

# Modelación de nutrientes y evaluación de uso de suelo usando la herramienta de agua y suelo (SWAT), Caso de estudio: Cuenca del Río Coca

## *Nutrient modelling and land use assessment using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), Case study: Coca River Basin*

(Recepción 01/03/2019; Aceptación 25/06/2019)

Narváez M.<sup>1\*</sup>, López C.<sup>1</sup>, Reinoso I.<sup>1</sup>, Minaya V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escuela Politécnica Nacional, Ladrón de Guevara E11-253, Quito, Ecuador

\*Email: manuel.narvaez@epn.edu.ec

**Resumen.** La contaminación de los ríos con nutrientes por fuentes no puntuales es un problema grave a nivel mundial debido al cambio en el uso de la tierra y la mala gestión de los fertilizantes. Este estudio pretende evaluar las dinámicas del nitrógeno y fósforo en la cuenca del río Coca y cómo se comportarían en tres escenarios hipotéticos de cambio de cobertura y uso de suelo usando un modelo que integre tanto aspectos hidrológicos como las dinámicas de nutrientes. Los resultados revelan que en los escenarios BAU (Business As Usual) y DEG (degradación) existe un incremento significativo en las pérdidas de nutrientes del suelo, contribuyendo negativamente en la calidad del agua del río.

**Palabras clave.** calidad de agua; modelación de nutrientes; SWAT; mejores prácticas de manejo; ganadería; Ecuador.

**Abstract.** The river pollution with nutrients through non-point sources is a serious problem worldwide, mainly due to the land use change and poor management of fertilizers. This study aims to evaluate the nitrogen and phosphorus dynamics in the Coca River Basin and how they vary for three hypothetical land use and land cover change scenarios using a model that integrates both hydrology and nutrient dynamics. The results reveal that in the BAU (Business As Usual) and DEG (degradation) scenarios, there is a significant increase in soil nutrient losses, thus contributing negatively to the river's water quality.

**Keywords.** water quality; nutrient modeling; SWAT; best management practices; livestock; Ecuador.

## 1. Introducción

Las actividades agrícolas y ganaderas aportan grandes cantidades de contaminantes a los ríos debido al uso no moderado de fertilizantes y la frecuente intensidad de la ganadería (Alfaro & Salazar, 2005). La escasa planificación de las zonas agrícolas y ganaderas puede intervenir en la calidad del recurso hídrico, afectando principalmente a los ecosistemas locales. Además, el proceso de lluvia -escorrentía contribuye con la contaminación difusa, en donde el nitrato se mueve en solución de aguas de escurrimiento y el fósforo se transporta adsorbido en los sedimentos (Vazquez-Amabile et al., 2017). La integración de nutrientes en modelos hidrológicos permite realizar un análisis de buenas prácticas de manejo en la cuenca, mediante la simulación y comparación de escenarios de cambio de cobertura y uso del suelo (Geng et al., 2015).

La modelación numérica de ríos desarrollada en Ecuador ha sido estudiada en aspectos de cantidad (Pidal & Borja, 2015) y calidad (Matovelle, 2016) por separado. Además, estudios sobre nutrientes y contaminación difusa han sido escasos y se limitan a la investigación del nitrógeno y fósforo sin tomar en cuenta los procesos hidrológicos (Homeier et al., 2010).

El presente estudio plantea el análisis del transporte de nutrientes en la cuenca del río Coca por medio de la integración del modelo hidrológico desarrollado en

SWAT (Torres et al., 2017) y la evaluación de tres escenarios de cambio de cobertura y uso de suelo. Comparando estos escenarios se obtendrán los porcentajes de cambio en la concentración de nitrógeno y fósforo en la estación al cierre de la cuenca.

## 2. Metodología

### 2.1. Descripción del sitio

La cuenca del río Coca (3296 km<sup>2</sup>) (Figura 1) se caracteriza por tener una precipitación media anual de 2950mm/año, una temperatura media anual de 15.4°C y una humedad relativa entre 84 y 93% (Horna Kuonqui, 2016).

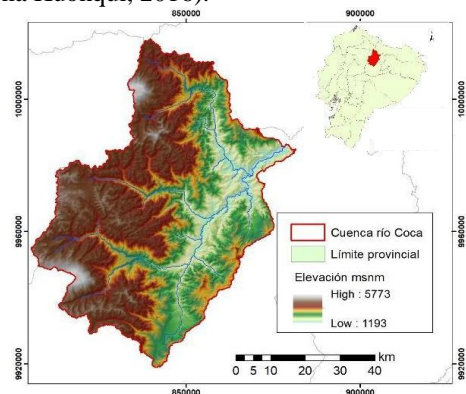


Figura 1. Ubicación de la cuenca del Río Coca.

La cobertura vegetal está dominada principalmente por bosque nativo, páramo y pastizales. Los pastizales que se encuentran en la cuenca son utilizados para actividades ganaderas, siendo esta la principal actividad productiva (Torres et al., 2017).

## 2.2. Modelo SWAT

Soil Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold et al., 2012) es un modelo lluvia - escorrentía de cuenca, en base física, semi-distribuido en función de Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) que operan en una base de información climática diaria que es computacionalmente eficiente para simular largos periodos de tiempo. El modelo simula el transporte de contaminantes a través de la escorrentía superficial tomando en cuenta la solubilidad, coeficiente de absorción de carbono y degradación de acuerdo con la cinética del contaminante.

El uso de nitrógeno por planta se estima con el suministro y la demanda (Williams et al., 1984). Cuando la demanda excede el suministro, existe un estrés nutricional. Las cantidades de nitratos ( $NO_3 - N$ ) se transportan por escurrimiento, flujo lateral y percolación. Para el transporte orgánico de N con sedimento se usa una función de carga que se aplica a eventos individuales de escorrentía (McElroy et al., 1976). El fósforo (P) sigue un enfoque similar al nitrógeno. La cantidad de fósforo soluble eliminado en la escorrentía se predice usando la concentración en los 10 mm superiores del suelo (Neitsch et al., 2010), el volumen de escorrentía y un factor de partición.

### Modelación hidrológica

Se utilizó información climática de siete estaciones con datos de precipitación, temperatura máxima y mínima, velocidad de viento y humedad relativa (Horna Kuonqui, 2016), modelo digital de elevación (SRTM), Drenajes (IGM), tipo de suelo y cobertura vegetal (MAGAP) y datos de nutrientes (Soto & Reina, 2012).

Los parámetros de velocidad del viento, punto de rocío y radiación solar se analizaron de forma mensual para incorporarlas al generador de clima que posee el modelo, mientras que precipitación y temperatura se ingresó de forma diaria. La definición de las URH se la realizó incorporando la información cartográfica del tipo de suelo de la cobertura vegetal y de pendientes. El cierre se lo realizó en la estación H0714 (Coca en San Rafael). Adicionalmente, se añadió el gradiente de temperatura respecto a la altura con un valor de  $-5.35^{\circ}C km^{-1}$ . Debido que en el área de estudio no se encontró relación entre la precipitación y la altura, se optó por ubicar estaciones virtuales de precipitación en las subcuencas que no disponían de esta información; tomando en cuenta las isoyetas y el régimen de precipitación presentado en el estudio de Horna Kuonqui (2016).

Los métodos para el cálculo de los componentes del ciclo hidrológicos fueron: 1) Evapotranspiración

Potencial: Método de Penman-Monteith, 2) Método de Infiltración - Escorrentía: Método Lluvia diaria / CN / Ruta Diario, y 3) Transporte del Agua en los canales: Método de Muskingum. La simulación se realizó con un paso a nivel mensual; el periodo fue desde 1979 a 1986, en donde los tres primeros años son de calentamiento, los siguientes cinco años para calibración y los tres últimos para validación.

### Modelación de nutrientes

En el SWAT, el ciclo de los nutrientes es complejo y comprende varios procesos, para el nitrógeno se tiene 27 parámetros y para el fósforo 22 parámetros (Arnold et al., 2012). En el área de estudio, la principal fuente de nutrientes es el abono proveniente del ganado que se encuentra suelto en los pastizales, por lo que para su modelación en SWAT se utilizó la opción "Continuous application of fertilizer" (Neitsch et al., 2010).

## 2.3. Escenarios

La dinámica de nutrientes en la cuenca se evaluó mediante la comparación de tres escenarios de cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS) al año 2030; el cual se alinea al criterio de tiempo óptimo para implementación y evaluación de políticas (ONU, 2016). Esta comparación se realizó respecto al escenario Base que corresponde a la cobertura de suelo histórica de 1990.

El escenario BAU (Business As Usual) presenta las condiciones y actividades actuales (año 2014) de la cuenca proyectadas al 2030 (Alpizar & Bovarnick, 2013). Este escenario fue determinado mediante la aplicación de Land Change Modeler, modelo incorporado en el programa TerrSet, que permite mediante coberturas pasadas y variables explicativas, escenificar prácticas futuras con métodos de validación automáticos (Mas et al., 2010). En el modelo de predicción de cambios se utilizan las coberturas históricas de los años: 2000, 2009 y 2014; y las cinco variables explicativas: modelo digital de elevaciones, evidencia de cambios, distancia a cambios, distancia a asentamientos y distancia a vías.

El escenario Degradación (DEG) representa un enfoque contrario a buen manejo del suelo, en donde hay una pérdida no controlada de vegetación natural y se prioriza el crecimiento de actividades ganaderas. En la dinámica de cambio se establece al sistema vial como punto de partida para el crecimiento de la ganadería extensiva (pastizal).

El escenario Best Management Practices (BMP) incorpora un nuevo esquema de gestión en la cuenca (Torres et al., 2017), en donde se propone restaurar zonas de pastizal hacia bosque ubicadas en bancos de ríos y áreas de importancia hídrica. Además promover el cambio del área restante de pastizal hacia sistemas silvopastoriles (68.06% del pastizal que se registra en la última actualización de la cobertura y uso de suelo (CUS) proporcionada por el

Ministerio de Agricultura de Ecuador correspondiente al 2014).

Las CUS del área de estudio se clasificaron en 6 tipos de acuerdo al escenario: páramo (PAR), bosque nativo (BQN), bosque restaurado (BQR), pastizal (PAS), áreas silvopastoriles (ASP) y otros (OTR) (Tabla 1).

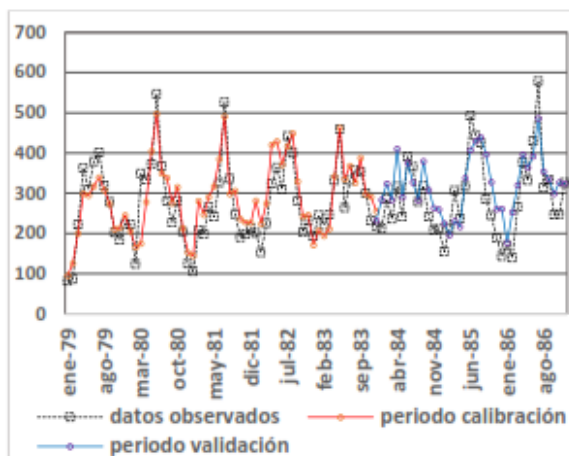
a a Áreas y porcentajes de coberturas y usos de suelo de la cuenca del Río Coca

Escenario	Tipo de cobertura y uso de suelo (Km <sup>2</sup> )					
	PAR	BQN	BQR	PAS	ASP	OTR
Base	1218.4	2326.1	-	224.5	-	85.2
BAU	1208.6	1843.4	-	708.6	-	93.6
DEG	1163.6	1696.6	-	878.6	-	115.3
BMP	1216.78	2109.5	183.1	-	252.9	91.8

### 3. Resultados

#### 3.1. Eficiencia del modelo

Según la clasificación de Moriasi et al. (2007) el modelo mostró gran eficiencia tanto en la calibración (NSE= 0.74, PBIAS=-5.1, RSR=0.5) como en la validación (NSE=0.62, PBIAS=-9.71, RSR=0.28) (Figura 2).



i a Caudales líquidos simulados y observados (H0714 Coca en San Rafael)

#### 3.2. Simulación de escenarios

Se estimó las pérdidas de nitrógeno y fósforo por hectárea en toda la cuenca, en donde se aprecia que dependen del escenario. Existe una alta pérdida de N y P en los escenarios DEG y BAU, mientras que BMP tiene una disminución significativa en la pérdida de nutrientes.

La Tabla 2 muestra que las concentraciones de nutrientes en el río Coca en el escenario base son similares en magnitud con los valores de nitratos (0.2 mg/L) y fosfatos (<0.1 mg/L) obtenidos en el estudio de Soto y Reina (2012). En la Tabla 3 se presentan los resultados de pérdida de nitrógeno en kilogramos por hectárea (kg/ha).

Dentro de los resultados se aprecia un alto porcentaje de aumento en la concentración de nutrientes en el cauce del río en los escenarios BAU y DEG, mientras

que el escenario de BMP muestra una disminución de las concentraciones hasta llegar a valores del escenario base. Esto último puede provocarse debido a que la conversión de pastizales en áreas silvopastoriles, las cuales retienen de mejor forma los nitratos y fosfatos.

a a Concentraciones de nitratos (NO<sub>3</sub>) y fosfatos (PO<sub>4</sub>) en el cierre de la cuenca del río Coca para los diferentes escenarios

	Base	BAU	DEG	BMP
Nitrógeno (mg/L)	0,24	0,30	0,38	0,24
% de cambio	-	23,9	60,3	2,1
Fósforo (mg/L)	0,02	0,03	0,04	0,01
% de cambio	-	107,9	129,0	-27,6

a a Pérdidas de Nitratos en kg/ha (promedio anual) para los diferentes escenarios

	Base		BAU		DEG		BMP	
N Orgánico	34.05	40.8%	55.35	46.9%	44.87	37.6%	29.20	37.1%
N en Escorrentía	0.18	0.2%	0.30	0.3%	0.50	0.4%	0.16	0.2%
N lixiviado	44.15	52.9%	55.53	47.0%	65.02	54.5%	43.93	55.9%
N en Flujo Lateral	3.59	4.3%	5.05	4.3%	6.82	5.7%	3.91	5.0%
N en Flujo Subterráneo	1.52	1.8%	1.83	1.6%	2.01	1.7%	1.43	1.8%
Total de Pérdidas	83.517		118.06		119.211		78.62	

### Conclusiones

Los resultados de la simulación de los caudales líquidos indican que el modelo SWAT es capaz de reproducirlos adecuadamente a escala mensual. Los indicadores de eficiencia indican un modelo satisfactorio, en un rango catalogado como bueno y muy bueno (Moriasi et al., 2007).

El escenario BMP muestra menor pérdida de nutrientes respecto al escenario base y disminución de sus concentraciones en el cauce del río, con lo cual se demuestra que la implementación de sistemas silvopastoriles y restauración de áreas degradadas contribuyen positivamente en la calidad del agua de los ríos de acuerdo con la simulación realizada.

En los resultados de las simulaciones se observan valores altos de pérdida de nitratos por hectárea, siendo el nitrato lixiviado el de mayor porcentaje de pérdida. Sin embargo, dichos cambios no se reflejan en las concentraciones de los ríos. Este fenómeno puede ocurrir debido a los procesos de dilución y al alto porcentaje de conservación de vegetación natural en la cuenca.

Esta investigación tomó como punto de comparación del escenario Base a las concentraciones de nutrientes, debido a la falta de información disponible. Para validar los resultados de pérdidas de nutrientes por hectárea se recomienda comparar con valores medidos en campo. No obstante, se pudo

prescindir de esta información ya que el objetivo del estudio fue contrastar las pérdidas de nutrientes de la cuenca de acuerdo a diferentes escenarios de CCUS.

## Referencias

- Alfaro, M., & Salazar, F. (2005). Ganadería y contaminación difusa, implicancias para el sur de Chile. *Agricultura Técnica*, 65(3), 330-340.
- Alpizar, F. & A. Bovarnick. 2013. "Targeted Scenario Analysis: A New Approach to Capturing and Presenting Ecosystem Services Values for Decision Making." UNDP, Washington.
- Arnold, J. G., et al. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Geng, J. J., et al. (2015). Nutrients and contaminants in tissues of five fish species obtained from Shanghai markets: risk-benefit evaluation from human health perspectives. *Science of the Total Environment*, 536, 933-945.
- Homeier, J., et al. (2010). Tree diversity, forest structure and productivity along altitudinal and topographical gradients in a species-rich Ecuadorian montane rain forest. *Biotropica*, 42(2), 140-148.
- Horna Kuonqui, L. N. (2016). Evaluación hidrometeorológica y de sedimentos en la cuenca del río coca en la zona de influencia del proyecto coca codo sinclair (Bachelor's thesis, Quito, 2016.).
- Mas, J.F., et al. 2010. "Una Comparación de Diferentes Enfoques de Modelación de Cambios de Cobertura/Usos del Suelo." P. CD in XIV Simposio Internacional SELPER 2010.
- Matovelle, C. (2016). Desarrollo de un modelo de calidad de agua para la microcuenca del río Tabacay, cuenca del río Paute en la ciudad de Azogues. Ecuador.
- McElroy, A.D., et al., 1976. Loading functions for assessment of water pollution from nonpoint sources. *Environmental Protection Technical Services*. EPA 600/2-76-151.
- Moriasi, D. N., et al. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Neitsch S. L., et al. (2010). *Soil and Water Assessment Tool. User's Manual, Version 2009*. Texas Water Resources Institute. Technical Report No. 365, Texas, 643 pp.
- ONU. 2016. *Agenda 2030 y Los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una Oportunidad Para América Latina y El Caribe*.
- Pidal, J. R. H., & Borja, D. B. (2015). Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil & Water assessment tool) para análisis del caudal de escorrentía superficial en la cuenca hidrográfica del río las juntas. *revista geoespacial*, 12, 106-122.
- Soto, C., & Reina, E. (2012). Análisis de la calidad del agua en la subcuenca del río Coca. Estudio técnico: DNCA-DHN-12-01. Coca, Ecuador: Secretaría Nacional del Agua
- Torres, M., et al. (2017). Informe No. 3: Evaluación Biofísica de la Cuenca del Río Coca y Valoración Económica de los Servicios Ecosistémicos (Multidisciplinary Report No. 3). Quito, Ecuador: United Nations Environment Program - Escuela Politécnica Nacional.
- Vazquez-Amabile, G., et al. (2017). Análisis de agroquímicos y nitratos en cursos y aguas subterráneas de cuencas rurales del oeste y sudeste de Buenos Aires. *Productividad y medio ambiente*, 61.
- Williams, J.R., Jones, C.A., Dyke, P.A., 1984. A modeling approach to determine the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering* 27, 129e144.