



*Efecto del LULC sobre la respuesta hidrológica en la cuenca Puyango-Tumbes,
Ecuador-Perú*

*Effect of Lulc on the hydrological response in the Puyango-Tumbes basin,
Ecuador-Peru*

*Effect of LULC on hydrological response in the Puyango-Tumbes basin,
Ecuador-Perú*

Robinson Fabrico Peña-Murillo ^I
20200867@lamolina.edu.pe
<http://orcid.org/0000-0001-6196-4039>

Lavado Casimiro Waldo-Sven ^{II}
wlavado@senamhi.gob.pe
<http://orcid.org/0000-0002-0051-0743>

Correspondencia: 20200867@lamolina.edu.pe

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 29 de marzo de 2024 * **Aceptado:** 24 de abril de 2024 * **Publicado:** 27 de mayo de 2024

- I. Ingeniero Agrónomo de Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, Maestría Recursos Hídricos Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú Candidato a PhD Recursos Hídricos en la misma Universidad, Docente Investigador de la Universidad Técnica de Ambato (UTA), Ambato, Ecuador.
- II. Doctor Hidrología y Cambio Climático en la U. Toulouse III (Francia), Especialista en Climatología e Hidrología del SENAMHI, Servicio Meteorológico e Hidrológico del Perú SENAMHI, Lima, Perú.

Resumen

El cambio de uso del suelo es uno de los principales factores impulsores del cambio hidrológico de las cuencas hidrográficas. Por lo tanto, las respuestas hidrológicas a los cambios en el uso del suelo requieren evaluaciones detalladas para garantizar una gestión sostenible tanto de los recursos hídricos como de los ecosistemas naturales. El objetivo de este estudio fue simular el impacto de diferentes escenarios de cambio LULC: 1985, 1995, 2005 y 2015 en el balance hídrico, a través del modelo hidrológico Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (SWAT), en la cuenca del río Puyango Tumbes perteneciente a Ecuador y Perú durante un período de 35 años (1981 – 2015). El análisis del cambio de LULC muestra que hubo un aumento del porcentaje de área de la cuenca cubierta por pastizales en un 18 % mientras que hubo una disminución de las sabanas en 38 %. Además, las características del caudal cambiaron desde 1985 al 2015 considerando sus correspondientes LULC en las tres estaciones hidrométricas analizadas para el periodo 1981 - 2015. Así se estimaron disminuciones en los caudales anuales en dicho periodo para la estación Pindo (Ecuador) en 4 m³/s, la estación Puyango (Ecuador) en 29 m³/s y la estación El Tigre (Perú) con 16.48 m³/s. La dinámica del ciclo hidrológico en toda la cuenca presentó (1981 – 2015) una tendencia creciente en la evapotranspiración con 2.14 % y por el contrario una disminución del caudal superficial en 20.7 %, la percolación en 29.29 % y el flujo lateral en 0.93 %.

Palabras clave: cambio de uso del suelo; caudal; ciclo hidrológico; modelo SWAT.

Abstract

The change in soil use is one of the main factors of the hydrological change in hydrographic basins. Therefore, hydrological responses to changes in land use require detailed evaluations to guarantee sustainable management of both water resources and natural ecosystems. The objective of this study was to simulate the impact of different LULC change scenarios: 1985, 1995, 2005 and 2015 in the water balance, through the hydrological model of soil and water evaluation tool (SWAT), in the Puyango river basin Tumbes belonging to Ecuador and Peru for a period of 35 years (1981 - 2015). The LULC change analysis shows that there was an increase in the percentage of the basin area covered by grasslands by 18 % while there was a decrease in savannas by 38 %. In addition, the characteristics of the flow changed from 1985 to 2015 considering their corresponding Lulc in the three hydrometric stations analyzed for the period 1981 - 2015. Thus decreases in the annual

flows were estimated in that period for the Pinto station (Ecuador) in 4 m³/s, the Puyango station (Ecuador) in 29 m³/s and the El Tigre (Peru) station with 16.48 m³/s. The dynamics of the hydrological cycle throughout the basin presented (1981 - 2015) a growing trend in evapotranspiration with 2.14 % and on the contrary a decrease in superficial flow by 20.7 %, percolation in 29.29 % and the lateral flow by 0.93 %.

Keywords: change of land use; flow; Hydrological cycle; Swat Model.

Resumo

A mudança no uso do solo é um dos principais fatores da mudança hidrológica nas bacias hidrográficas. Portanto, as respostas hidrológicas às mudanças no uso da terra requerem avaliações detalhadas para garantir o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos e dos ecossistemas naturais. O objetivo deste estudo foi simular o impacto de diferentes cenários de mudança de LULC: 1985, 1995, 2005 e 2015 no balanço hídrico, através do modelo hidrológico da ferramenta de avaliação de solo e água (SWAT), nas tumbes da bacia do rio Puyango pertencentes a Equador e Peru por um período de 35 anos (1981 - 2015). A análise da mudança LULC mostra que houve um aumento na porcentagem da área da bacia coberta por pastagens em 18 %, enquanto houve uma diminuição nas savanas em 38 %. Além disso, as características do fluxo mudaram de 1985 para 2015, considerando o LULC correspondente nas três estações hidrométricas analisadas para o período de 1981 - 2015. Assim, diminuí os fluxos anuais nesse período para a estação Pinto (Ecuador) em 4 M³/S, a estação Puyango (Equador) em 29 m³/s e a estação El Tigre (Peru) com 16,48 m³/s. A dinâmica do ciclo hidrológico ao longo da bacia apresentou (1981 - 2015) uma tendência crescente na evapotranspiração com 2,14 % e pelo contrário uma diminuição no fluxo superficial em 20,7 %, percolação em 29,29 % e fluxo lateral em 0,93 %.

Palavras -chave: mudança de uso da terra; fluxo; Ciclo hidrológico; Modelo SWAT.

Introducción

El crecimiento de la población humana con una proyección de 9 mil millones para el 2050; así como el desarrollo agrícola, la deforestación y otras actividades humanas conducen a cambios espaciales y temporales en el uso del suelo, que pueden afectar las vías de flujo del agua y el balance hídrico (Alvarez-Garretton et al., 2019; Dale et al., 2011; Welde & Gebremariam, 2017), cambios

que se han vuelto significativos y que ahora se considera que marcan una nueva era del Antropoceno (Lewis & Maslin, 2015; Smith & Zeder, 2013; Zalasiewicz et al., 2011).

En el método experimental de “cuencas pareadas”, se seleccionan y observan dos cuencas con áreas, formas, clima, vegetación y suelo similares. En general, los primeros 3 a 5 años (de preferencia, incluidos un año húmedo, un año normal y un año seco) son el período de control sin medidas experimentales. Después de eso, el uso de suelo de una de las cuencas se cambiará artificialmente, mientras que las demás condiciones seguirán siendo las mismas.

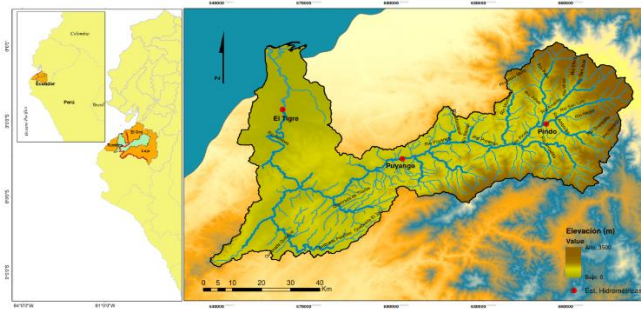
El segundo método, el método de análisis de series de tiempo, se puede utilizar para analizar la tendencia cambiante de los datos hidrológicos y climáticos, pero debido a la heterogeneidad espacial de una cuenca y los mecanismos de cambio de LULC no se puede determinar el cambio climático en el ciclo del agua (Li et al., 2012).

En el tercer método, los modelos hidrológicos proporcionan un marco para conceptualizar y estudiar las relaciones entre el cambio climático, el cambio de uso del suelo y el ciclo del agua. Entre estos modelos, los modelos hidrológicos distribuidos tienen aplicaciones significativas porque relacionan directamente los parámetros del modelo con las características de la superficie terrestre (Legesse et al., 2003).

Materiales y Métodos

Área de estudio

La cuenca del Río Puyango – Tumbes tiene un área de 4 800 km², de los cuales el 60 % pertenece a las provincias de El Oro y Loja, correspondientes al sureste de Ecuador y el 40 % se encuentra en el Departamento de Tumbes ubicada en el norte de Perú. El río Puyango-Tumbes nace a 3 500 m.s.n.m., en la zona de Portovelo donde se le llama río Pindo (en la cordillera Chilla y Cerro Negro del Ecuador), que luego se convierte en Puyango y finalmente en el río Tumbes en territorio peruano. La longitud total del río Pindo-Puyango-Tumbes es de 230 km. En la región alta, los principales afluentes son los ríos Ambocas, Luis, Amarillo y Calera (Ver Figura 1).

Figura 1*Figura 1: Mapa de ubicación geográfica de la Cuenca Puyango – Tumbes.*

En la cuenca se presentan diferentes tipos de vegetación como bosques siempre verdes latifoliados y caducifolios; matorrales perennes, sabana leñosas y de igual manera la existencia de pastizales y tierras de cultivo las mismas que vienen a formar parte dentro de las nueve zonas de vida que posee la cuenca como desierto semiárido premontano, desierto tropical matorrales, matorrales desérticos premontanos, matorral espinoso tropical, matorral espinoso premontano, bosque tropical muy seco, tropical seco, seco premontano y húmedo subtropical (United Nations Development Programme, 2015).

Descripción del modelo SWAT

En este estudio se realizó el modelamiento hidrológico con SWAT a una escala de tiempo diario y semidistribuido basado en el esquema de subcuencas derivado del modelo digital de elevación (DEM). La configuración de la subcuenca a través de la herramienta TauDEM preservó los canales y las rutas de flujo naturales. En primer lugar, se definieron los cursos de agua, eligiendo el umbral de superficie mínima establecido automáticamente por SWAT como criterio para crearlos y obtener una representación rigurosa de los canales (Abbaspour, 2015) (Ver Figura 2 a).

Datos de entrada

Datos topográficos, de suelo, meteorológicos y de flujo

Basado en el DEM, la pendiente fue dividida por el modelo SWAT en tres categorías (Ver Figura 2 a, Tabla 1). El mapa mundial de suelos de la Harmonized World Soil Database v 1.2 (HWSD) (Ver Figura 2 b, Tabla 1); la temperatura máxima y mínima se obtuvieron del producto grillaado PISCO v2.0 (Ver Figura 2 c, Figura 3, Tabla 1).

Figura 1

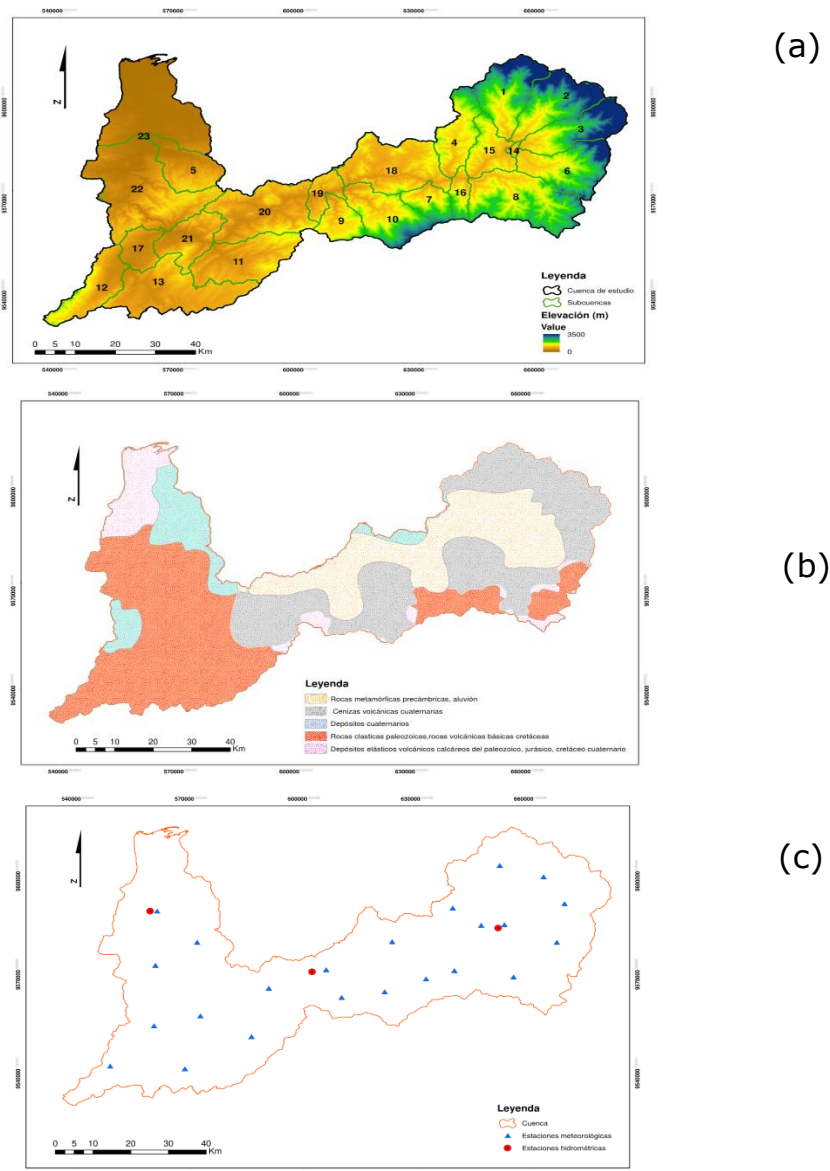


Figura 2: (a) Mapa de elevación (b) Mapa de suelo (c) Estaciones meteorológicas e hidrométricas.

Tabla 1: Variables de entrada para el modelamiento con SWAT

Datos	Data de entrada	Descripción	Fuente
Hidrometeorológicos	Temperaturas extremas	Temperaturas máximas y mínimas diarias. Periodo 1988 – 2015.	PISCO (SENAMHI) Disponible en (http://iridl.ldeo.columbia.edu/SO/URCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/index.html?Set-Language=es)

	Precipitación	Precipitación diaria. Periodo 1988 – 2015.	Rain for Peru and Ecuador (RAIN4PE) Disponible en https://dataservices.gfz-potsdam.de/pik/showshort.php?id=6f766e20-2d94-11eb-9603-497c92695674
	Caudal	Caudal diario. Periodo 1992 – 2015.	INAMHI Disponible en (http://www.inamhi.gob.ec) ANA Disponible en (https://snirh.ana.gob.pe/visorsnirh/)
Datos espaciales	DEM	Modelo de elevación digital (Rs: 300 m).	NASA Shuttle Radar Topographic Misión (SRTM) obtenida del Consorcio de Espacios Sitio web de Información (CGIAR_CSI) Disponible en (http://srtm.csi.cgiar.org)
	Tipo del suelo	HWSD (Rs: 1 km)	HWSD Disponible en (https://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/)
	Uso del suelo	Mapa de uso del suelo 1985, 1995, 2005, 2015 (Rs: 500 m)	MODIS Disponible en (https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov)

Los registros de precipitación se obtuvieron del producto grillado RAIN4PE (Rain for Peru and Ecuador) que es un conjunto de datos de precipitación cuadrículada diaria que se obtiene mediante la fusión de datos de precipitación de múltiples fuentes (Precipitación infrarroja del Grupo de peligros climáticos basada en satélites, CHIRP (Funk et al., 2015), reanálisis ERA5 (Martínez-Retureta et al., 2020) y precipitación basada en tierra con elevación del terreno utilizando el método de regresión de bosque aleatorio y se complementa con datos de caudal para corregir la subestimación de la precipitación sobre páramos y cuencas montañosas (Ver Figura 2 c, Tabla 1) (Fernandez-Palomino et al., 2021).

Las estaciones hidrométricas “Pindo AJ. Amarillo”, “Puyango en Campamento Militar (Puente Carretera)” y “El Tigre” fueron empleadas como puntos de monitoreo del caudal, las cuales

llamaremos “Pindo”, “Puyango” y “El Tigre” en todo el documento (Ver Figura 2 c, Figura 3, Tabla 1).

Uso de suelo

Se realizó el análisis y la cuantificación de los cambios de uso de suelo a partir del procesamiento de imágenes de satélite. El análisis y cuantificación de cambios en usos de suelo, se obtuvo de las imágenes MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), para ello las imágenes se seleccionaron de cuatro años: 1985, 1995, 2005, 2015 (Ver Tabla 1).

Para cuantificar y mapear los cambios de cada categoría de LULC, se analizó el año 1985 a través de QSWAT el mismo que fue comparado con los años subsiguientes de análisis hasta el año 2015. Las categorías de LULC se derivaron de una clasificación supervisada utilizando el método estadístico de máxima verosimilitud. Esta clasificación incluyó las siguientes categorías: (1) bosques siempre verdes con dosel > 2 m, (2) pastizales, (3) sabanas cubiertas de árboles 10 – 30 % con dosel > 2 m, (4) humedales permanentes: tierras permanentemente inundadas con 30 - 60 % de cobertura de agua y 10 % de cobertura vegetal, (5) Tierras de cultivo al menos el 60 % del área es tierra de cultivo, (6) Suelos urbanos y edificados: al menos un 30 % de superficie impermeable incluyendo materiales de construcción, asfalto y vehículos, (7) terrenos desnudos permanentes, (8) cuerpos de agua.

Análisis, calibración y validación de sensibilidad SWAT

El modelo fue calibrado y validado en una escala diaria usando los caudales diarios a lo largo del Río Puyango Tumbes, en tres estaciones hidrométricas: “Pindo”, “Puyango” y “El Tigre” (Ver Figura 1). Se utilizó un periodo de 28 años (1988 – 2015) para la calibración y validación, incluidos cuatro años de calentamiento del modelo.

La calibración de los parámetros se realizó utilizando el software de procedimientos de incertidumbre SWAT_CUP (Abbaspour, 2015). Según estudios anteriores (Cibin & Sudheer, 2010; CIREN, 1999; Funk et al., 2015), se eligieron 16 parámetros hidrológicos sensibles para el análisis (Ver Tabla 2).

Tabla 2: Parámetros utilizados para el análisis de sensibilidad del modelo SWAT CUP.

Parámetro	Descripción
CH_N1	Valor "n" de Manning para los canales tributarios.
CNCOEF	Coefficiente del número de la curva ET de la planta.
ALPHA_BF	Factor alfa de flujo base (días)
GW_DELAY	Tiempo de demora del agua subterránea
SURLAG	Tiempo de retraso de la escorrentía
GWQMN	Profundidad umbral de agua en el acuífero poco profundo requerida para que ocurra el flujo de retorno (mm)
SLSUBBSN	Longitud media de la pendiente (m)
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo
SOL_BD	Densidad aparente húmeda.
RCHRG_DP	Fracción de percolación de acuíferos profundos
ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo.
SOL_Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada.
GW_REVAP	Coefficiente "revap" de agua subterránea
CANMX	Almacenamiento máximo del dosel
CN2	Curva de escorrentía SCS número f

Se realizó un análisis de sensibilidad global para obtener la sensibilidad relativa y absoluta. Se implementó el algoritmo de ajuste secuencial de la incertidumbre, versión No 2 (Sufi-2) (Abbaspour, 2015) para identificar los parámetros de mayor sensibilidad, según la respuesta del modelo. En Sufi-2, la incertidumbre en los parámetros, expresada como rangos (distribuciones uniformes), da cuenta de todas las fuentes de incertidumbre (como la incertidumbre en las variables de lluvia), modelo conceptual, parámetros y datos de medición. La propagación de las incertidumbres en los parámetros conduce a que la variable de salida del modelo, se expresan como distribuciones de probabilidad del 95 %, que corresponde al 95 % de incertidumbre de predicción (95 PPU).

Figura 3

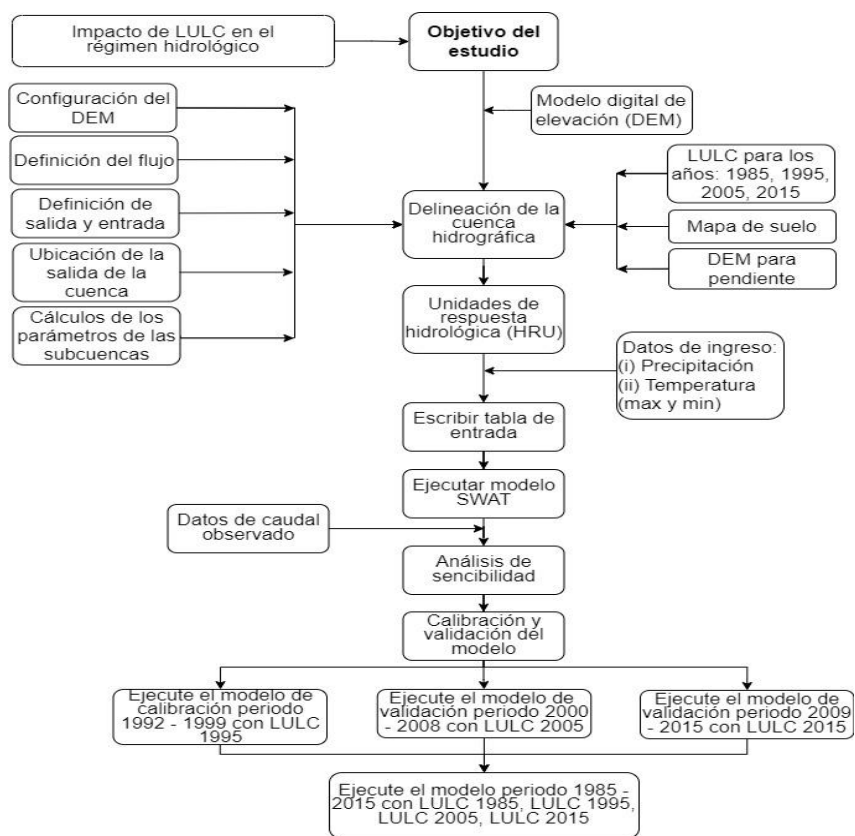


Figura 3: Metodología conceptual general utilizada para modelar la hidrología en la Cuenca de Puyango Tumbes.

Para cuantificar el ajuste entre el resultado de la simulación, expresado como una sola señal, se aplicó dos estadísticos: p-factor (es el porcentaje de datos observados envueltos por nuestro resultado de modelado) y el r-factor (es el porcentaje de datos observados envueltos por nuestro resultado de modelado, es decir el r-factor es el grosor de la envolvente de 95 PPU.) Para evaluar el grado de incertidumbre en la calibración y validación del modelo se considera como deseable un p-factor $> 70\%$, r-factor < 1 para la estimación de caudales (Abbaspour, 2015).

Según lo recomendado por diferentes investigadores (Moriassi, et al., 2012; Martínez-Retureta et al., 2020; Thampi et al., 2010), los conjuntos de datos hidrológicos y meteorológicos se dividieron en tres subbases de datos: (i) 1988 – 1999, (ii) 1996 – 2008 y (iii) 2005 – 2015 (incluidos en cada subbase cuatro años como período de calentamiento), con diferentes cambios de LULC.

La calibración del modelo se realizó en el período 1992 – 1999 y se empleó el LULC_1995. Los parámetros estimados durante la calibración fueron utilizados para la validación en dos periodos: i) 2000 – 2008 con el LULC_2005 y ii) 2009 – 2015 con el LULC_2015, esto con la finalidad de

demostrar que el modelo tiene un rango de precisión satisfactorio (Rykiel, 2006). Una vez que calibración y validación del modelo fueron aceptables se procedió a correr el modelo SWAT para el periodo 1985 – 2015, considerando los LULC_1985, LULC_1995, LULC_2005 y LULC_2015 (Ver Figura 3).

Evaluación del rendimiento del modelo SWAT

El rendimiento del modelo se evaluó mediante pruebas estadísticas como la Eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE), el sesgo porcentual (PBIAS) y el coeficiente de determinación (R^2) para examinar la representación del proceso modelado en condiciones biofísicas reales. NSE es un método estadístico estandarizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de los datos medidos (Ecuación 1). Teóricamente, el valor de NSE varía de -1 a 1; el valor 1 de NSE corresponde a una coincidencia perfecta entre valores observados y simulados (Moriasi et al., 2007) PBIAS (Ecuación 2) mide el sesgo de estimación del modelo. El valor de PBIAS puede ser positivo o negativo indicando subestimación y sobreestimación, respectivamente; el valor cero representa el mejor rendimiento de simulación del modelo (Moriasi et al., 2007). El R^2 (Ecuación 3), se utiliza para medir la consistencia de los datos simulados y observados del modelo. El valor de R^2 varía entre 0 y 1; la menor varianza de error se indica con valores más altos (Moriasi et al., 2007).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{obs}^{mean})^2} \quad (1)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim})} * 100 \quad (2)$$

$$bR^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{obs}^{mean}) (Y_i^{sim} - Y_{sim}^{mean})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{obs}^{mean})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_{sim}^{mean})^2}} \right)^2 \quad (3)$$

Dónde Y es la descarga del caudal, obs es la observación, mientras sim es la simulación. r es el coeficiente de correlación, β es la relación de sesgo (adimensional) y γ es la razón de variabilidad (adimensional).

Evaluación del efecto de cambio de LULC sobre la respuesta hidrológica

El análisis de distribución t-student se evaluó con el fin de determinar diferencias significativas entre los caudales diarios simulados para cada LULC. Esto también se aplicó para cuantificar el impacto de los escenarios de cambios en usos de suelo sobre el caudal total durante el período antes mencionado para la cuenca Puyango Tumbes. Además, se estimaron el estadístico (t-test) y análisis de tendencias entre el primer y último escenario LULC (LULC_1985 y LULC_2015) para evaluar el comportamiento de los componentes del ciclo hidrológico como evapotranspiración (PET), percolación (PERC), flujo superficial (SURQ), flujo lateral (LAT_Q), agua subterránea (GW_Q) y rendimiento de agua (WYLD). Este análisis se realizó a escala mensual durante los últimos 28 años.

Resultados

Cambios en usos de suelo y cobertura de la tierra (LULC)

Los bosques nativos y matorrales presentaron el mayor uso de suelo en la cuenca con un incremento del 25 % entre 1985 y 2015. Los pastizales, aumentaron en forma progresiva de uso del suelo con el 18 % entre 1985 y 2015. Se presentó una distribución espacial de ocupación creciente desde las áreas más bajas durante 1985 hasta las tierras de la cuenca alta en 2015. Este comportamiento se debe a la tendencia de cambio de áreas naturales en áreas ganaderas.

Figura 4

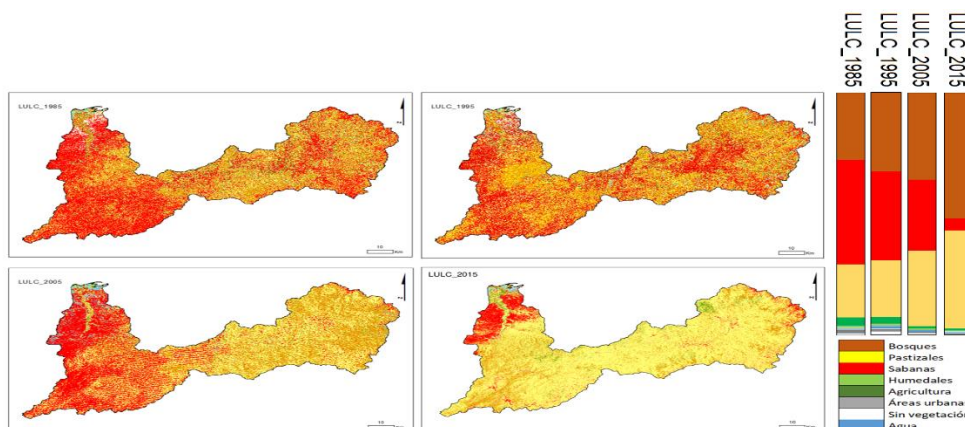


Figura 4: Representación espacial y porcentaje del área de cambios en usos de suelo para LULC_1985, LULC_1995, LULC_2005 y LULC_2015.

Por otro lado, las áreas de sabanas tuvieron un comportamiento decreciente, mostrando una reducción de 38 % desde 1985 a 2015.

Sin embargo, puede ser visto que la agricultura era dominante en la parte alta y en medio de la cuenca. Se observó un comportamiento irregular en los diferentes escenarios afectando a los humedales y los cuerpos de agua (Ver Figura 4, Tabla 3).

Tabla 3: Porcentajes de área de uso de la tierra para los escenarios LULC_1985, LULC_1995, LULC_2005 y LULC_2015 y sus cambios relativos.

	LULC (%)				Cambios Relativos (%)			
	1985	1995	2005	2015	1985 -1995	1995 -2005	2005-2015	1985-2015
Bo	27.9	33.3	36.4	53.0	5.4	3.1	16.6	25.0
Pt	21.9	23.4	31.2	40.3	1.5	7.8	9.1	18.3
Sa	43.6	36.7	29.6	5.2	-6.8	-7.2	-24.4	-38.4
Hu	0.6	0.8	0.7	0.3	0.2	-0.1	-0.4	-0.3
Ag	3.6	2.8	0.9	1.0	-0.8	-1.9	0.2	-2.6
Au	1.2	1.0	0.2	0.1	-0.3	-0.8	-0.1	-1.2
Sn	0.6	1.0	0.0	0.0	0.4	-1.0	0.0	-0.6
A	0.5	1.1	1.1	0.2	0.6	0.1	-0.9	-0.3

*Bosques: Bo; Pastizales: Pt; Sabana: Sa; Humedades: Hu; Agricultura: Ag; Áreas Urbanas: Au; Sin vegetación: Sn; Agua: A

El análisis de series de tiempo de LULC entre 1985 y 2015 indica una expansión de los pastizales con una reducción en el uso de sabanas, de agricultura y bosques nativos (Ver Tabla 3).

Bosques nativos, matorrales y humedales fueron las coberturas terrestres con mayores cambios en sus porcentajes con respecto al área total de 1985. Este resultado se explica por la tala de sabana entre 1985 y 2015, con una disminución del 38 % con respecto al área ocupada por este uso de la tierra en 1985. Mientras tanto, durante el mismo período, las plantaciones forestales tuvieron una tendencia positiva con un aumento del 25 % con respecto al área de plantaciones forestales durante 1985 (Ver Figura 4, Tabla 3).

Análisis de sensibilidad del modelo SWAT

Según el análisis de sensibilidad utilizando el escenario LULC_1995, se obtuvo que seis parámetros que afectan significativamente el caudal superficial modelado de la cuenca Puyango

Tumbes, como la capacidad de agua disponible de la capa de suelo (SOL_AWC), la longitud promedio de la pendiente (SLSUBBSN) y otros parámetros relacionados con la escorrentía superficial (SURLAG) y el agua subterránea (ALPHA_BF, GW_DELAYMM, GWQMN) (Ver Tabla 4). Dichos parámetros se calibraron para ajustarse al balance hídrico real, según la información de la literatura (Le et al., 2012).

Tabla 4: Parámetros sensibles en cálculos de flujo superficial, valores calibrados.

Parámetro	Descripción de parámetros	Valores calibrados		
		Valor ajustado	Valor mínimo	Valor máximo
ALPHA_BF	Factor alfa de flujo base (días)	0.74	0	1
GW_DELAY	Tiempo de demora del agua subterránea	0.12	-0.25	0.25
GWQMN	Profundidad umbral de agua en el acuífero poco profundo requerida para que ocurra el flujo de retorno (mm)	41.61	30	450
SLSUBBSN	Longitud media de la pendiente (m)	12.91	0	25
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo	-0.02	-0.2	0.1
SURLAG	Tiempo de retraso de la escorrentía	9.45	0.05	24

Si se compara con los valores predeterminados, el parámetro ALPHA_BF se incrementó en el modelo para facilitar el flujo de agua del acuífero al río, aumentando el caudal base. También se aumentaron los parámetros GWQMN y GW_DELAY, aumentando los caudales superficiales y consecuentemente disminuyendo el caudal subterráneo. El resto de los parámetros relacionados con los procesos hidrológicos fueron calibrados con el fin de ajustar los caudales base y pico (Ver Tabla 4).

Figura 5

Calibración y validación del modelo SWAT

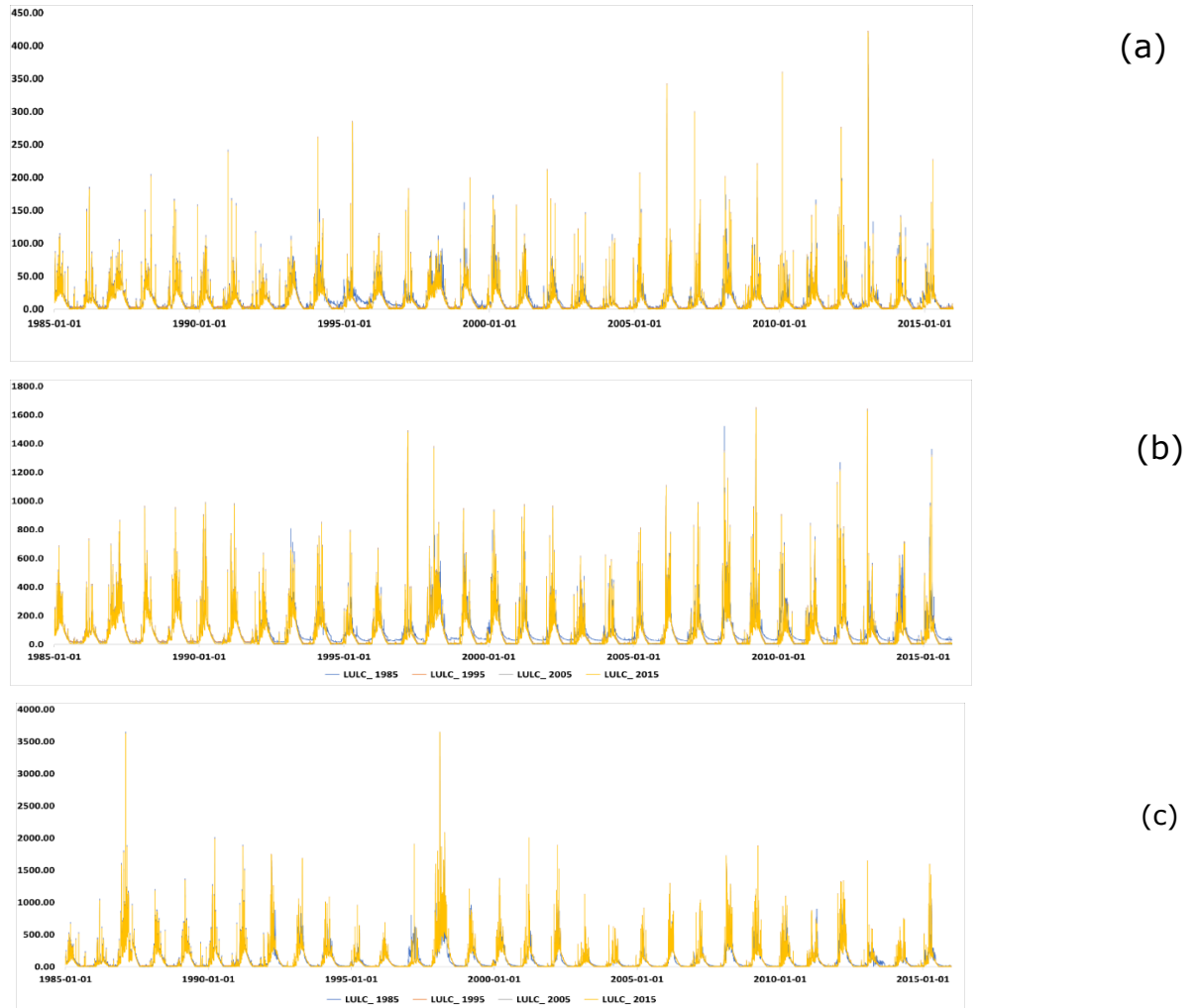


Figura 5. Validación del caudal diario para el periodo de tiempo de 1985 -2015 para la estación Pindo (a), Puyango (b) y El Tigre (c).

Se obtuvieron estimaciones aceptables mediante factores de incertidumbre en la calibración y validación del modelo según la clasificación de Abbaspour et al., (2007).

Durante el período de calibración para la estación Pindo en LULC_1995, el modelo mostró una incertidumbre baja con un p factor 0.36 y un r-factor de 0.23, mientras tanto que para los períodos de validación LULC_2005 y LULC_2015, se obtuvo un nivel de incertidumbre satisfactorio con un p-factor de 0.64 (0.59) y un r-factor de 0.26 (0.23), respectivamente. Respecto a la estación Puyango para el LULC_1995 presentó un p-factor 0.60 y un r-factor de 0.33, y para la validación LULC_2005, LULC_2015 p-factor de 0.7 (0.65) y un r-factor de 0.31 (0.24).

Finalmente, respecto a la estación El Tigre, el valor de p-factor fue 0.63 y r-factor 0.23; para la validación LULC_2005, LULC_2015 p-factor de 0.76 (0.68) y un r-factor de 0.27 (0.25).

Los resultados estadísticos para evaluar el desempeño del modelo en las tres estaciones hidrométricas mostraron un muy buen nivel el coeficiente de determinación para los diferentes LULC (0.75 – 0.89) para la calibración. Mientras tanto, se obtuvo un muy buen nivel en NSE (0.77 – 0.87) y PBIAS bajo según la clasificación de Moriasi et al., (2007) (Ver Figura 5, Tabla 5).

El modelo fue validado para demostrar la idoneidad de los valores calibrados en los escenarios LULC_2005 y LULC_2015 (Ver Tabla 5).

El ajuste entre el caudal observado y validado de los tres escenarios alcanzó un buen nivel para la estación Pindo con un R² de 0.78, 0.79 y 0.78, con valores de NSE de 0.69, 0.80, 0.83, respectivamente. Se obtuvo una no muy buena clasificación para PBIAS, con valores de -15.67 %, -36.89 y -19,33 respectivamente.

La estación Puyango un R² de 0.78, 0.81 y 0.75, con valores de NSE de 0.69, 0.84, 0.80, respectivamente. Se obtuvo una no muy buena clasificación para PBIAS, con valores de -17.36 %, -11.23 % y -18.23 % respectivamente.

La estación El Tigre un R² de 0.79, 0.78 y 0.70, con valores de NSE de 0.69, 0.81, 0.80, respectivamente. Se obtuvo una no muy buena clasificación para PBIAS, con valores de -14.56 %, -12.54 % y -21.56 % respectivamente.

Tabla 5. Correlación entre los períodos de calibración y validación para la estación Pindo, Puyango y El Tigre.

			Pindo			Puyango			El Tigre		
SnC: 1992-1997											
C: 1992-1997			SnC	C	V	SnC	C	V	SnC	C	V
V: 1998-1999											
LULC 1995	P: 1992- 1999	R ²	0.9	0.89	0.78	0.78	0.89	0.78	0.78	0.87	0.79
		NSE	0.38	0.77	0.69	0.68	0.77	0.69	0.46	0.82	0.69
		PBIAS	-22.3	-12.4	-15.6	-19.2	-14.5	-17.3	-16.4	-8.2	-14.5
SnC: 2000-2006											
C: 2000-2006			SnC	C	V	SnC	C	V	SnC	C	V
V: 2007-2008											

LUL	P:	R ²	0.8	0.85	0.79	0.73	0.85	0.81	0.76	0.84	0.78
C	2000-	NSE	0.74	0.82	0.80	0.68	0.87	0.84	0.73	0.84	0.81
2005	2008	PBIAS	-18.4	-25.6	-36.8	-13.2	-3.79	-11.2	-14.5	-5.8	-12.5
SnC:	2009-2013										
C:	2009-2013	SnC	C	V	SnC	C	V	SnC	C	V	
V:	2014-2015										
LUL	P:	R ²	0.78	0.83	0.78	0.55	0.77	0.75	0.6	0.75	0.7
C	2009-	NSE	0.73	0.86	0.83	0.76	0.84	0.8	0.78	0.8	0.8
2015	2015	PBIAS	-21.3	-17.6	-19.3	-25.6	-21.9	-18.2	-16.2	-13.4	-21.5

P: Periodo; SnC: Sin Calibrar; C: Calibración; V: Validación

Relación entre los usos del suelo y el caudal en la cuenca del río Puyango Tumbes

El modelo SWAT se ejecutó para los escenarios LULC_1985, LULC_1995, LULC_2005 y LULC_2015. De esta manera, se evaluó el efecto de LULC sobre el caudal diario para el período de estudio (1981–2015) en las tres estaciones fluviales “Pindo”, “Puyango” y “El Tigre”. La prueba t-student para muestras pareadas mostró diferencias significativas entre los caudales obtenidos con todos los escenarios de uso y cobertura del suelo con un intervalo de confianza del 95 %.

Tabla 6. Comportamiento del caudal promedio anual de periodo 1985 - 2015 en función al LULC en las estaciones hidrométricas Pindo, Puyango y El Tigre.

LULC	Pindo (m ³ /s)	Puyango (m ³ /s)	El Tigre (m ³ /s)
1985	15.88	103.40	120.81
1995	13.53	83.03	109.89
2005	12.42	79.34	106.19
2015	11.54	74.26	104.33

La mayor diferencia en los caudales diarios se obtuvo entre los años más extremos (LULC_1985 y LULC_2015) (Ver Tabla 6), respecto a la estación Pindo presentó una disminución de 4.34 m³/s por año, la estación Puyango 29.15 m³/s y la estación El Tigre con 16.48 m³/s. Este cambio se caracterizó por la expansión de los pastizales (18.32 %) con una reducción en el uso de sabanas (38.37 %), de agricultura (2.56 %) y de bosques de coníferas siempre verdes (11.99 %). Durante el periodo de estudio la estación Pindo, Puyango y El Tigre presentaron un caudal promedio de 13.67, 81.91 y 103.70 m³/s respectivamente. La tendencia obtenida, indicadora de una progresiva

reducción del caudal, podría explicarse por el comportamiento de LULC que tuvo lugar en la cuenca durante el período de análisis (Ver Figura 5, Tabla 6).

Impactos del cambio de LULC en la respuesta hidrológica

Tabla 7. Cambio relativo mensual de ET, PET, PERC, SURQ, LAT_Q, DW_Q y WYLD, escenario LULC_1985 frente a LULC_2015.

Subcuenca	ET	PET	PERC	SURQ	GW_Q	WYLD	LAT_Q
1	-6.04	1.30	-23.65	30.40	-25.34	-4.06	6.34
2	-4.65	1.26	-17.15	37.41	-18.53	-0.88	-11.63
3	-4.16	1.12	-18.00	27.34	-18.86	-1.12	-19.08
4	-2.20	1.97	-25.15	2.60	-26.67	-13.24	-13.23
5	-2.04	1.71	-53.98	-63.55	-61.14	-57.21	-12.67
6	-2.19	1.17	-13.95	9.08	-14.02	-4.58	4.49
7	-1.61	1.32	-25.07	-5.03	-26.77	-15.68	6.36
8	-3.90	1.31	-15.16	-7.71	-16.36	-6.63	-19.67
9	-3.01	1.92	-18.92	-35.10	-21.03	-24.95	-15.07
10	-2.42	1.45	-18.73	-20.32	-20.61	-19.18	14.72
11	-4.70	1.85	-36.07	-46.39	-41.33	-41.50	-26.57
12	-8.84	2.61	-55.96	-60.29	-65.03	-58.27	-15.31
13	-4.02	2.10	-40.69	-54.93	-46.89	-47.11	-20.24
14	-8.42	1.86	-11.19	18.48	-11.17	-1.34	25.04
15	-7.33	1.86	-12.28	19.61	-13.14	-1.59	-14.06
16	-5.89	1.45	-18.54	-2.14	-19.86	-11.95	14.84
17	-7.03	1.51	-34.78	-48.19	-40.39	-42.22	-34.46
18	-0.06	2.03	-21.05	-12.94	-22.98	-17.74	52.47
19	-2.98	2.03	-19.39	-34.52	-21.55	-25.99	54.96
20	-0.07	2.03	-37.25	-47.88	-42.16	-40.43	43.61
21	-1.81	1.94	-40.02	-47.36	-46.44	-44.81	-13.86
22	-5.18	2.29	-54.21	-58.95	-64.20	-56.81	-22.89
23	-4.91	11.03	-60.11	-76.12	-74.56	-75.34	-5.49

A escala mensual, para el período entre LULC_1985 y LU_2015, posterior a la generación de las subcuencas (Ver Figura 2), se observó una tendencia levemente creciente en las subcuencas ubicadas en la parte alta de la cuenca con los cambios relativos de SURQ. Las variaciones mensuales oscilan entre -76.12 % en la subcuenca 23 y 37.41 % en la subcuenca 2, con un promedio medio mensual del -20.72 % (Ver Tabla 7, Figura 6 d). En sentido contrario, el LAT_Q registró un comportamiento decreciente para las subcuencas, con variaciones relativas que van desde el -34.46 % en la subcuenca 17 a 54.96 % en la subcuenca 19 con un descenso medio anual del 0.93 % (Tabla 6, Figura 6 g).

Figura 6

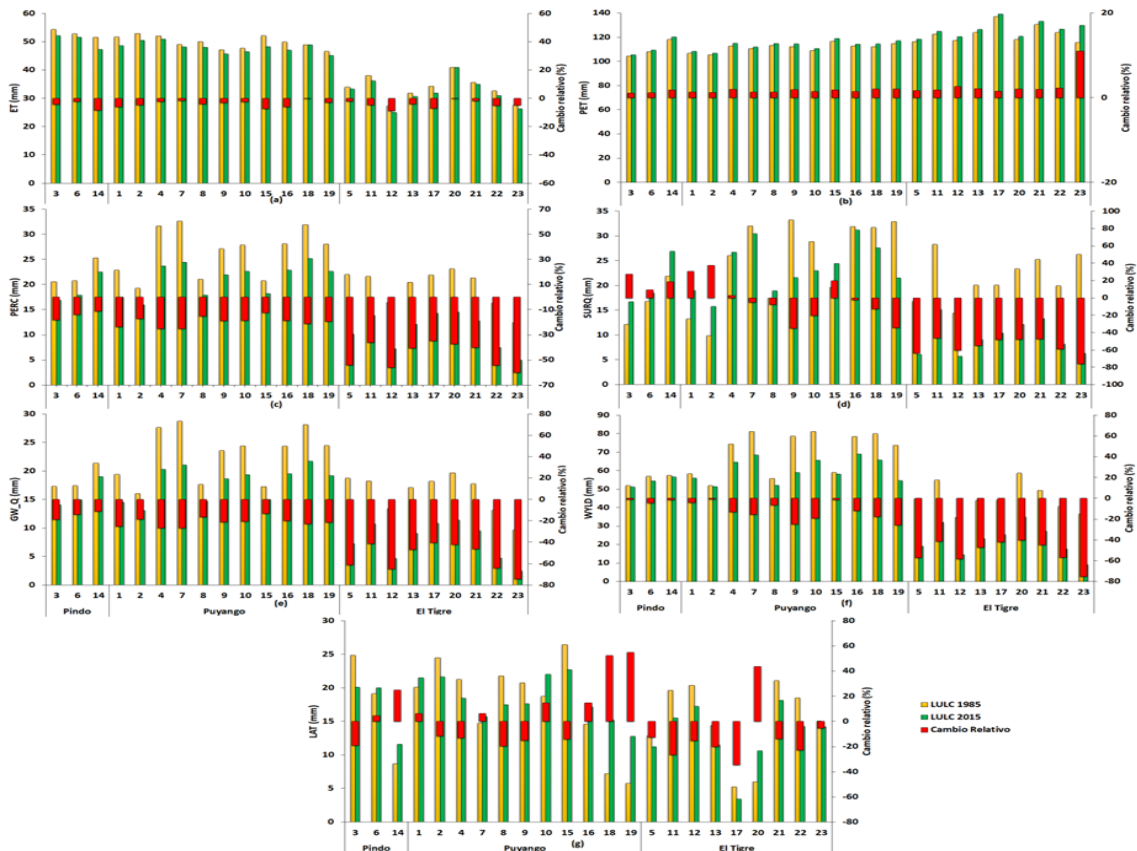


Figura 6. Media mensual de los parámetros del ciclo hidrológico: evaporación (ET) (a), evapotranspiración potencial (PET) (b), percolación (PERC) (c), caudal superficial (SURQ) (d), agua subterránea (GW_Q) (e), rendimiento hídrico (WYLD) (f) y caudal lateral (LAT_Q) (g) para los escenarios LULC_1985 y LULC_2015.

Además, los valores obtenidos para el PERC tuvieron una tendencia decreciente significativa para todas las subcuencas, con cambios relativos que van desde -60.11 (subcuenca 23) hasta -11.19 %

(subcuenca 14), registrando una variación mensual relativa de -29.19 % (Tabla 6, Figura 6 c). Tal disminución del PERC de 27.37 mm (promedio mensual) provocó la reducción en la disponibilidad de agua desde el fondo del perfil del suelo hasta el acuífero somero, produciendo un impacto negativo en la disponibilidad de GW_Q cuya reducción promedio registró 6.00 mm.

Los valores de GW_Q experimentaron cambios mensuales relativos de -74.56 % (subcuenca 23) a -11.17 % (subcuenca 14), registrando un cambio relativo promedio mensual, con incrementos mensuales de -33 % (Ver Tabla 6, Figura 6 e).

La mayor contribución a WYLD fue causada por los flujos superficiales y subterráneos. La tendencia decreciente de GW_Q superó el efecto positivo en el WYLD de la cuenca, resultando en una disminución de 26.64 % en el rendimiento promedio relativo durante el período estudiado, con variaciones relativas mensuales de -75.34 a -0.88 %. Estos resultados conducen a una disminución de 13.74 mm en el WYLD promedio mensual para la cuenca Puyango Tumbes (Ver Tabla 6, Figura 6 f).

Discusión

Respuesta de modelado hidrológico

SWAT es uno de los modelos más utilizados al simular el balance hídrico dentro de una cuenca (Thai et al., 2017; Tuppad et al., 2011). Sin embargo, el software tiene algunas limitaciones relacionadas principalmente con la gran cantidad de parámetros de entrada.

En este estudio, la información de lluvia de RAIN4PE y temperatura de PISCO se utilizó como una base de datos climática para la entrada del modelo. Esto condujo a una representación satisfactoria del comportamiento del caudal total en la cuenca una vez calibrado el modelo para los diferentes escenarios de usos del suelo. Los resultados obtenidos validan la base de datos empleada para ser utilizada dentro del modelo SWAT para las cuencas ubicadas en la zona limítrofe de Ecuador y Perú.

Respuesta hidrológica y LULC

El estudio muestra que los LULC que se produjeron entre 1985 y 2015 en la cuenca del río Puyango Tumbes se caracterizaron por un aumento sustancial de la cubierta forestal. Los bosques y matorrales nativos fueron incrementados ligeramente debido a programas de protección y

conservación de especies nativas. Pero además el notable impacto por el aumento progresivo de pasto afecta directamente el comportamiento de los componentes del ciclo hidrológico.

En la cuenca la PET presenta las mayores variaciones, con impactos sobre la producción de caudal de la cuenca. Según (Moran-Tejeda et al., (2014), la PET es el elemento clave para comprender el efecto del cambio en el uso de la tierra en la producción de agua. En esta cuenca, el aumento de 30.08 mm por año de PET entre LULC_1995 y LULC_2015 podría deberse al aumento de las plantaciones forestales y pastizales. Durante 1995, las plantaciones forestales ocuparon el 33.3 % del área de la cuenca; mientras que, en el 2015, el porcentaje de estas plantaciones casi se duplicó, ocupando el 53 % y de igual manera en el caso de pastizales paso del 23 % al 40 % de la superficie de la cuenca.

El aumento de plantaciones forestales y pastizales ha provocado un aumento anual en las tasas de PET y SURQ de 2.14 % y 33.32 %, respectivamente. Posteriormente, se produce una disminución en PERC (29.19 %), LAT_Q (45.95), GW_Q (33 %) y en la WYLD (26.64 %).

El presente estudio presenta un uso del suelo dominado por bosques (coníferas siempreverde, árboles caducifolios y no caducifolios y plantas perennes leñosas) en tres escenarios diferentes (LULC_1995, LULC_2005 y LU_2015), mismos que representan el 33.3 %, 36.39 %, 53 % del área total de la cuenca, respectivamente. Además, el incremento progresivo son los pastizales con 23.42 %, 31.18 % y 40.3 %, crea un efecto en las aguas subterráneas y el WYLD durante los meses más secos. No así para la temporada de invierno, caracterizada por la mayor precipitación pluvial, esto y el aumento de pastizales incrementaron las tasas de pérdidas por intercepción y evapotranspiración, lo que provoca un menor almacenamiento de agua en el suelo.

El método utilizado fue un modelo hidrológico de base física y espacialmente semidistribuido (SWAT). Este método nos permite relacionar el clima de la zona de estudio (precipitaciones, temperaturas) con sus características biofísicas (topografía, suelo y uso del suelo), analizando los diferentes procesos hidrológicos en cualquier punto.

Este enfoque metodológico mejora sustancialmente el cálculo de los caudales de agua que circulan dentro de la cuenca. Dichos valores se validan con datos observados en las estaciones de flujo disponibles en la cuenca. En efecto, Benra et al., (2019) reconocen que es posible mejorar su análisis, particularmente en temas relacionados con la regulación del agua, incluyendo datos más detallados de variables complejas como PET y coeficiente de cultivo.

Conclusiones

- El modelo SWAT es una herramienta poderosa para predecir los impactos de los cambios de uso del suelo en la respuesta hidrológica de las cuencas binacional Ecuador – Perú, incluso con poca disponibilidad de datos. Este modelo hidrológico semidistribuido permite determinar el comportamiento de los componentes del ciclo hidrológico como ET, PERC, SURQ, LAT_Q, GW_Q y WYLD.
- El aumento del área de pastizales en 18.32 % y una reducción significativa de sabanas en 38.27 %, entre los escenarios LULC_1985 y LULC_2015, resultó en un aumento anual en las tasas de PET (2.14 %), produciendo posteriormente una disminución en PERC (29.19 %), SURQ (20.72 %), GW_Q (33.00 %), WYLD (26.64 %) y LAT_Q (0.93 %).
- El caudal total de la cuenca de Puyango Tumbes tuvo cambios significativos para el período de 35 años (de 1981 a 2015) con una confiabilidad del 95 % a escala diaria, los mismos que tienen una relación directa por el continuo aumento del área por pastizales con 18.32 %, además el papel de los bosques en 25.01 %, entre los escenarios LULC_1985 y LULC_2015, que influye en el aumento de las tasas de PET.
- Los resultados del presente estudio pueden ser utilizados en discusiones de políticas públicas y toma de decisiones que involucren cambios en la cobertura del suelo, ya que brindan herramientas con base científica, cuantificando los impactos causados sobre los recursos hídricos durante los últimos treinta años, principalmente como resultado de la sustitución de bosques nativos por plantaciones forestales. También puede ser una base importante para la investigación futura, incluidas las proyecciones del cambio de uso de la tierra combinado con los efectos del cambio climático.

Referencias

1. Abbaspour, K., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., & Zobrist, J. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Hydrology*, 333, 413–430.

2. Arnold, J., Moriasi, D., Gassman, P., Abbaspour, K., White, M., Srinivasan, R., & Kannan, N. (2012). SWAT: Model use calibration and validation. *Transactions of the ASABE*, 4, 1491–1508.
3. Benra, F., Nahuelhual, L., Gaglio, M., Gissi, E., Aguayo, M., Jullian, C., & Bonn, A. (2019). Ecosystem services tradeoffs arising from non-native tree plantation expansion in southern Chile. *Landscape Urban Planning*.
4. Bosch, J., & Hewlett, J. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Hydrology*, 55(1–4), 3–23.
5. Cibin, R., & Sudheer, K. P. (2010). Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. *Hydrology*, 24, 1133–1148.
6. CIREN. (1999). *Descripciones de Suelos: Materiales y Símbolos*. CIREN N 121: Santiago, Chile.
7. Dale, V., Efroymson, R., & Kline, K. (2011). The land use-climate change-energy nexus.
8. Fernandez-Palomino, C., Hattermann, F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., Santini, W., Aybar, C., & Bronstert, A. (2021). Rain for Peru and Ecuador (RAIN4PE). Potsdam Institute for Climate Impact Research.
9. Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., & Hoell, A. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. *Science*, 2.
10. Legesse, D., Vallet-Coulomb, C., & Gasse, F. (2003). Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: Case study South Central Ethiopia. *Hydrology*, 67–85.
11. Lewis, S., & Maslin, M. (2015). Defining the Anthropocene. 171–180.
12. Li, H., Zhang, Y., Vaze, J., & Wang, B. (2012). Separating effects of vegetation change and climate variability using hydrological modelling and sensitivity-based approaches. *Hydrology*, 403–418.
13. Lin, Y., Hong, N., Wu, P., Wu, C., & Verburg, P. (2007). Impacts of land use change scenarios on hydrology and land use patterns in the Wu-Tu watershed in Northern Taiwan. 111–126.

14. Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Stehr, A., Sauvage, S., Echeverría, C., & Sánchez-Pérez, J. M. (2020). Effect of land use/cover change on the hydrological response of a southern center basin of Chile. *Water (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/w12010302>
15. Moran-Tejeda, E., Zabalza, J., Rahman, K. ., Gago-Silva, A. ., López-Moreno, J., Vicente-Serrano, S. ., & Beniston, M. (2014). Impactos hidrológicos del clima y los cambios de uso de la tierra en una cuenca hidrográfica de montaña: estimación de la incertidumbre basada en la comparación de modelos. *Ecohidrología*, 1396–1415.
16. Otero, L., Contreras, A., & Barrales, L. (1994). Análisis de los efectos ambientales del reemplazo de bosques nativos por plantaciones (efectos sobre cuatro microcuencas en la provincia de Valdivia). *Cientific Investigation*, 253–276.
17. Rykiel, E. (2006). Testing ecological models: The meaning of validation. *Ecological Model*, 90, 229–244.
18. Schirpke, U., Leitinger, G., Tappeiner, U., & Tasser, E. (2012). SPA-LUCC: Developing land use/cover scenarios in mountain landscapes. *Ecological*, 68–76.
19. Shi, Z. H., Ai, L., Li, X., Huang, X. D., Wu, G. L., & Liao, W. (2013). Partial least-squares regression for linking land-cover patterns to soil erosion and sediment yield in watersheds. *Hydrology*, 498, 165–176.
20. Smith, B., & Zeder, M. (2013). The onset of the Anthropocene.
21. Thai, T., Thao, N., & Dieu, B. T. (2017). Assessment and Simulation of Impacts of Climate Change on Erosion and Water Flow by Using the Soil and Water Assessment Tool and GIS: Case Study in Upper Cau River basin in Vietnam. *Vietnam J.*
22. Thampi, S., Raneesh, K. Y., & Surya, T. (2010). Influence of Scale on SWAT Model Calibration for Streamflow in a River Basin in the Humid Tropics. *Water Resources*, 24, 4567–4578.
23. Tuppad, P., Douglas-Mankin, K. R., Lee, T., Srinivasan, R., Arnold, J. G., Srinivasan, R., & Member, A. (2011). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Hydrologic/ Water Quality Model: Extended Capability and Wider Adoption. *Transactions of the ASABE*, 54(5), 1677–1684.

24. United Nations Development Programme. (2015). Integrated Water Resources Management in Puyango-Tumbes, Catamayo-Chira and Zarumilla Transboundary Aquifers and River Basins.
25. Welde, K., & Gebremariam, B. (2017). Effect of land use land cover dynamics on hydrological response of watershed: Case study of Tekeze Dam watershed, northern Ethiopia. *Int. Soil Water Conserv.* , 1–16.
26. Zalasiewicz, J., Williams, M., Haywood, A., & Ellis, M. (2011). The anthropocene: A new epoch of geological time? 835–841.

© 2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).