



Asociación de Universidades  
GRUPO MONTEVIDEO



## II Congreso de Agua Ambiente y Energía, AUGM

### Aplicación del modelo SWAT en estudios de la presencia de glifosato en escorrentías rurales en una subcuenca del río Santa Lucía

Eliana Nervi <sup>a,b</sup>, Angela Gorgoglione <sup>c</sup>, R. Willem Vervoort <sup>d</sup>, Victor Sposito <sup>a</sup>, Robert Faggian <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Deakin University, School of Science, Engineering and Built Environment, Australia, [eliananervi@gmail.com](mailto:eliananervi@gmail.com),  
[v.sposito@deakin.edu.au](mailto:v.sposito@deakin.edu.au), [r.faggian@deakin.edu.au](mailto:r.faggian@deakin.edu.au).

<sup>b</sup> Universidad ORT, Laboratorio de Biotecnología, Uruguay, [eliananervi@gmail.com](mailto:eliananervi@gmail.com).

<sup>c</sup> Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, IMFLA, Uruguay, [agorgoglione@fing.edu.uy](mailto:agorgoglione@fing.edu.uy).

<sup>d</sup> University of Sydney, School of Life and Environmental Sciences, Australia, [willem.vervoort@sydney.edu.au](mailto:willem.vervoort@sydney.edu.au).

**RESUMEN:** La escorrentía de fuentes difusas representa gran parte las descargas de nutrientes y pesticidas hacia los ecosistemas de agua dulce. En particular, el herbicida glifosato constituye el pesticida más extensamente aplicado en Uruguay desde la introducción de cultivos genéticamente modificados con tolerancia al mismo. Escasos estudios existen en nuestro país acerca de su movimiento una vez aplicado. De ser posible confinar aguas de escorrentía, podrían utilizarse microorganismos como agentes de remediación de pesticidas (bio-remediación), inmovilizándolos en matrices inertes que permitan su posterior remoción. En el presente trabajo se evaluó la utilidad del modelo hidrológico SWAT (*Soil Water Assessment Tool*) en el direccionamiento de estrategias de biorremediación de glifosato presente en aguas de escorrentía. Se logró correr, calibrar y validar el modelo SWAT en una subcuenca del río Santa Lucía. Fue posible localizar áreas de interés en la zona media-baja, en donde el glifosato fue exportado en mayores cantidades en comparación a otros sitios de la cuenca durante una simulación de 12 años (2000-2012). Dichos sitios resultan de interés para el futuro diseño de posibles estrategias de bio-remediación utilizando bacterias capaces de crecer en presencia de glifosato las cuales fueron previamente aisladas e identificadas a partir de suelos sojeros de la zona.

**PALABRAS CLAVE:** Glifosato, SWAT, Biorremediación, Río Santa Lucía

### 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos 15 años, la agricultura en Uruguay se ha expandido, acompañada de mejoras tecnológicas como la siembra directa, el cultivo de variedades resistentes a pesticidas y una demanda externa creciente. En particular, se ha reportado una relación directa entre el área de la soja y las aplicaciones herbicidas en Uruguay, [1]. El glifosato es un herbicida de amplio espectro que se utiliza para el control de malezas en cultivos, barbecho químico y la eliminación de malezas en áreas urbanas. Debido a su uso extensivo y prácticas de aplicación inadecuadas, se ha reportado su presencia constante en ambientes acuáticos, siendo la escorrentía la vía de transporte más frecuente [2]. Problemáticas asociadas al deterioro de la calidad del agua han sido expuestas en los últimos 10 años, principalmente en la cuenca del río Santa Lucía, la cual constituye el reservorio del agua potable más utilizado del país [3, 4]. Por lo tanto, estrategias que promuevan la reducción de pesticidas en el ambiente son necesarias.

La eliminación de contaminantes en el ambiente puede realizarse por medios físicos, químicos o biológicos, siendo este último de especial interés debido a su bajo costo y su bajo efecto adverso

sobre el medio ambiente. La bio-remediación es el uso de agentes biológicos para recuperar suelos y aguas contaminadas por sustancias peligrosas para la salud humana y/o el medio ambiente [5]. Ha sido reportado que varias cepas bacterianas pueden degradar el glifosato, ya que es un derivado del aminoácido glicina [6]. A pesar de las problemáticas mencionadas, la detección y el estudio del movimiento del glifosato en el agua, los suelos y los sedimentos en áreas agrícolas y no agrícolas sigue siendo escaso en Uruguay.

El presente estudio propone la utilización del modelo SWAT en una subcuenca del río Santa Lucía, para estudiar el transporte del glifosato e identificar zonas de impacto en dónde podrían implementarse futuros sistemas de bio-remediación del pesticida.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Área de estudio y recolección de datos

El presente estudio se llevó a cabo en la cuenca del río Santa Lucía que está ubicada en la región sur de Uruguay (Fig.1). La región de estudio ocupa 1692 km<sup>2</sup> e incluye a la represa de Paso Severino con 70 millones de m<sup>3</sup>, la cual trabaja en demanda de la planta de potabilización de Aguas Corrientes, ubicada aguas abajo. Para este estudio, se utilizaron cuatro grupos principales de datos: datos meteorológicos (precipitación y clima), datos hidrológicos (caudal), características de la cuenca (DEM, suelo y uso de suelo), calidad de agua (glifosato, sólidos totales en suspensión).

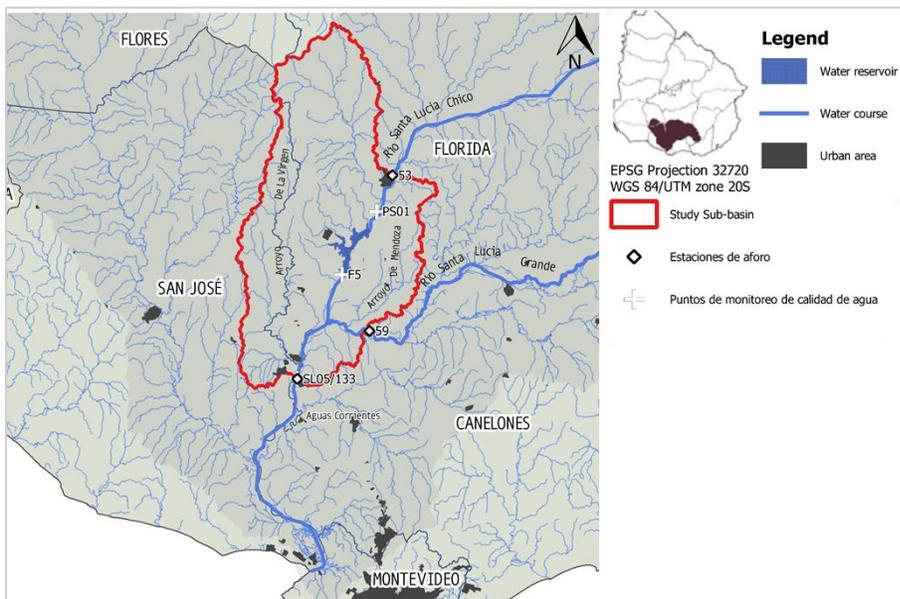


Figura 1. Cuenca de estudio en la cuenca del río Santa Lucía.

### 2.2 Implementación del modelo SWAT

Se seleccionó la versión del modelo SWAT 2012 y su interface QSWAT. SWAT es un modelo en el que el balance de agua es la fuerza impulsora detrás de cada proceso. Por lo tanto, el ciclo hidrológico juega un papel clave en las predicciones de movimiento de pesticidas y nutrientes a lo largo de la cuenca.

El área de estudio fue delimitada en 11 subcuencas utilizando un límite de 90 km<sup>2</sup>. Un total de 11

unidades hidrológicas de respuesta domin fueron definidas bajo la superposición de mapas de topografía, tipo de suelo y uso de suelo con un límite de 5% de cobertura para eliminar pendientes menores, tipos y usos de suelo no representativos. Se seleccionó una unidad dominante para cada subcuenca. El intervalo de ejecución se determinó utilizando el período más largo para el que se disponía de datos de clima y datos de caudal de entrada, desde 1997 al 2012, con los primeros tres años de calentamiento. El método seleccionado para la estimación de esocorrentías de superficie fue el de número de curva. Para el direccionamiento de flujo de agua se utilizó el método de Muskingum. Además, los resultados del modelo fueron evaluados mensualmente. Se utilizaron la eficiencia de Kling-Gupta (KGE), la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS) y el porcentaje de sesgo (PBIAS) para evaluar la performance del modelo.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Simulación de caudal

La calibración y validación mensual hidrológica fueron exitosas. Los parámetros de salida fueron calibrados mediante una calibración estocástica utilizando SWAT-CUP y el algoritmo SUFI-2 en el punto de salida de la cuenca, incluyendo los parámetros más importantes en el balance de agua, limitando la calibración a los procesos hidrológicos en sí (en el suelo, el agua subterránea, esocorrentía y flujo de los cauces). Luego de la calibración, el modelo fue validado para el período siguiente. Los parámetros fueron iterados 500 veces por SWAT-CUP, considerando un rango de variabilidad factible [7]. Los parámetros con mayor sensibilidad, sus rangos de variabilidad y los mejores valores ajustados se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros utilizados para la calibración mensual de salida de cuencas. Variación inicial y valor ajustado.

Variable	Descripción	*	Valor Mín	Valor Máx	Valor ajustado
CN2.mgt (AGRL)	Número de curva para agricultura genérica	r	-0.30	0.05	-0.11
CN2.mgt (GRASS)	Número de curva para pasturas	r	-0.17	0.14	-0.01
GWQMN.gw	Umbral de profundidad del acuífero para que ocurra el flujo de retorno	a	2571.81	5000.00	4215.69
ESCO.hru	Factor de compensación de la evaporación del suelo	v	0.26	0.78	0.41
CH_K2.rte	Conductividad hidráulica efectiva para los canales principales	a	28.17	96.08	43.18
RES_RR.res	Descarga promedio diario del embalse	r	-0.50	0.50	-0.07
SURLAG.bsn	Coefficiente de retardo de la esocorrentía superficial	a	2.73	8.24	7.92
OV_N.hru	Coefficiente n de Manning de la superficie de la tierra	v	0.30	0.46	0.36

\* Método de variación utilizado (a-Absoluto, significa que un valor dado se agrega al valor del parámetro existente, v-Variación, significa que el valor del parámetro existente debe ser reemplazado por un valor dado, r-Relativo, significa que el valor del parámetro existente se multiplica por (1+ un valor dado).

Según lo reportado por Abbaspour, Johnson and van Genuchten (2010), un modelo debe considerarse satisfactorio cuando es calibrado por SUFI-2 cuando  $R^2$  es mayor que 0.80 [8]. Por otra parte, Abbaspour (2015) sugiere para una calibración de flujo de corriente aceptable, valores de factor p superiores a 0.70 y factor r inferiores a 1.50 [9]. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la

calibración y validación del modelo resultaron muy buena para el período 2000-2006 (calibración) y 2007-2012 (validación) respectivamente, en la salida de la cuenca (Fig. 2). Sin embargo, solo el 45% de los datos observados se encuentran dentro de los límites de incertidumbre del 95% (95PPU). Esto podría deberse a la leve sobreestimación del caudal en algunos de los meses. De acuerdo con Moriasi *et al.*, 2007, la calibración hidrológica se consideró exitosa [10].

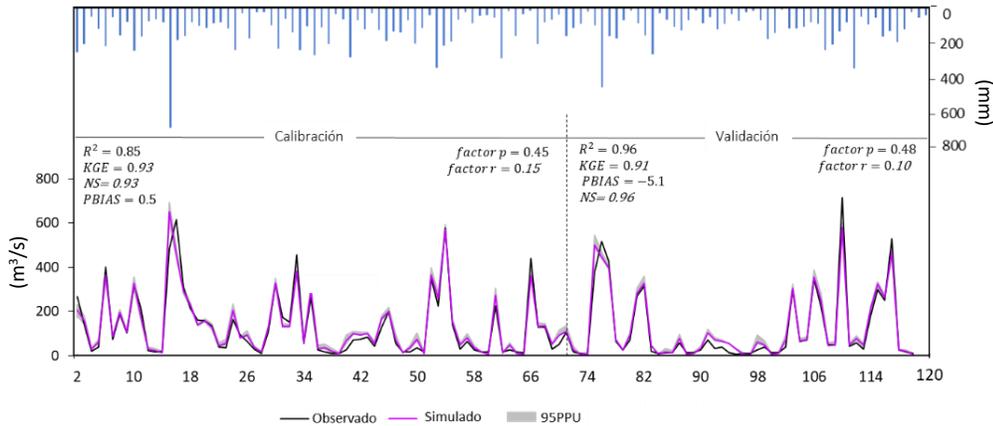


Figura 2. Hidrograma mensual simulado y observado en la salida de la cuenca. Izquierda, calibración (2000-2006); y derecha, validación (2007-2012). Arriba, promedio de precipitaciones mensuales.

### 3.2 Simulación de calidad de agua

Considerando los escasos datos de calidad de agua disponibles, se procedió a realizar una calibración cualitativa del modelo, utilizando comparaciones sugeridas por Bennett *et al.* (2013) [11]. Se utilizaron los sólidos totales en suspensión (TSS) simulados, y registros publicados del año 2009 como referencia [12]. La calibración manual de TSS resultó exitosa al comparar la concentración de los sólidos totales en suspensión promedio obtenidos para dicho año de referencia (Fig. 3).

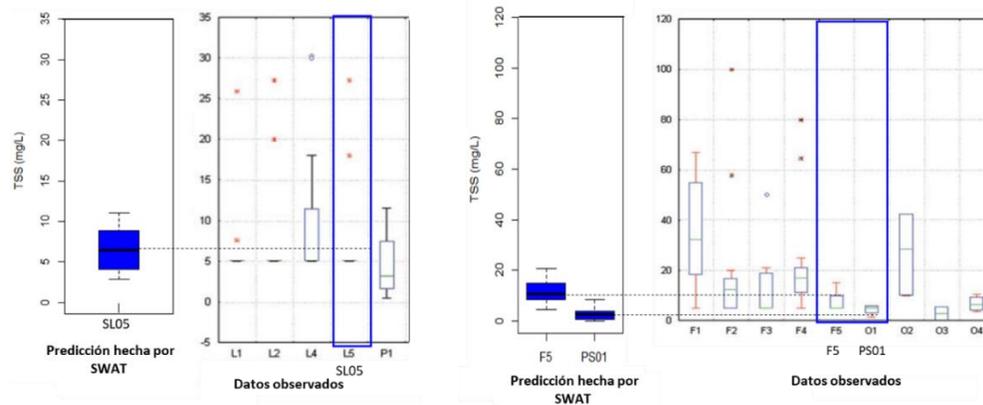


Figura 3. Concentraciones de sólidos totales en suspensión (TSS) en 2009 en puntos de monitoreo SL05, F5 y PS01.

Registros en un período más extenso serían necesarios para obtener mejores resultados, ya que la concentración de sedimentos está directamente relacionada con el transporte de glifosato en las escorrentías [13]. También se realizó la comparación de los valores de glifosato registrados en el cauce en el punto de salida de la cuenca durante el período 2013-2017, con los de salida del mo-

delo, observándose valores promedio de entre 0-1  $\mu\text{g/L}$  en ambos casos, aunque los períodos evaluados no fueran coincidentes. El monitoreo regular de los cursos de agua de manera de determinar concentraciones de glifosato en condiciones de alto flujo sería necesario, por ejemplo, durante lluvias, de manera de obtener datos más representativos de lo que realmente ocurre. En cada evento de lluvia existen muchos factores que influyen en las cantidades de glifosato en escorrentías. Por lo tanto, tal vez las medidas presenten un sesgo de acuerdo a las condiciones presentes y previas en las que son tomadas (aplicaciones, precipitaciones previas y caudal). Se observó una mayor concentración de glifosato en el río durante los meses correspondientes plantaciones de verano (Setiembre-mayo), para los cuales se aplican cantidades mayores de glifosato en comparación a los cultivos de invierno. Dicho resultado fue además concordante con el manejo de cultivos asignado al modelo. A pesar de lo mencionado anteriormente, el modelo fue considerado confiable y preciso para continuar con el análisis, considerando al agua como el agente de cambio principal en el sistema.

### 3.3 Identificación de puntos calientes de exportación de glifosato

El cálculo de cantidades totales de glifosato exportadas durante el período simulado permitió identificar puntos calientes de exportación a lo largo de la cuenca. Los valores máximos fueron concordantes con los valores más altos de coeficiente de escorrentía. Como resultado, la región media-baja de la cuenca podrían representar un peligro potencial debido a la alta exportación de glifosato que se produce (Fig. 4).

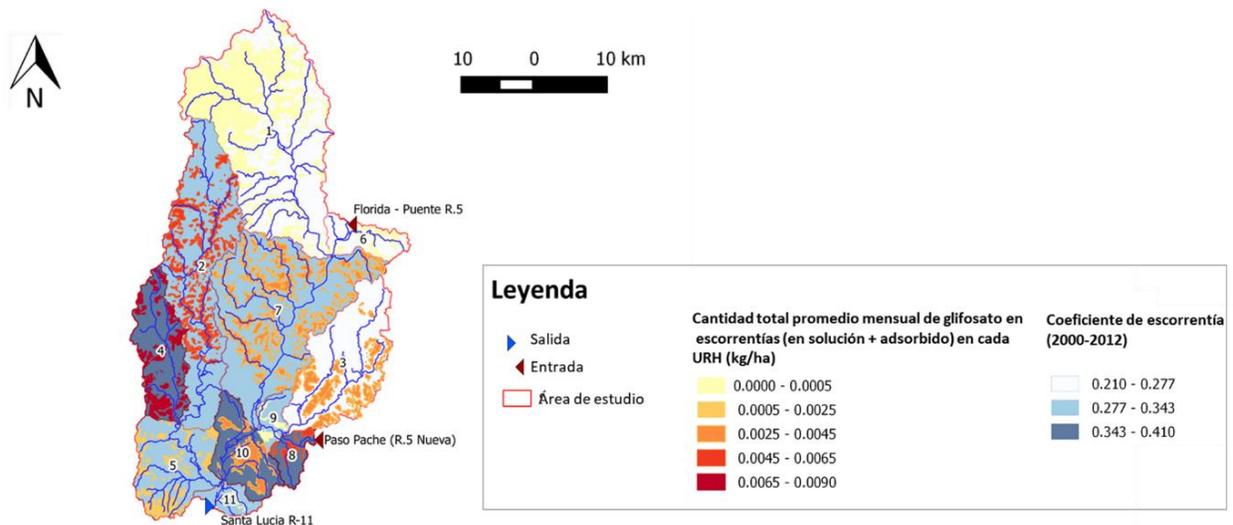


Figura 4. Mapeo de puntos calientes de exportación de glifosato en escorrentías simulado por SWAT (2000-2012).

Según el presente resultado, la URH #4 representa el área en dónde sería más adecuado llevar a cabo el diseño de un sistema de bio-remediación.

Es importante destacar que el modelado de pesticidas exige un alto nivel de complejidad ya que existen varios procesos que aún no son completamente comprendidos. Una mayor cantidad de datos asociados, como son el detalle de los eventos de aplicación y las cantidades aplicadas permitirían obtener resultados más representativos.

De manera complementaria, una vez identificadas las zonas de impacto, se realizaron pruebas de concepto del diseño de una estrategia para confinar aguas de escorrentía con el modelo *Storm Water Management Model* (SWMM), aplicando sistemas de desarrollo de bajo impacto, de su sigla

en inglés LID (*Low Impact Development*). Se seleccionó el evento de lluvia más extrema de la estación pluviométrica más cercana, considerando solo simulación de flujo. Se decidió trabajar con zanjas de vegetación y un tanque de almacenamiento a una escala de 4 ha en un área aleatoria dentro de la URH #4. En presencia de dicho sistema, el coeficiente de escorrentía disminuyó un 40% al inicio del evento, aunque no tuvo efecto durante el máximo pico de flujo.

Cabe destacar que el diseño si resultó ser resiliente a eventos simulados de lluvias promedio. Sin embargo, el interés principal radica en los eventos de lluvia más intensos, en dónde permitiría prevenir la llegada de escorrentías y su almacenamiento. Dicho diseño solo constituye una prueba conceptual, la cual no consideró una continuidad entre las dos escalas estudiadas.

#### 4 CONCLUSIÓN

Se logró calibrar y validar el modelo SWAT para el período 1997-2012 en el punto de salida de la cuenca. El acuerdo entre hidrogramas medidos y simulados resultó ser muy aceptable. Sin embargo, el desempeño de la parte de calidad del modelo se vio limitado por continuidad y accesibilidad de los datos de entrada. Con las consideraciones anteriormente mencionadas, fue posible utilizar el modelo SWAT en la región de la cuenca del río Santa Lucía para el estudio de concentraciones de glifosato en escorrentías superficiales, seleccionando la región del arroyo de la Virgen como área de interés para la implementación de sistemas de bio-remediación de glifosato. Sin embargo, el diseño de cómo se llevaría a cabo dicho diseño deberá ser sustancialmente mejorado.

#### REFERENCIAS

- [1] G. Catacora-Vargas, P. Galeano, S. Z. Agapito-Tenfen, D. Aranda, T. Palau, and R. Onofre Nodari, "Soybean Production in the Southern Cone of the Americas," p. 50, 2012.
- [2] R. Bonansea, I. Filippi, M. Amé, D. Wunderlin, and D. Marino, "The Fate of Glyphosate and AMPA in a Freshwater Endorheic Basin: An Ecotoxicological Risk Assessment," *Toxics*, vol. 6, no. 1, p. 3, 2017.
- [3] J. P. Pacheco *et al.*, "Evaluación del estado trófico de arroyos de la cuenca de Paso Severino mediante la utilización del índice biótico TSI-BI.," *Rev. Electrónica del Com. Medio Ambient.*, vol. 4, pp. 80–91, 2012.
- [4] L. E. Aubriot, "Evolución de la eutrofización en el Río Santa Lucía: influencia de la intensificación productiva y perspectivas," *Innotec*, vol. 14, no. 14, pp. 7–16, 2018.
- [5] Ravindra Singh, P. Singh, and R. Sharma, "Microorganism as a tool of bioremediation technology for cleaning waste and industrial water," *Biosci. Res.*, vol. 14, no. 3, pp. 633–644, 2014.
- [6] F. Hadi, A. Mousavi, K. A. Noghabi, H. G. Tabar, and A. H. Salmanian, "New bacterial strain of the genus *Ochrobactrum* with glyphosate-degrading activity," *J. Environ. Sci. Heal. - Part B Pestic. Food Contam. Agric. Wastes*, vol. 48, no. 3, pp. 208–213, 2013.
- [7] J. . Arnold *et al.*, "SWAT:Model Use, Calibration and Validation," *Trans. ASABE*, vol. 55, no. 4, pp. 1317–1335, 2013.
- [8] K. C. Abbaspour, C. A. Johnson, and M. T. van Genuchten, "Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure," *Vadose Zo. J.*, vol. 3, no. 4, p. 1340, 2010.
- [9] K. C. Abbaspour, "SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs- A User Manual, Department of Systems Analysis, Intergrated Assessment and Modelling (SIAM), EAWAG. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland.," *User Man.*, p. 100p, 2015.
- [10] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith, "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations," *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, vol. 50, no. 3, pp. 885–900, 2007.
- [11] N. D. Bennett *et al.*, "Characterising performance of environmental models," *Environ. Model. Softw.*, vol. 40, pp. 1–20, 2013.
- [12] DINAMA, "Informe Nacional del Estado del Ambiente -Uruguay 2009," 2009.
- [13] L. Saunders and R. Pezeshki, "Glyphosate in Runoff Waters and in the Root-Zone: A Review," *Toxics*, vol. 3, no. 4, pp. 462–480, 2015.