,022	0,022	0,037	0,022	48,7	90,5	94,3	52,6	47,6	63,9	77,8	54,7
Requinoa	0,138	0,007	1,422	0,007	0,007	0,007	1,213	0,007	0,0	-	68,2	0,0	-	63,6	34,1	31,8
Chimbarongo	0,231	0,061	0,090	0,009	0,038	0,038	0,093	0,038	61,0	85,2	63,8	59,7	37,7	59,0	70,0	52,2
San Fernando	0,017	0,064	0,013	0,113	0,059	0,059	0,017	0,059	23,5	0,0	46,4	0,0	7,8	10,0	23,3	5,9
Teno	0,010	0,026	0,010	0,053	0,100	0,100	0,005	0,100	-	0,0	27,0	50,0	0,0	7,3	13,5	19,1
Promedio									33,7	50,6	56,0	32,9	30,7	36,4	44,7	33,4

En el cuadro 21 se aprecia la mayor eficiencia en la remoción de Clorpirifos en el BF₁, con un 44,7%. Supera al BF₂, constituido sólo por una pradera, que alcanzó una eficiencia de 33,4%. La eficiencia de ambos biofiltros se puede considerar como media.

Rango de funcionamiento de los biofiltros para Clorpirifos

La relación entre la eficiencia de los biofiltros en la reducción de Clorpirifos y su concentración en el agua, permite establecer una regresión entre las dos variables, que arroja la ecuación ilustrada en la figura 20.

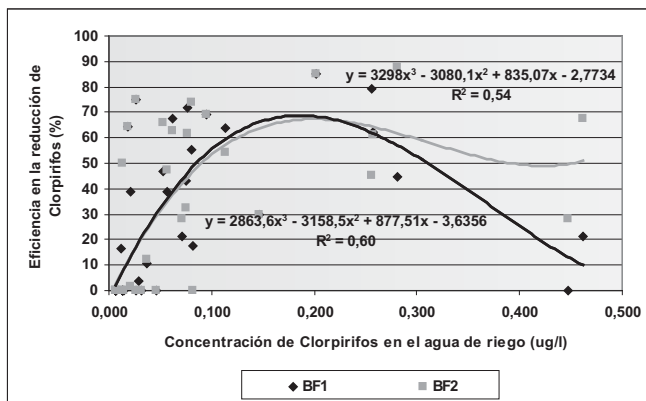


Figura 20. Eficiencia en la reducción de Clorpirifos, según su concentración en el agua de riego.

La imagen muestra una eficiencia para reducir el Clorpirifos del agua de riego muy similar en ambos biofiltros. El máximo de aproximadamente un 70% se logra cuando las concentraciones del ingrediente activo en el agua de riego fluctúan entre 0,15 y 0,25 µg/l, disminuyendo hacia ambos extremos.

Atrazina

Movilidad en el agua de riego

Este herbicida, en la actualidad, es la base para el control de malezas del maíz. Por ello los productores del cereal lo utilizan ampliamente. Es soluble en agua y, en consecuencia, presenta una alta probabilidad de movilizarse a través de ella. Sin embargo, se degrada rápidamente en el agua, por hidrólisis.

Para los residuos encontrados en el agua de riego, el nivel de “traza” definido es de 0,80 µg/l; el de “no detección”, 0,40 µg/l.

El cuadro 22 muestra que el contenido de Atrazina en el agua que ingresa al potrero en evaluación en los módulos de Sagrada Familia y San Fernando, en promedio, no superó el nivel de “traza”. En Pichidegua este límite se superó en forma leve, debido probablemente a que en el predio se siembra una superficie importante de maíz, del orden de 800 hectáreas, y el control de malezas se hace sobre la base de aplicaciones de Atrazina y Acetoclor.

Cuadro 22. Concentración promedio de Atrazina ($\mu\text{g/l}$) en el agua de riego al ingreso a potrero y al área de biofiltros.

Módulo	Ingreso a potrero ($\mu\text{g/l}$)	Ingreso al área de biofiltros ($\mu\text{g/l}$)	Incremento de Atrazina (%)
Pichidegua	0,842	0,878	4
Sagrada Familia	0,640	1,313	105
San Fernando	0,494	7,781	1.475
Promedio	0,659	3,324	528

Se contrastó la concentración de Atrazina en el agua de riego que accede al potrero en evaluación con aquella en la que ingresa al área de biofiltros, luego de atravesar el sector de cultivos. En los módulos de San Fernando y Sagrada Familia se apreció un incremento importante en la concentración de este ingrediente activo en el agua de riego: 1.475% y 105%, respectivamente. El gran aumento observado en San Fernando se podría explicar porque en este predio, a diferencia de los otros dos, se hacen dos aplicaciones de Atrazina al cultivo del maíz, la primera en forma de Primagram de presiembra incorporado y la segunda como Atrazina propiamente tal, de postemergencia temprana.

La literatura indica que la Atrazina es un compuesto que sufre transformaciones en su molécula, convirtiéndola en metabolitos que no fueron analizados y que podrían explicar el comportamiento en el módulo de Pichidegua. Allí no se detectaron grandes diferencias en su concentración en el agua que ingresa y sale del potrero. En este predio se riega en mezcla con purines de cerdo y su elevado nivel de materia orgánica podría inmovilizar este residuo.

Las características ya señaladas de Atrazina en cuanto a hidrolizarse rápidamente en el agua y sufrir transformaciones, hacen difícil encontrar esta molécula como tal. Del análisis de la figura 21 se deduce que en general la Atrazina se moviliza luego del primer riego del cultivo, pues se aplica normalmente de presiembra incorporado, siendo posible su determinación sólo en este evento. En el resto de los riegos la concentración de Atrazina en el agua al ingreso del área de biofiltros es similar a la determinada en el momento de acceder al potrero.

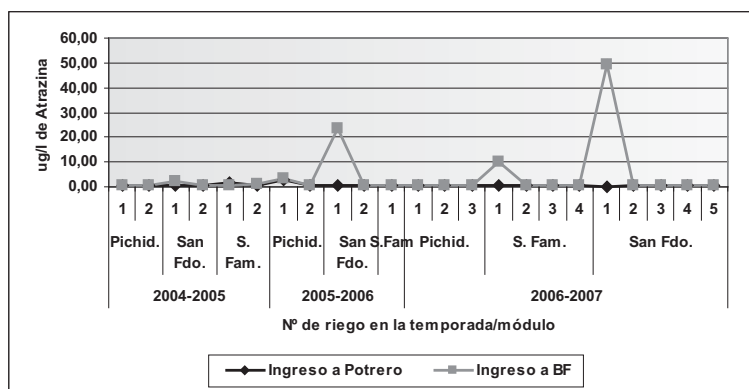


Figura 21. Concentración de Atrazina ($\mu\text{g/l}$), en el agua de riego al ingreso del potrero y del área de biofiltros, en cada evento de riego, en tres temporadas.

El cuadro 23 detalla la concentración promedio de Atrazina al ingreso y salida del área de biofiltros, así como la eficiencia de éstos en la remoción de este ingrediente activo, en las tres temporadas de evaluación.

Cuadro 23. Concentración de Atrazina ($\mu\text{g/l}$) al ingreso y salida del área de biofiltros, y eficiencia de los biofiltros en su reducción (%).

Módulo	Concentración de Atrazina ($\mu\text{g/l}$) en el agua de riego al ingreso del área de biofiltros		Concentración de Atrazina ($\mu\text{g/l}$) en el agua de riego a salida de BF1		Concentración de Atrazina ($\mu\text{g/l}$) en el agua de riego a salida de BF2		Eficiencia en la remoción de Atrazina en BF1 (%)			Eficiencia en la remoción de Atrazina en BF2 (%)			Eficiencia promedio en la remoción de Atrazina (%)				
	2004/05	2005/06	2006/07	2004/05	2005/06	2006/07	2004/05	2005/06	2006/07	2004/05	2005/06	2006/07	2004/05	2005/06	2006/07	BF1	BF2
Pichidegua	0,400	1,833	0,400	0,400	3,965	0,400	0,400	2,200	0,400	-	0,0	-	-	0,0	-	0,0	0,0
S. Familia	0,648	0,400	2,890	0,769	0,400	2,000	0,600	0,400	2,435	0,0	-	30,8	7,4	-	15,7	15,4	11,6
San Fernando	1,207	11,988	10,140	0,479	30,767	10,140	0,479	7,431	6,671	60,3	0,0	0,0	60,3	38,1	34,2	20,1	44,2
Promedio							30,2	0,0	15,4	33,9	19,0	25,0	11,8	18,6			

Salvo en algunas localidades, en general los biofiltros alcanzan una baja eficiencia en la reducción de Atrazina. Luego de tres temporadas de evaluación, la eficiencia promedio fluctuó entre 11,8% y 18,6% en el BF₁ y BF₂, respectivamente. En Pichidegua se logró una eficiencia de 0%. Por las características de este ingrediente activo, de rápida hidrólisis en el agua, la analítica de la molécula de Atrazina pareciera ser no muy adecuada y se debe investigar algunos metabolitos derivados de ella (**Mahía y Díaz-Raviña, 2007**).

6.5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas al estudiar los residuos de plaguicidas en el agua de riego y la eficiencia de los biofiltros en la reducción de su concentración, se sintetizan a continuación:

- Una parte de los plaguicidas no residuales cae al suelo luego de su aplicación y es degradada rápidamente, inactivada por acción de luz solar o bien se pierde en profundidad junto al movimiento del agua y no alcanza a llegar al área de los biofiltros. Son detectados sólo en un 50% de las muestras durante la temporada de riego, y en un 25% en las aguas lluvia de invierno.
- Las concentraciones en el agua de riego de aquellos plaguicidas aplicados al follaje superan ligeramente los límites mínimos de cuantificación o trazas. En la temporada de invierno, en promedio, su concentración disminuye en un 59,4%.
- La eficiencia de los biofiltros para reducir la concentración de plaguicidas no residuales en el agua de riego se considera baja; entre 10,5% y 18,6%, para BF₁ y BF₂, respectivamente, dado que su concentración es reducida. No se estimó conveniente calcular la eficiencia de los biofiltros para reducir estos contaminante en las aguas lluvia de invierno, pues las concentraciones de sus residuos es muy pequeña, cercana al límite de cuantificación.
- Los plaguicidas residuales, aplicados al suelo, son detectados en el 66,7% de las muestras tomadas en el agua de riego y sólo en el 22,4% de aquellas tomadas en las aguas lluvia durante el invierno. Sus niveles en el agua lluvia que escurre en los predios fueron mínimos, cercanos al límite de cuantificación. La baja en su concentración respecto de los niveles encontrados en el agua de riego correspondió a un 69,6%.
- La eficiencia promedio de los biofiltros en la disminución de plaguicidas residuales, incluyendo las temporadas de riego y de lluvias, se ubica en 40,3% en el BF₁ y en 33,5% en el BF₂. Tanto en el agua de riego como de lluvia, el BF₁ resultó más eficiente en el abatimiento de prácticamente todos los ingredientes activos. Ello se debe a que está conformado por al menos dos estratas, con sistemas radiculares de diferente profundidad, lo cual permite mejorar la porosidad del suelo y por tanto la infiltración del agua y la captura de los contaminantes disueltos.
- Las mayores eficiencias se logran con aquellos productos que presentan mayor solubilidad y movilidad en el agua de riego, como Metolaclor y Clorpirifos, con eficiencias de 40,6% y 44,7%, respectivamente.
- El bajo número de muestras en que fue posible detectar estos ingredientes activos durante el invierno y su mínima concentración en las aguas lluvias que escurren en el predio, permiten concluir que el problema de los residuos de plaguicidas adquiere su real importancia durante las temporadas de riego.
- Los biofiltros son una buena herramienta para reducir el nivel de residuos de plaguicidas contenidos en el agua de riego y se pueden considerar como una "buena práctica agrícola".

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

MAHÍA, J. and DÍAZ-RAVIÑA, M. 2007. Atrazine degradation and residues distribution in two acid soils from temperate humid zone. *Journal of Environmental Quality* 36:826-831.

THE AGROCHEMICALS HANDBOOKS. 1990. Propiedades físico-químicas de los ingredientes activos de los plaguicidas. www.extoxnet.com