

## Reporte en Formato de Publicación Científica

### Título

Generación de un análisis de riesgo climático para el sector Patrimonio Hídrico (Grupo A), mediante la aplicación de un modelo de impactos biofísicos.

### Cita sugerida

PNUD-MAATE, (2022). Generación de un análisis de riesgo climático para el sector Patrimonio Hídrico (Grupo A), mediante la aplicación de un modelo de impactos biofísicos. Proyecto PLANACC. Quito (Ecuador). Consultores: Fundación para la Investigación del Clima y Meteogrid S.L.

### Resumen

El objetivo de este trabajo es analizar el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos en cuatro unidades hidrográficas priorizadas en el Ecuador: Esmeraldas, Guayas, Pastaza y Jubones. Para evaluar los mencionados efectos se ha implementado el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) calibrado con el algoritmo SUFI-2. La bondad de la calibración y validación del modelo se ha analizado con las funciones objetivo (NSE, R2, PBIAS y KGE) en periodos con caudales observados diferentes para cada una de las unidades hidrográficas. Las proyecciones de precipitación y temperatura (periodo 2020-2050) proceden de las salidas globales CMIP del 6° Informe del IPCC. Como resultado, se analizan los aspectos cuantitativos del agua que son afectados por un cambio en el clima. Estos impactos climáticos se analizan también bajo un segundo escenario en el que se tienen en cuenta además los cambios proyectados en el uso del suelo a futuro.

### Abstract

The objective of this work is to analyze the impact of climate change on water resources in four prioritized hydrographic units in Ecuador: Esmeraldas, Guayas, Pastaza and Jubones. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model, calibrated with the SUFI-2 algorithm, was used to evaluate the effects of climate change on water resources. The goodness of fit of the model

calibration and validation was analyzed with the objective functions (NSE, R2, PBIAS and KGE) in periods with different observed flows for each of the hydrographic units. The precipitation and temperature projections (period 2020-2050) are derived from the global CMIP outputs of the 6th IPCC Report. As a result, the quantitative aspects of water that are affected by a change in climate are analyzed. These climate impacts are also analyzed under a second scenario in which projected changes in future land use are also taken into account.

## 1 Introducción

Los asuntos relacionados con los sistemas hidrológicos son críticos a la hora de determinar vulnerabilidades clave a nivel multisectorial y en las diferentes escalas territoriales. Los registros de observaciones y las proyecciones climáticas aportan abundante evidencia de que los recursos de agua dulce son vulnerables y pueden resultar gravemente afectados por el cambio climático, con muy diversas consecuencias para las sociedades humanas y los ecosistemas.

El agua es un patrimonio nacional estratégico para el Ecuador y un recurso transversal clave para el desarrollo de otros sectores estratégicos del país (e.g., patrimonio natural, salud, asentamientos humanos, agricultura y la gestión del riesgo (MAATE, 2018). En este sentido, el Patrimonio Hídrico lo constituyen los recursos hídricos presentes en todas las fases del ciclo hidrológico que se recogen dentro de las cuencas hidrográficas, fuentes y zonas de recarga hídrica; así como también los usos, aprovechamiento y disfrute del agua (MAATE, 2020). Por su parte, el marco normativo nacional garantiza el ciclo hidrológico como parte de un bien y derecho social en donde se propone una prevalencia en su uso. La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua del Ecuador (LORHUYA) en su Artículo 86 (2014) establece los niveles de prelación o importancia de la siguiente manera:

- En primer lugar, el consumo humano
- En segundo lugar, riego, que garantice la soberanía alimentaria
- En tercer lugar, el caudal ecológico
- En cuarto lugar, las actividades productivas

Los primeros resultados arrojados por el 6° Informe del IPCC (Arias et al., 2021; Douville, et al., 2021), señalan que algunos cambios observados en los

componentes del ciclo del agua y sus previsiones a futuro, justifican la necesidad de trabajar sobre la oferta hídrica natural. Por un lado, el cambio de uso del suelo y la extracción de agua para el riego han influido en las respuestas locales y regionales del ciclo del agua, y la deforestación a gran escala probablemente haya aumentado la escorrentía sobre las regiones deforestadas en relación con los efectos regionales del cambio climático. Respecto a las previsiones futuras que hace el 6° Informe, es de esperar que la variabilidad del ciclo del agua y los extremos relacionados aumenten más rápidamente que los cambios medios en la mayoría de las regiones del mundo y en todos los escenarios de emisiones. Además, estos cambios en los patrones de circulación atmosférica afectan directamente a dónde y con qué frecuencia se producen los fenómenos extremos; también indica que los aumentos previstos de la evapotranspiración debidos a la creciente demanda atmosférica de agua disminuirán la humedad del suelo de manera que algunas regiones tropicales experimentarán una mayor aridez, como la cuenca del Amazonas y América Central. La superficie total sujeta a sequía aumentará y las sequías serán más frecuentes y graves. Además, la superficie total sujeta a una mayor frecuencia y gravedad de las sequías se ampliará.

En el Ecuador se estima que habrá áreas que serán más susceptibles al exceso y otras a la escasez de precipitaciones. Esto afectaría la producción agropecuaria, la disponibilidad de agua para consumo humano, la generación hidroeléctrica y la condición de los ecosistemas (MAE, 2012). Además, el cambio climático afecta a la función y utilización de las infraestructuras hídricas existentes, en particular, la energía hidráulica, las protecciones estructurales contra inundaciones, el drenaje, y los sistemas de riego, así como a las prácticas de gestión hídrica. Ecuador experimentó un aumento de las temperaturas medias, mínimas y máximas entre 1960 y 2010. El aumento de la temperatura media observado fue de 1,4°C, las temperaturas máximas aumentaron en 1,0°C y las mínimas en 1,1°C. Las temperaturas máximas han aumentado entre 1°C por década en la alta montaña y 0,6°C por década en las regiones subpáramo. El número de noches cálidas ha aumentado, mientras que el número de noches frías ha disminuido (World Bank Group, 2021). El cambio climático ha producido en la región alteraciones que se evidencian en el caudal y disponibilidad de agua, el

retroceso de los glaciares andinos, afectaciones en la salud humana, así como la aparición de enfermedades en zonas donde antes no existían (CDKN, 2014). Esta realidad plantea grandes desafíos para América Latina y en el Ecuador, en particular.

En los últimos años, este marco ha suscitado un interés creciente de análisis e intervención que ha sido reflejado tanto en la normativa estatal como en los diversos instrumentos de la política y gestión territorial de Ecuador, que, en definitiva, ponen de manifiesto la necesidad de adoptar medidas concretas de mitigación y adaptación al cambio climático y de formular los documentos estratégicos de intervención necesarios que, a su vez, estén alineadas con los objetivos internacionales de cambio climático en un contexto global.

En este sentido, el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), como institución a cargo de los procesos de mitigación y adaptación en materia de Cambio Climático, a través de la Subsecretaría de Cambio Climático (SCC), ha liderado la elaboración de la Estrategia Nacional de Cambio Climático 2012-2025 (ENCC), con carácter transversal a los distintos sectores para hacer frente a los desafíos que presenta el cambio climático a la sociedad en general. La ENCC de Ecuador establece como objetivo específico “Manejar el patrimonio hídrico con un enfoque integral e integrado por Unidad Hidrográfica, para asegurar la disponibilidad, uso sostenible y calidad del recurso hídrico para los diversos usos humanos y naturales, frente a los impactos del cambio climático”. De ahí, que el proyecto Plan de Adaptación al Cambio Climático (PLANACC) en Ecuador establezca entre sus prioridades avanzar en un análisis riguroso que permita derivar insumos clave de impacto climático para la gestión exitosa del patrimonio hídrico, permitiendo una necesaria adaptación en un marco de baja incertidumbre.

Adicionalmente, para abordar dichos análisis de riesgo de forma exitosa, en el marco del proyecto PLANACC, se ha considerado oportuno utilizar las recientes salidas (HighResMIP experiments) de la fase 6 del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6, de sus siglas en inglés), para actualizar las proyecciones climáticas de Ecuador, las cuales constituyen insumos clave para analizar rigurosamente las amenazas climáticas y derivar análisis sectoriales de riesgo climático. Para dichos

análisis además se plantea el diseño de una metodología Ad-hoc mediante el uso de “modelos de impacto”, que permitirán reconocer los posibles “impactos biofísicos” sobre sistemas sectoriales priorizados, factibles de ser causados a futuro por los cambios del clima. Dentro de este marco de trabajo se enmarca el presente estudio, cuyo objetivo concreto es generar un análisis de riesgo climático para el sector Patrimonio Hídrico en Ecuador, mediante la aplicación de un modelo de impactos biofísicos.

A nivel conceptual, en la presente metodología se aplica el marco teórico del 6° Informe del IPCC, específicamente en su definición del riesgo climático mediante la aplicación de modelos de impactos biofísicos para el ciclo del agua. En este marco, las evaluaciones de los riesgos climáticos tienen en cuenta el posible cambio climático futuro, el desarrollo de la sociedad y las respuestas de los sistemas afectados. Esta evaluación combina múltiples líneas de evidencia incluyendo la modelización de los impactos a partir de las proyecciones climáticas, las observaciones y la comprensión de los procesos implicados. Este proceso se puede fundamentar a través del uso de los niveles de calentamiento global (GWL) como dimensión de integración para los estudios de impacto aplicados al ciclo hidrológico: cambios proyectados en los caudales de los ríos a nivel de cuencas a partir de varios conjuntos multimodelos diferentes (IPCC, 2022). Para abordar la simulación hidrológica existen varios modelos que tratan de reproducir el balance hidrológico en las cuencas, predecir el impacto de los ciclos climáticos y la actividad antropogénica y su interacción con el ambiente y el manejo. Dentro de estos modelos sobresale el SWAT (Soil and Water Assessment Tool) desarrollado por el ARS (Agricultural Research Service) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). Este modelo a nivel mundial ha mostrado ser una herramienta útil para la toma de decisiones y análisis de políticas públicas, propuesta de sistemas alternativos de manejo de la vegetación, estrategias de conservación de suelos, evaluación de impactos y mitigación del cambio climático, en otras, a nivel de parcela (De Carvalho y Steidle, 2011). Además, este modelo está diseñado para aprovechar las ventajas de los paquetes de Información Geográfica (ArcGIS o Qgis), lo que facilita el manejo y análisis de

grandes cantidades de información en cuencas grandes y complejas; y para predecir escenarios de cambio que pudieran ocurrir en un área, a partir de variables climáticas, topográficas, tipo de suelos, uso del suelo y vegetación, parámetros fisiotécnicos de las diferentes coberturas vegetales, características del manejo en terrenos de cultivo (labranza, rotación de cultivos y fertilización, entre otras), prácticas de manejo de suelo y agua y almacenamientos (riego, drenaje, bordería, presas).

## 2 Metodología

La aplicación del modelo SWAT se divide en dos etapas (Figura 1): en la primera etapa se priorizan las unidades hidrográficas a analizar, y se calibran y validan los parámetros del modelo para establecer la línea base de análisis y poder analizar los resultados de balance hídrico y la disponibilidad de agua en el escenario actual. En la segunda etapa, con el modelo calibrado en la condición actual, se proyecta el balance hidrológico en las unidades hidrográficas priorizadas, para estimar la disponibilidad de agua bajo el contexto de cambio climático y evaluar los impactos biofísicos derivados.

### 2.1 Priorización y selección de unidades hidrográficas

La selección de áreas prioritarias objeto de análisis se ha llevado a cabo a través de un procedimiento secuencial compuesto por 5 pasos principales: (I) selección de unidades hidrográficas con disponibilidad de datos de caudal de calidad (MAATE & PNUD, 2021), (II) identificación de criterios analíticos derivados de las circunstancias nacionales con implicación directa sobre el estado de diagnóstico y las prioridades de intervención y gestión del patrimonio hídrico del Ecuador, (III) análisis multicriterio espacializado a través del desarrollo e integración normalizada de un conjunto de indicadores que reflejan el nivel de prioridad analítica por unidad hidrográfica (Tabla 1), (IV) procedimiento de validación y retroalimentación de resultados preliminares con el grupo de actores claves para el Patrimonio Hídrico del Ecuador y (V) selección final de cuatro áreas prioritarias en base a un ejercicio final de integración de resultados (Figura 2).

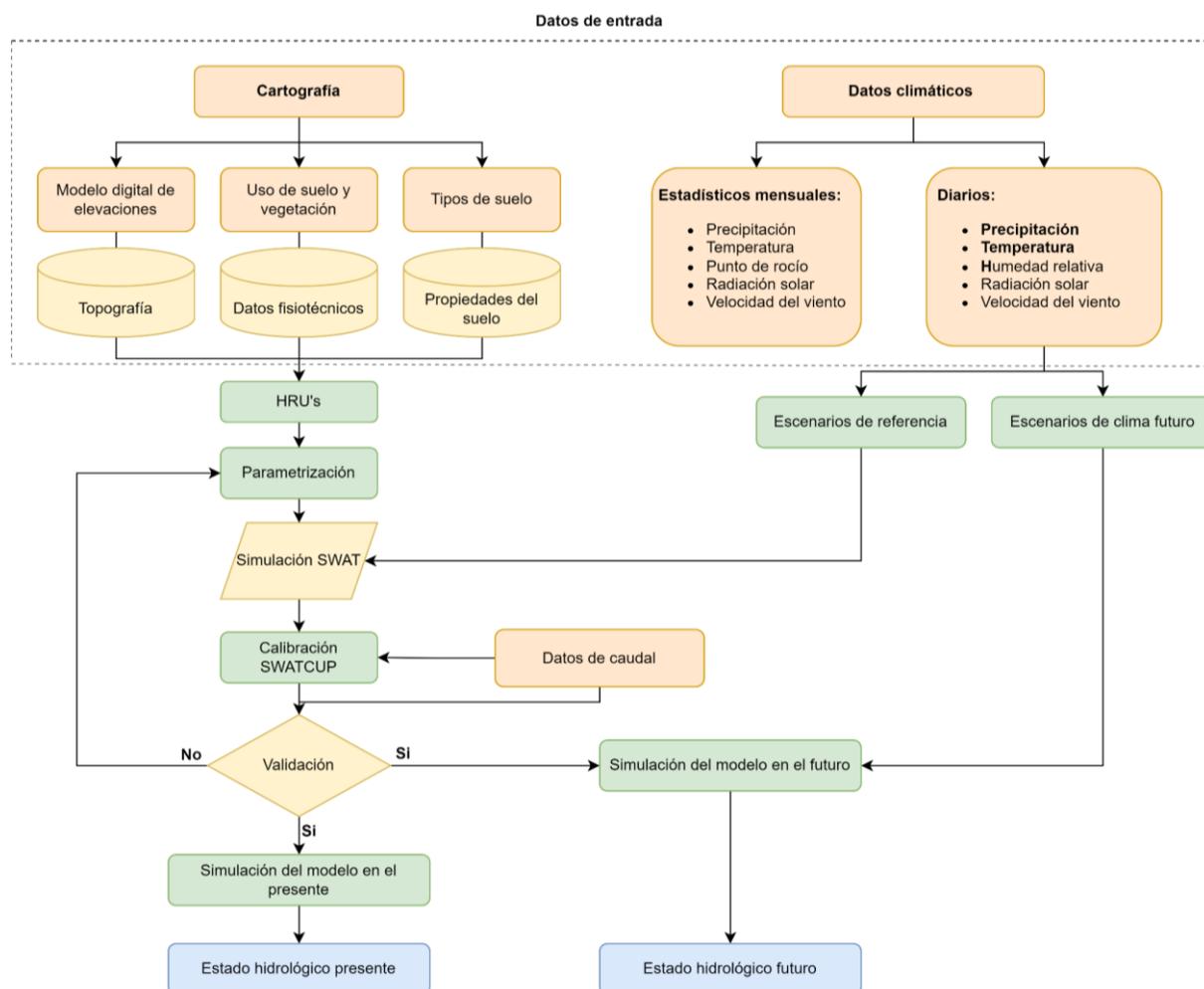


Figura 1. Esquema metodológico general del estudio.

Tabla 1. Resumen de Criterios, Sub-criterios e Indicadores de priorización de unidades hidrográficas

|   |  |
|---|--|
| <b>Criterio 1: Incidencia del cambio climático en las cuencas del Ecuador</b> |  |
| Sub-criterio 1.1  | Áreas con mayor incidencia del cambio climático ya registrado  |
| Indicador 1   | Anomalía registrada en la temperatura del aire   |
| Indicador 2   | Anomalía registrada en las precipitaciones   |
| <b>Criterio 2: Exposición climática en las cuencas del Ecuador</b>            |  |
| Sub-criterio 2.1  | Áreas con mayor susceptibilidad a eventos de sequías   |
| Indicador 3   | Porcentaje de área expuesta a peligro medio o alto de sequías  |
| Sub-criterio 2.2  | Áreas con mayor susceptibilidad de desertificación   |
| Indicador 4   | Porcentaje de cubierta natural expuesta a peligro medio o alto de desertificación                              |
| Sub-criterio 2.3  | Áreas con mayor susceptibilidad por amenaza de deslizamientos y desprendimientos causados por lluvias extremas |
| Indicador 5   | Porcentaje de área expuesta a peligro medio o alto de deslizamientos por lluvias extremas                      |
| <b>Criterio 3: Importancia biológica de las cuencas del Ecuador</b>           |  |
| Sub-criterio 3.1  | Áreas de importancia ecológica (áreas protegidas, bosques protectores y áreas de protección hídrica)           |
| Indicador 6   | Cuencas con mayor porcentaje de áreas protegidas, bosques protectores y áreas de protección hídrica.           |
| <b>Criterio 4: Importancia socioeconómica de las cuencas del Ecuador</b>      |  |
| Sub-criterio 4.1  | Escasez de agua (balance oferta-demanda)   |
| Indicador 7   | Nivel de déficit hídrico o escasez basado en la demanda de agua actual   |
| Indicador 8   | Nivel de déficit hídrico o escasez basado en la demanda de agua futura   |
| <b>Criterio 5: Extensión de la cuenca</b>                                     |  |
| Indicador 9   | Extensión espacial de la cuenca  |

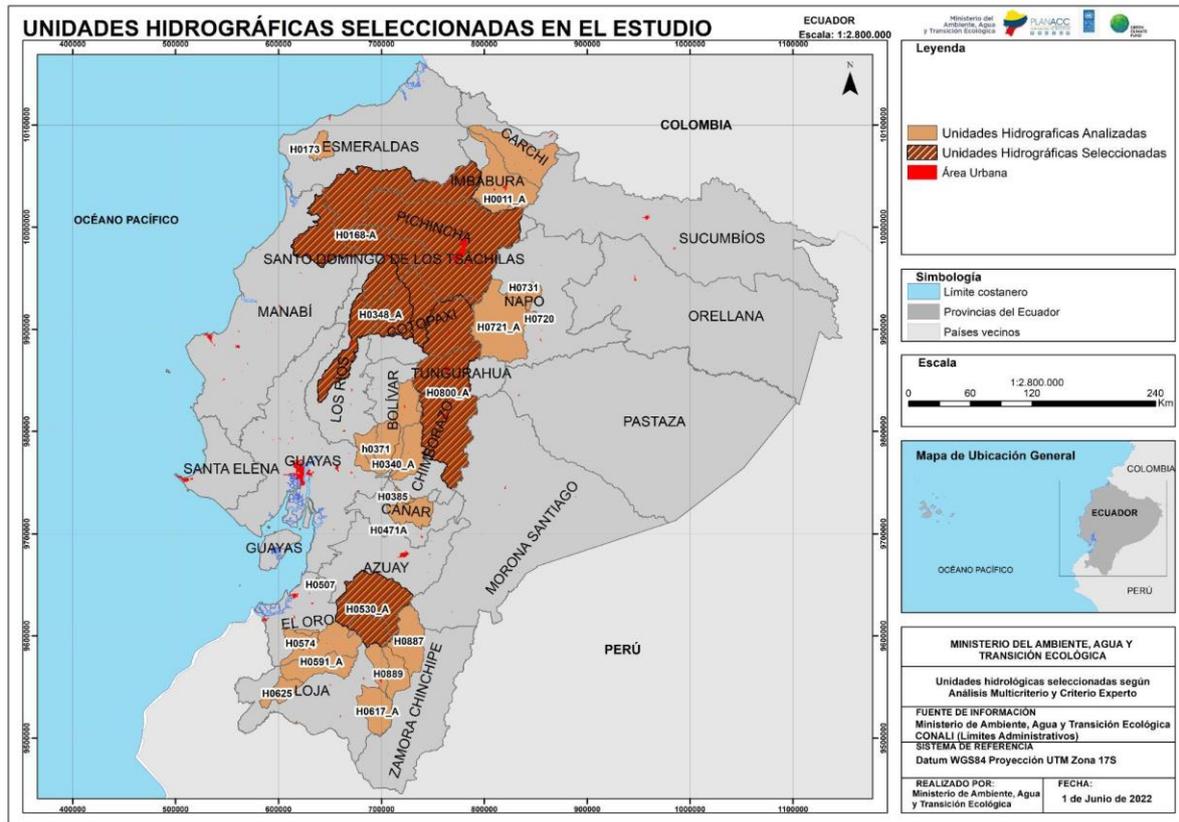


Figura 2. Unidades hidrográficas seleccionadas en el estudio con una superficie total de 35.337 km<sup>2</sup>; Esmeraldas, al norte, Guayas, al noroeste; Pastaza en el área central y Jubones, al sur.

## 2.2 Obtención de sub-cuencas y unidades de respuesta hidrológica

El modelo SWAT se ha implementado utilizando la herramienta *Watershed Delineator* incluida en la extensión para ArcGIS 10.4, ArcSWAT 2012.10\_4.21 publicada el 10/Sep/2018. Para la delimitación de cada unidad, y de las sub-cuencas de éstas, se parte del Modelo Digital de Elevación generado por la NASA a partir de la misión topográfica denominada SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), con resolución de 30 m. Junto con el MDE, se agregan a SWAT las coberturas de la red hidrográfica suministrada por el MAATE y se indica la estación hidrométrica de salida de cada unidad (Tabla 2). A partir de ello, SWAT delimita las sub-cuencas resultantes. En la elaboración de las unidades de respuesta hidrológica se emplea el Mapa de Cobertura y Uso

del Suelo del MAGAP (2015) a escala 1:25.000, codificada con la base de datos del SWAT utilizando la metodología descrita por Bobal et al. (2010) y El-Sadek e Írvem (2014). La edafología de la cuenca se extrae del Mapa Geopedológico del MAGAP (2015) a escala 1:25.000 codificado según la base de datos Harmonized World Soil Database (HWSD, 2012, 2017), a escala 1:1000000, que recoge las unidades de suelo (códigos) establecidas en FAO (1990) y WRB (2014). La pendiente ha sido dividida en varias clases según la unidad. Dichos umbrales se fijaron tras realizar varias pruebas de sensibilidad del modelo, cuya bondad fue analizada a través de los estimadores Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) (Nash y Sutcliffe, 1970), Coeficiente determinación (R<sup>2</sup>) (Moriasi et al., 2007; Abbaspour, 2015) y Coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta (KGE) (Gupta et al. 1998). A partir de las coberturas indicadas (Figura 3) se obtuvieron las HRU.

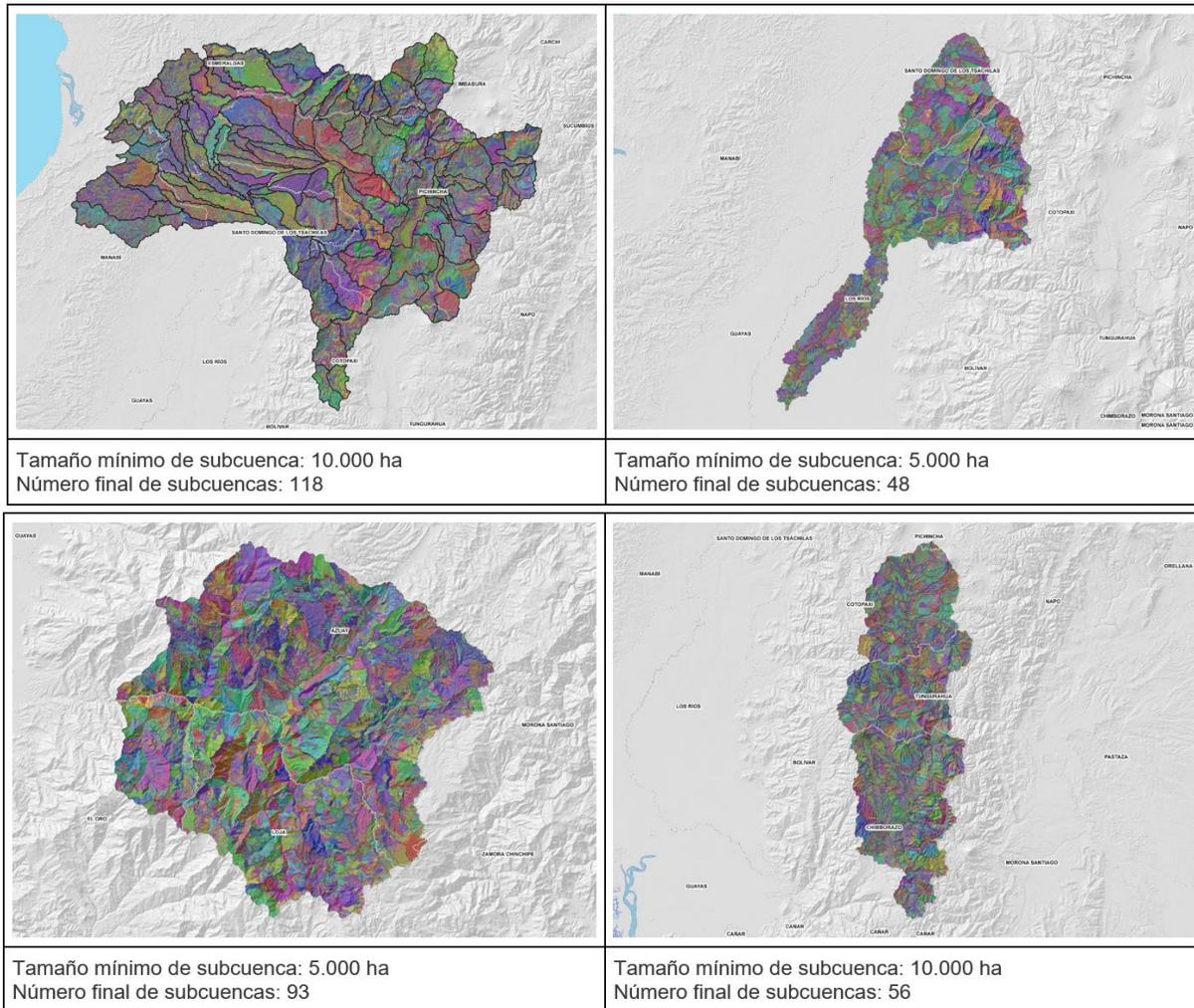


Figura 3. Unidades de respuesta hidrológicas obtenidas para cada unidad hidrográfica a partir de la herramienta *Watershed Delineator* incluida en la extensión para ArcGIS 10.4

### 2.3 Calibración del modelo

Posterior a la definición de los HRU, se introducen los datos climatológicos diarios para el periodo 1985-2015, específicamente rejillas simuladas de precipitación y temperatura suministrados por el MAATE (a partir de datos observados procedentes del INAMHI), junto con datos de radiación y velocidad del viento provenientes del CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) para el mismo periodo. Para cada HRU, SWAT calcula la lámina de escorrentía aplicando la metodología del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS). La caracterización de las condiciones específicas de la unidad hidrológica, se logra a partir de la calibración de los parámetros que intervienen en la generación de escorrentía y producción de sedimentos, tales como; capacidad de agua disponible, número de curva, práctica de manejo del

uso del suelo, factor de erodabilidad, entre otros. El periodo histórico de observación se divide en dos bloques (Tabla 2); para la calibración se utiliza un periodo de varios años, diferente para cada una de las unidades hidrográficas, lo más homogéneo posible (con datos observados lo más completos posible), y para la validación se utilizan registros diferentes a los periodos anteriores. Además de lo anterior, para el ajuste inicial de los parámetros del modelo se utilizan tres años de entrenamiento anteriores al periodo simulado.

Tabla 2. Periodos de calibración y validación seleccionados para efectuar las corridas finales del modelo, junto con la estación de medida de caudal seleccionada.

| UH         | Estación | Calibración | Validación  |
|------------|----------|-------------|-------------|
| Esmeraldas | H0168    | 2003-2008   | 2010-2013   |
| Guayas     | H0348    | 1998-2001   | 2007 - 2010 |
| Jubones    | H0530    | 2003-2007   | 2008 - 2011 |
| Pastaza    | H0817    | 2007-2010   | 2011-2013   |

Para la calibración del modelo se emplea el programa SWAT CUP-2019 y R-SWAT, concretamente se aplica el algoritmo SUFI-2 (Abbaspour et al., 2004, 2007), utilizando varias funciones objetivo diferentes o métricas de rendimiento, la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), la eficiencia de Kling-Gupta (KGE), el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) y el sesgo porcentual (PBIAS). Otros detalles de estas medidas, como su utilidad y rango satisfactorio de valores, son explicados por Moriasi et al. (2007). En todas las unidades se ha partido de los resultados obtenidos en la fase de corridas iniciales y se ha procedido a un proceso iterativo con pruebas de 400 o 1000 simulaciones cada una, refinando el rango de parámetros utilizado en cada prueba en base al método de calibración global, es decir, permitiendo el cambio de varios parámetros a la vez y sus posibles combinaciones. El programa sugiere nuevos rangos de parámetros para otra iteración, que modifica los rangos anteriores centrándose en el mejor conjunto de parámetros de la iteración actual (Abbaspour et al., 2004, Abbaspour et al., 2007). En base a lo anterior, se emplean iteraciones del modelo con los ajustes mejorados en cada nueva secuencia, identificando los parámetros de mayor bondad y que son explicativos de forma significativa para la descripción de los procesos hidrológicos. En total se emplearon 23 parámetros para las calibraciones finales en cada una de las unidades hidrográficas. Los resultados de la calibración final se muestran en las siguientes tablas (Tabla 3, 4, 5 y 6) y figuras (Figura 4, Figura 5, Figura 6 y Figura 7).

Tabla 3. Ajustes obtenidos para las corridas finales en la UH de Guayas a escala mensual

| Estimador      | Resultado final | Interpretación |
|----------------|-----------------|----------------|
| NSE            | 0.87            | Muy bueno      |
| PBIAS          | 0.07            | Muy bueno      |
| R <sup>2</sup> | 0.89            | Bueno          |
| KGE            | 0.80            | Bueno          |

Tabla 4. Ajustes obtenidos para las corridas finales en la UH de Esmeraldas a escala mensual.

| Estimador      | Resultado final | Interpretación |
|----------------|-----------------|----------------|
| NSE            | 0,85            | Muy bueno      |
| PBIAS          | -0,04           | Muy bueno      |
| R <sup>2</sup> | 0,87            | Bueno          |
| KGE            | 0.89            | Bueno          |

Tabla 5. Ajustes obtenidos para las corridas finales en la UH de Jubones a escala mensual.

| Estimador      | Resultado final | Interpretación |
|----------------|-----------------|----------------|
| NSE            | 0,68            | Muy bueno      |
| PBIAS          | 0,07            | Muy bueno      |
| R <sup>2</sup> | 0,69            | Bueno          |
| KGE            | 0,73            | Satisfactorio  |

Tabla 6. Ajustes obtenidos para las corridas finales en la UH de Pastaza a escala mensual

| Estimador      | Resultado final | Interpretación  |
|----------------|-----------------|-----------------|
| NSE            | -1,530          | Insatisfactorio |
| PBIAS          | 0,275           | Insatisfactorio |
| R <sup>2</sup> | 0,001           | Insatisfactorio |
| KGE            | -0,014          | Insatisfactorio |

La UH de Pastaza presenta problemas de inconsistencia general entre los datos observados de precipitación y caudal, por lo que no ha sido posible obtener resultados satisfactorios en la fase de calibración. Debido a ello, no se presentan los resultados del análisis de incertidumbre y validación del modelo que siguen en los siguientes apartados.

## 2.4 Análisis de incertidumbre

El algoritmo SUFI-2 del software SWAT-CUP ha sido empleado también para el análisis de incertidumbre que arroja el modelo. Este algoritmo mapea todas las incertidumbres (parámetro, modelo conceptual, entrada, etc.) de los parámetros (expresados como distribuciones uniformes o rangos) e intenta capturar la mayoría de los datos de medición dentro de la incertidumbre de predicción del 95% (95PPU) del modelo en un proceso iterativo. El 95PPU se calcula en los niveles 2,5% y 97,5% de la distribución acumulativa de una variable de salida obtenida mediante un muestreo de hipercubos. Para analizar la bondad del resultado se introducen dos índices (Abbaspour et al., 2004, 2007, 2015), el factor P y el factor R, cuyos resultados se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados del análisis de incertidumbre para cada unidad hidrográfica

| Índice   | Guayas | Esmeraldas | Jubones |
|----------|--------|------------|---------|
| P factor | 0,5    | 0,227      | 0,26    |
| R factor | 0,44   | 0,217      | 0,4     |

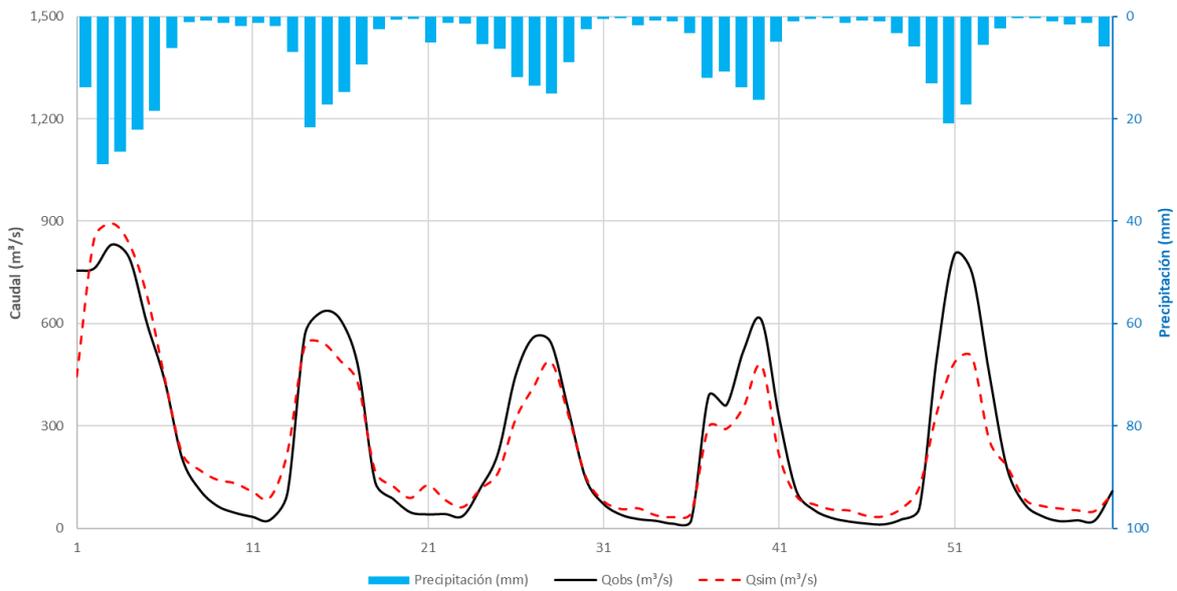


Figura 4. Curvas de caudal simulado y observado para el periodo de calibración de 1998-2001 en la unidad hidrográfica de Guayas a escala mensual.

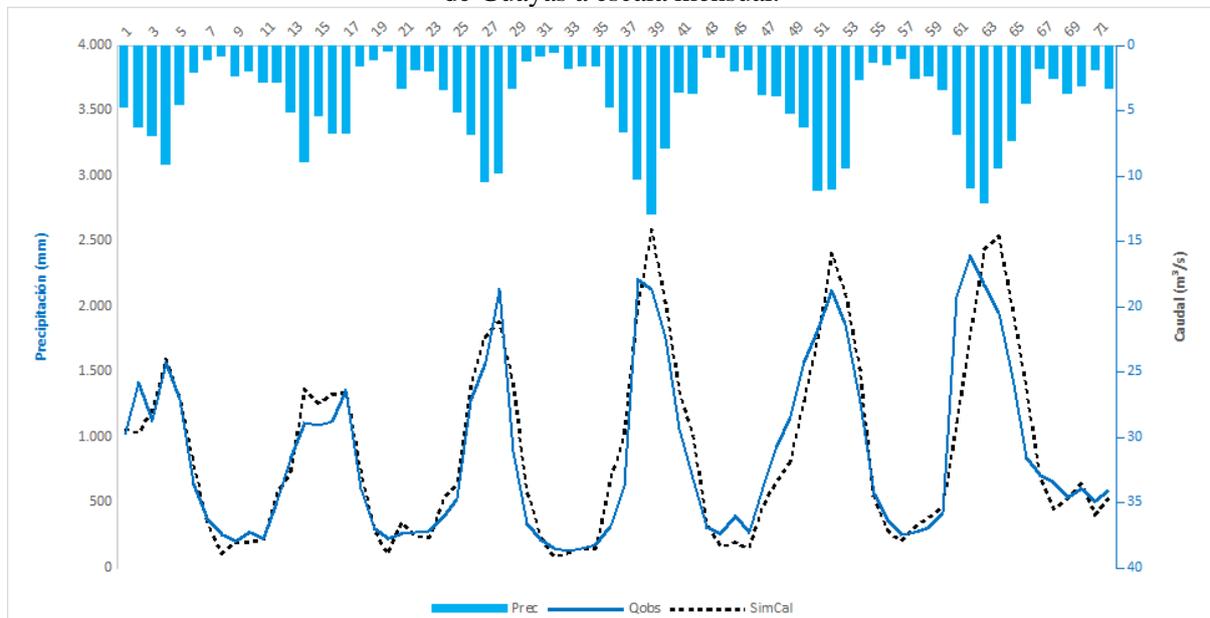


Figura 5. Curvas de caudal simulado y observado para el periodo calibrado 2003-2009 en la unidad hidrográfica de Esmeraldas a escala mensual.

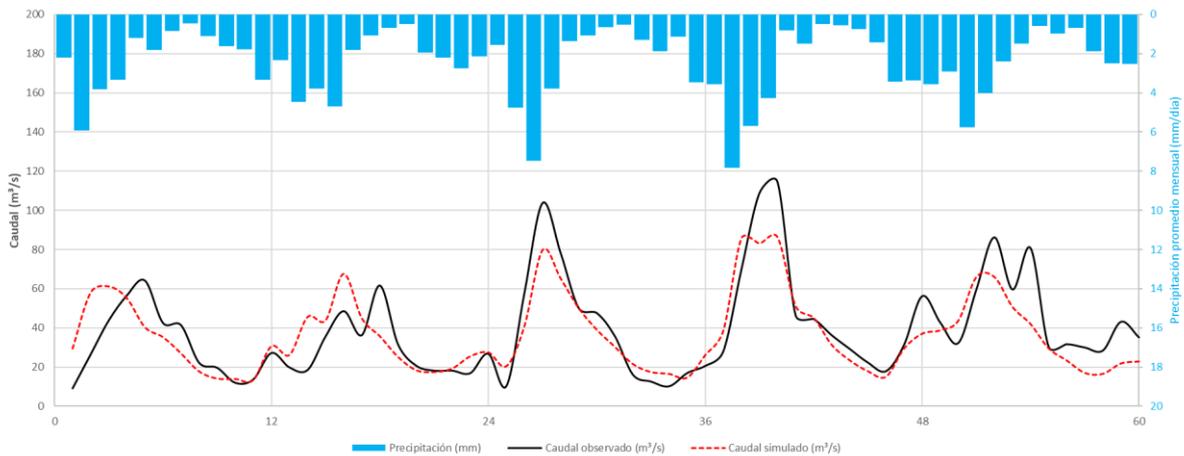


Figura 6. Curvas de caudal simulado y observado para el periodo calibrado 2003-2009 en la unidad hidrográfica de Jubones a escala mensual.

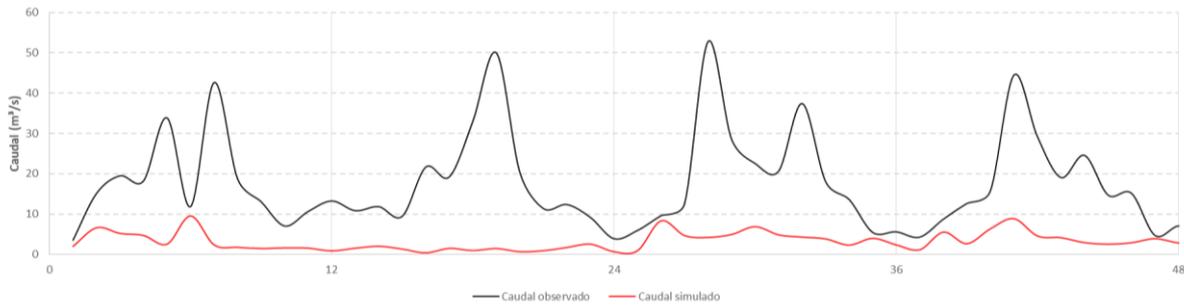


Figura 7. Curvas de caudal simulado y observado para el periodo calibrado 2003-2009 en la unidad hidrográfica de Pastaza a escala mensual.

## 2.5 Validación del modelo

Una vez calibrado el modelo y con resultados de sensibilidad mejorados y aceptables, se procede a validar el modelo. El procedimiento de validación consiste en lanzar el modelo utilizando los parámetros determinados en la calibración, de modo que éste sea capaz de realizar simulaciones próximas a los datos reales de la serie temporal destinada a validar el modelo, específicamente a través de la serie de caudal para el segundo periodo no considerado en la calibración del modelo. Finalmente, la validación se lleva a cabo analizando el ajuste entre el caudal simulado y observado a través de los mismos estimadores empleados en la calibración, estos son: PBIAS, R2, KGE y NSE. Los resultados se muestran en las siguientes tablas (Tablas 8, 9 y 10) y figuras (Figuras 8, 9 y 10).

Tabla 8. Ajustes obtenidos para las corridas finales en la UH de Guayas a escala mensual

| Estimador | Resultado final | Interpretación  |
|-----------|-----------------|-----------------|
| NSE       | 0,71            | Muy bueno       |
| PBIAS     | 0,30            | Insatisfactorio |
| R2        | 0,92            | Muy bueno       |
| KGE       | 0,5             | Satisfactorio   |

Tabla 9. Ajustes obtenidos para las corridas finales en la UH de Esmeraldas a escala mensual

| Estimador | Resultado final | Interpretación  |
|-----------|-----------------|-----------------|
| NSE       | 0,62            | Muy bueno       |
| PBIAS     | -0,27           | Insatisfactorio |
| R2        | 0,87            | Bueno           |
| KGE       | 0,59            | Satisfactorio   |

Tabla 10. Ajustes obtenidos para las corridas finales en la UH de Jubones a escala mensual

| Estimador | Resultado final | Interpretación |
|-----------|-----------------|----------------|
| NSE       | 0,80            | Muy bueno      |
| PBIAS     | -0,14           | Bueno          |
| R2        | 0,88            | Bueno          |
| KGE       | 0,82            | Bueno          |

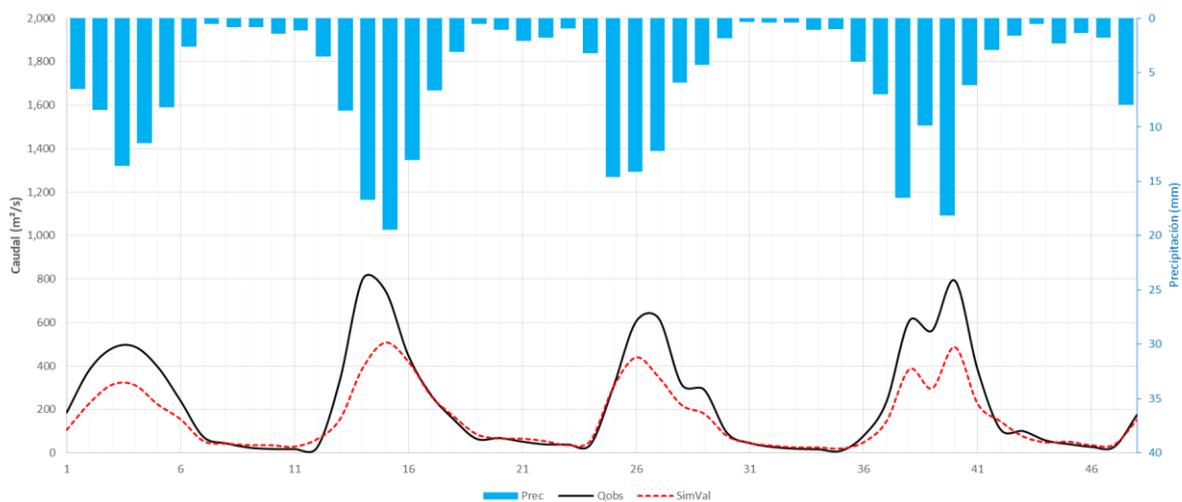


Figura 8. Gráfica comparativa entre el caudal observado y simulado para Guayas para el periodo de validación de 2007-2010 a escala mensual.

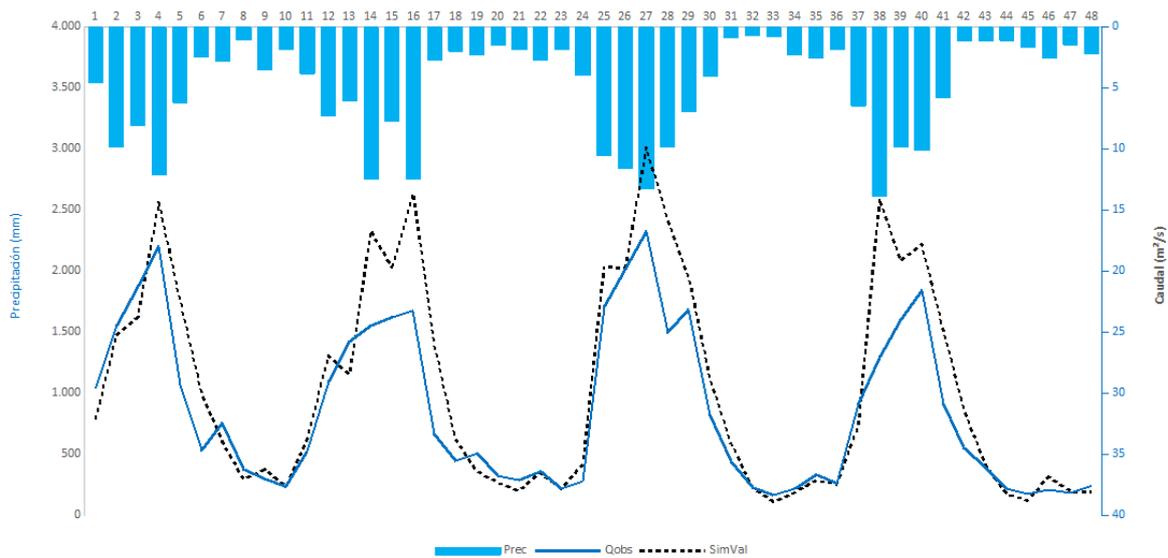


Figura 9. Gráfica comparativa entre el caudal observado y simulado para Esmeraldas para el periodo de validación de 2010-2013 a escala mensual.

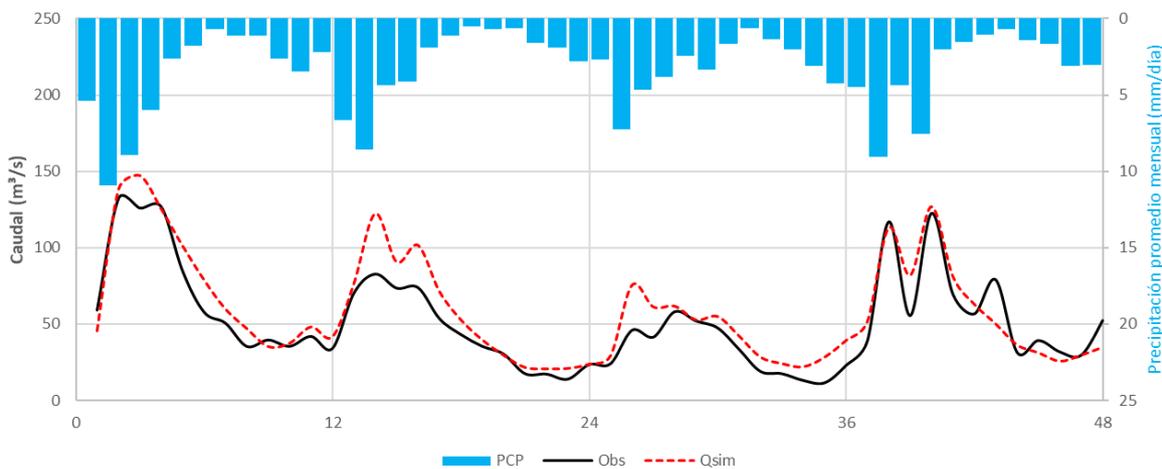


Figura 10. Gráfica comparativa entre el caudal observado y simulado para Jubones para el periodo de validación seleccionado de 2008-2011 a escala mensual.

## 2.6 Proyección del modelo hidrológico a futuro

En la segunda etapa (proyección o predicción), una vez calibrado y validado el modelo con la serie histórica, se proyecta la respuesta hidrológica de las unidades hidrológicas con los datos climáticos generados para el horizonte 2020-2050, correspondientes a los datos diarios de precipitación y temperatura para cada uno de los 5 años típicos (escenarios climáticos a 2050 para el Ecuador procedentes de las salidas del CMIP6 del IPCC generados por el MAATE en 2021 dentro del marco PLANNAC) (MAATE, 2021). Los datos de radiación solar, punto de rocío, lluvia máxima en media hora y velocidad del viento, se obtienen mediante interpolación a partir de datos del CFSR (Climate Forecast System Reanalysis).

Adicionalmente, las corridas a futuro consideran las demandas de agua mensualizadas para uso residencial, agrícola e industrial para el escenario proyectado a 2035 para cada una de las unidades hidrográficas del estudio, derivadas del Plan nacional de la gestión integrada e integral de los recursos hídricos de las cuencas y microcuencas hidrográficas de Ecuador (SENAGUA & CISPDR, 2015).

Además de lo anterior, en el marco del presente estudio se han analizado los cambios en el uso del suelo históricos ocurridos entre 1990 y 2018 para cada una de las unidades hidrográficas del estudio a escala de sub-cuenca, con el objetivo de proyectar los cambios que podrían darse a futuro y considerar su impacto en el ciclo hidrológico. Para ello, se toman en consideración las coberturas de la tierra en formato shp generadas por el MAATE a escala

1:100.000 para los años 1990 y 2018, más antigua y reciente respectivamente. Los cambios a futuro se analizan como estimadores porcentuales simples, directamente basados en los cambios observados, aplicando un mismo lapso temporal, en base a la metodología propuesta por Haseeb et al; 2021. Por lo tanto, los cambios observados en los 28 años transcurridos entre 1990 y 2018, serán extrapolados a los próximos 28 años, es decir, al año 2046.

Teniendo en cuenta lo anterior, se define como escenario futuro 1 aquel que considera el impacto del cambio climático y las demandas proyectadas en

el ciclo hidrológico, y se define como escenario futuro 2 aquel que considera, además de las entradas anteriores, los cambios proyectados en el uso del suelo. Para cada uno de los escenarios se han considerado los resultados medios de cada año típico, comparado respecto a la climatología media de 1985-2015, con el objetivo de evidenciar los cambios esperados en cada caso. A continuación, se presentan las gráficas de caudales medios proyectados a futuro para cada año típico y unidad hidrográfica en los escenarios a futuro 1 y 2 (Figura 11, 12, 13, 14, 15 y 16).

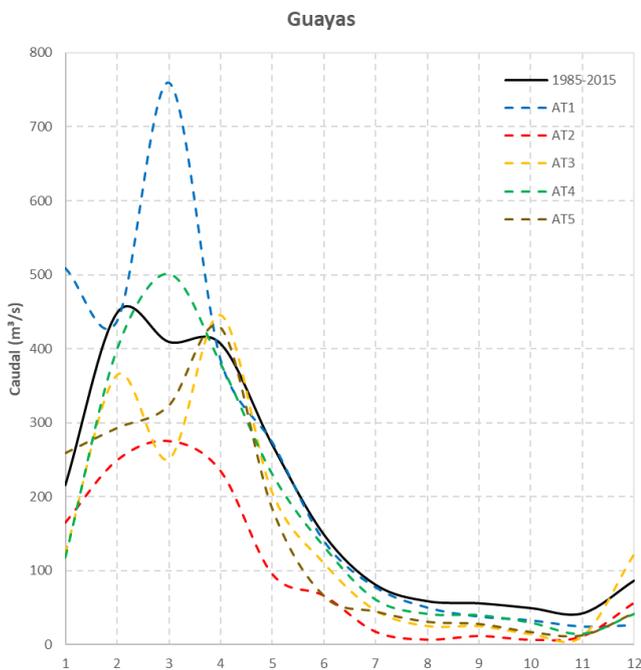


Figura 11. Resultados de las corridas a futuro en el escenario 1 para la unidad hidrográfica de Guayas

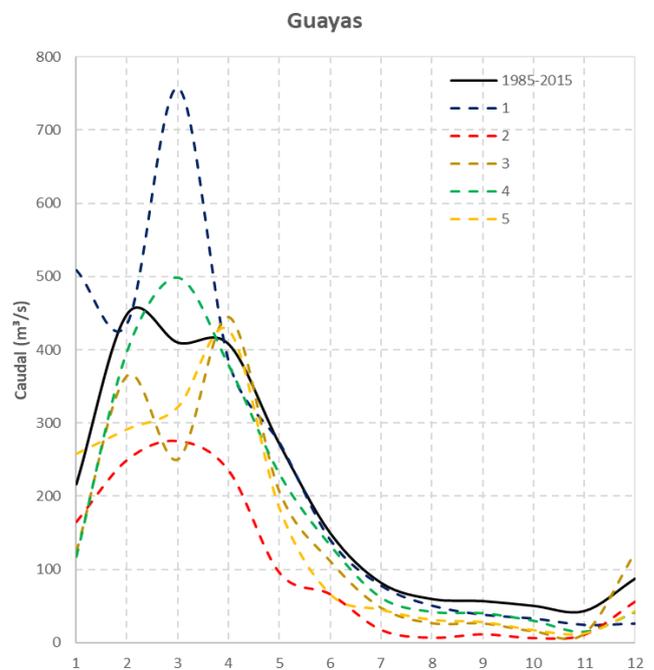


Figura 12. Resultados de las corridas a futuro en el escenario 2 para la unidad hidrográfica de Guayas

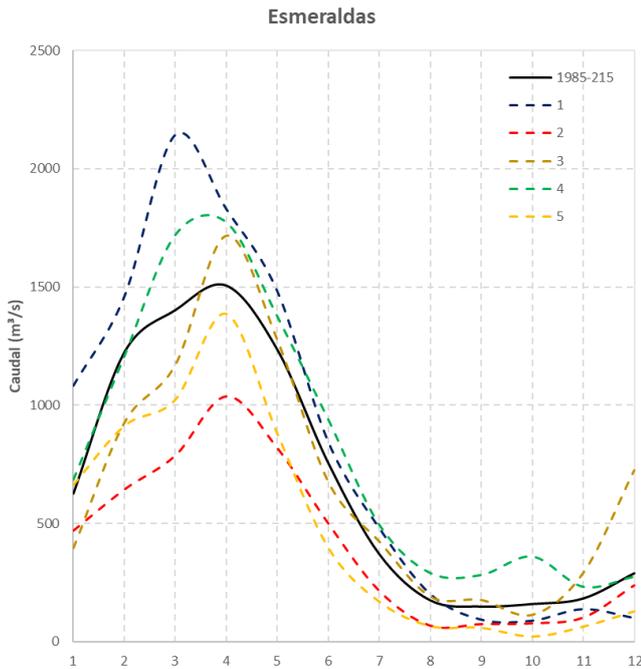


Figura 13. Resultados de las corridas a futuro en el escenario 1 para la unidad hidrográfica de Esmeraldas

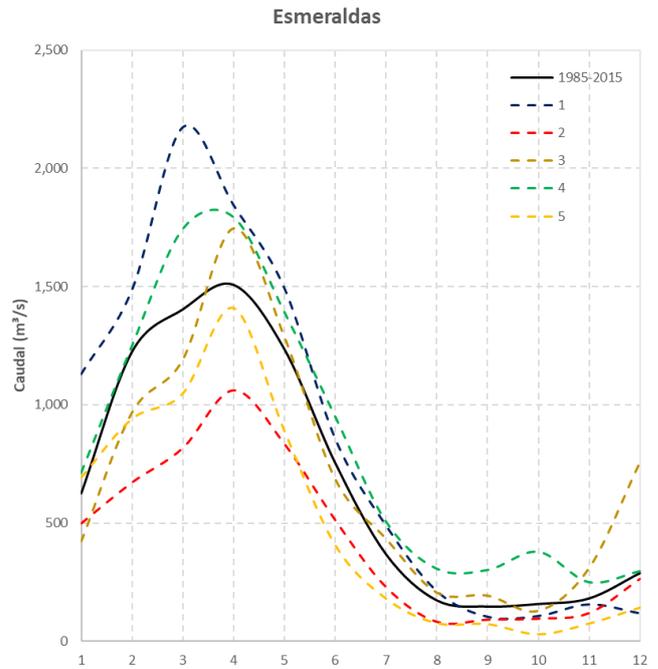


Figura 14. Resultados de las corridas a futuro en el escenario 2 para la unidad hidrográfica de Esmeraldas

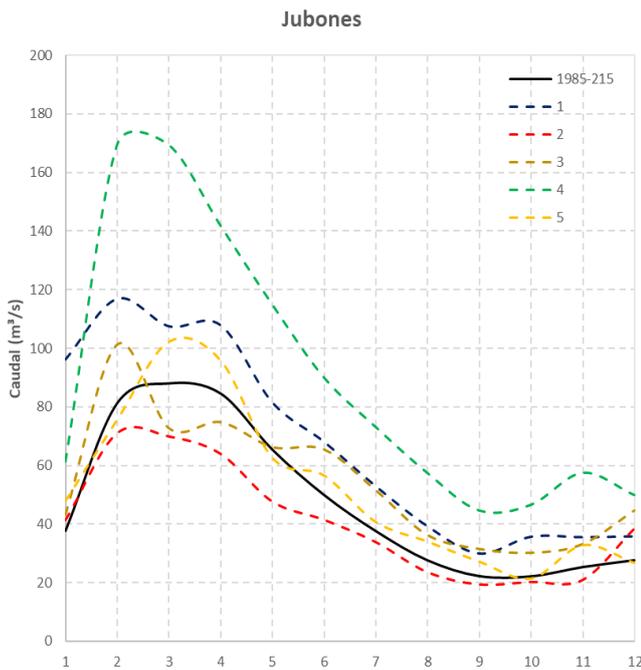


Figura 15. Resultados de las corridas a futuro en el escenario 1 para la unidad hidrográfica de Jubones

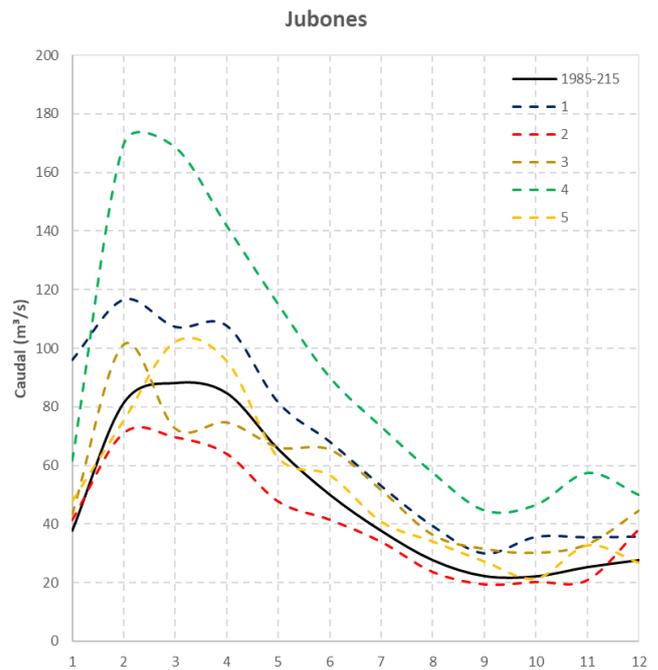


Figura 16. Resultados de las corridas a futuro en el escenario 2 para la unidad hidrográfica de Jubones

### 3 Resultados

En el marco de este estudio se han analizado, en primer lugar, los aspectos cuantitativos del agua que son afectados por un cambio en el clima (impactos comunes), como elemento vertebrador del estudio derivado de la aplicación específica del modelo

hidrológico SWAT. Para ambos escenarios futuros se han analizado estimadores de variación en el régimen hídrico (caudal/escorrentía media) en rangos anuales y estacionales; variaciones en la distribución temporal del flujo; niveles de escasez hídrico y el grado de alteración hidrológica, entre otros. Adicionalmente, se analizan los impactos por sequía a futuro, respecto a los registros históricos

meteorológicos. Concretamente, se analizan sequías meteorológicas (períodos de baja precipitación persistente) que se propagan con el tiempo generando déficits de humedad del suelo, de caudal y de almacenamiento de agua, lo que conduce a una escasez de agua, que lleva a una reducción del suministro de agua (sequía hidrológica).

En primer lugar, se analizan las variaciones de caudal anual para cada una de las unidades hidrográficas bajo el escenario 1 (cambio climático) y bajo el escenario 2 (cambio climático y cambio en los usos del suelo) por año típico climático, respecto al caudal promedio para el periodo histórico 1985-2015 (Figura 17, 18 y 19).

### 3.1 Variaciones de caudal anual

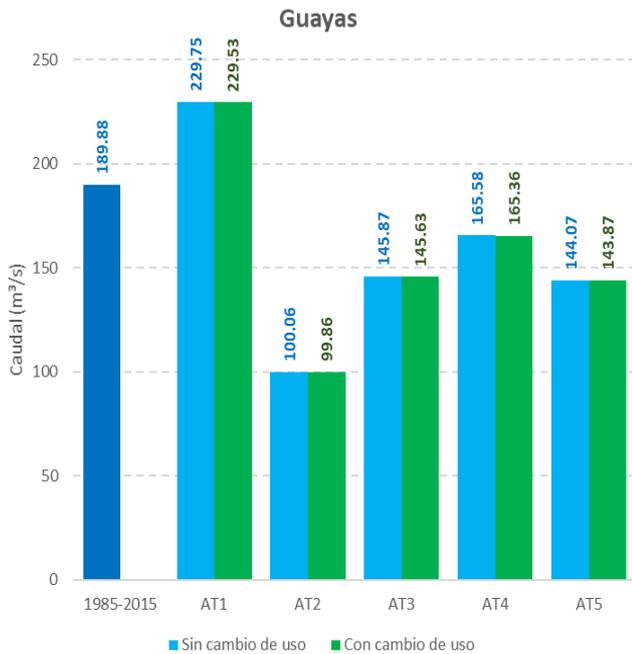


Figura 17. Gráfica comparativa del caudal (m<sup>3</sup>/s) para el escenario futuro 1 y 2 por año típico, respecto al caudal promedio 1985-2015 en la unidad de Guayas.

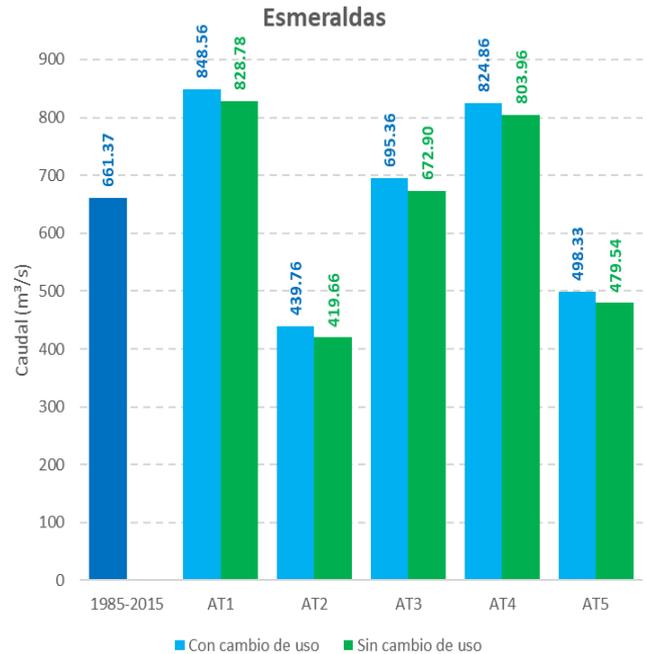


Figura 18. Gráfica comparativa del caudal (m<sup>3</sup>/s) para el escenario futuro 1 y 2 por año típico, respecto al caudal promedio 1985-2015 en la unidad de Esmeraldas.

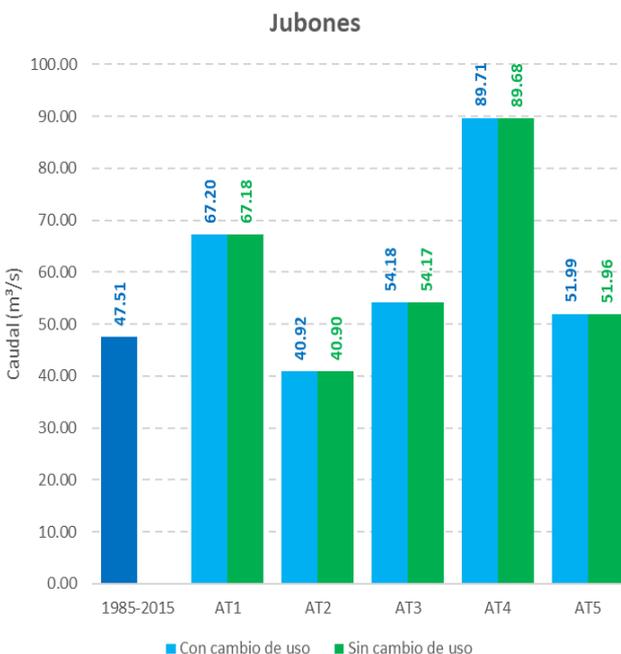


Figura 19. Gráfica comparativa del caudal (m<sup>3</sup>/s) para el escenario futuro 1 y 2 por año típico, respecto al caudal promedio 1985-2015 en la unidad de Jubones

### 3.2 Variaciones de caudal mensual

A continuación, se analizan las variaciones de caudal medio mensual para cada una de las unidades hidrográficas bajo el escenario 1 (cambio

Climático) y bajo el escenario 2 (cambio climático y cambio en los usos del suelo) de forma acumulada y por año típico, respecto al caudal mensual promedio para el periodo histórico 1985-2015 (Figura 20, 21 y 22)

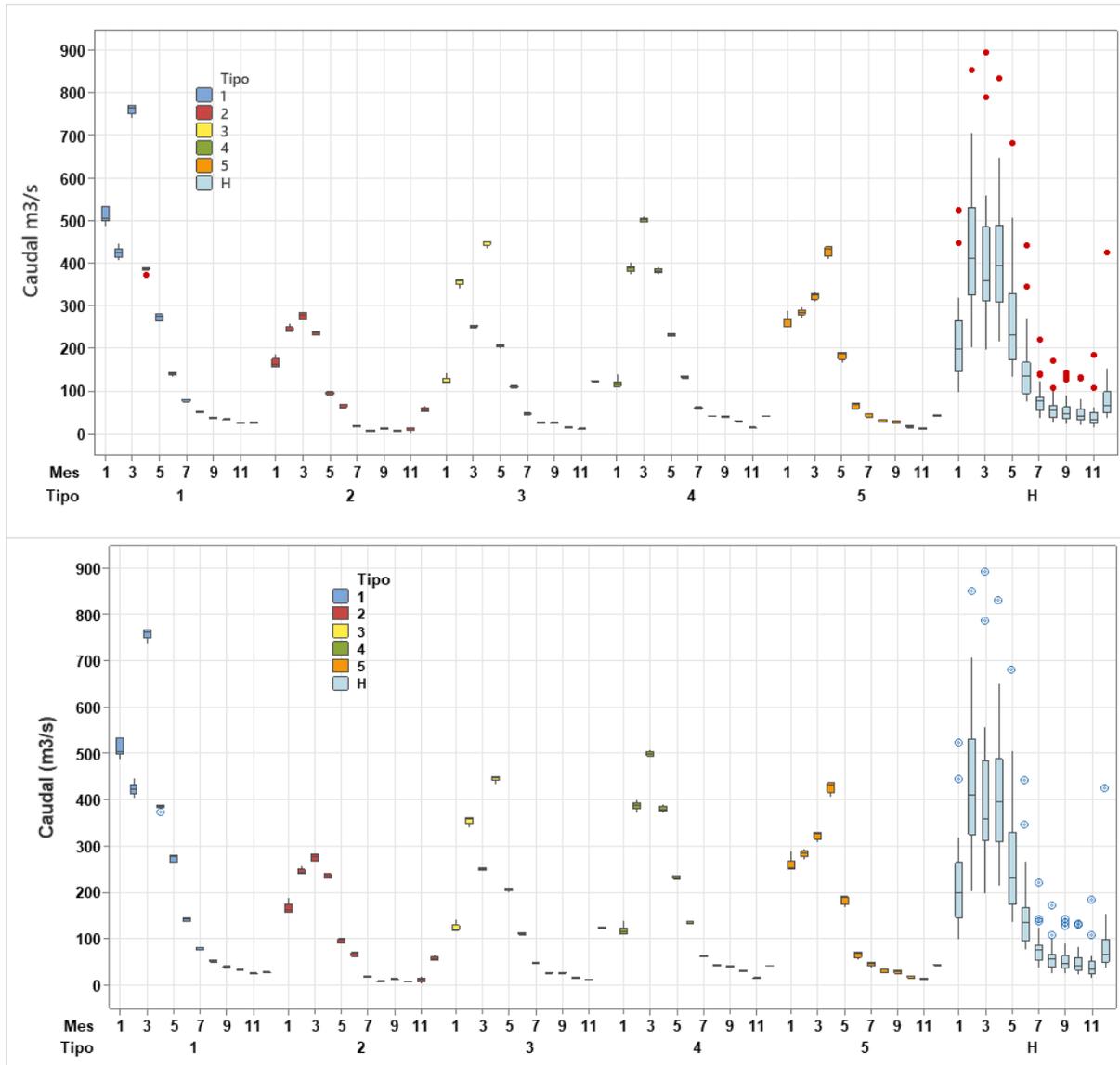


Figura 20. Distribución mensual de caudales por año típico en la unidad hidrológica Guayas para los escenarios futuros 1 (arriba) y 2 (abajo).

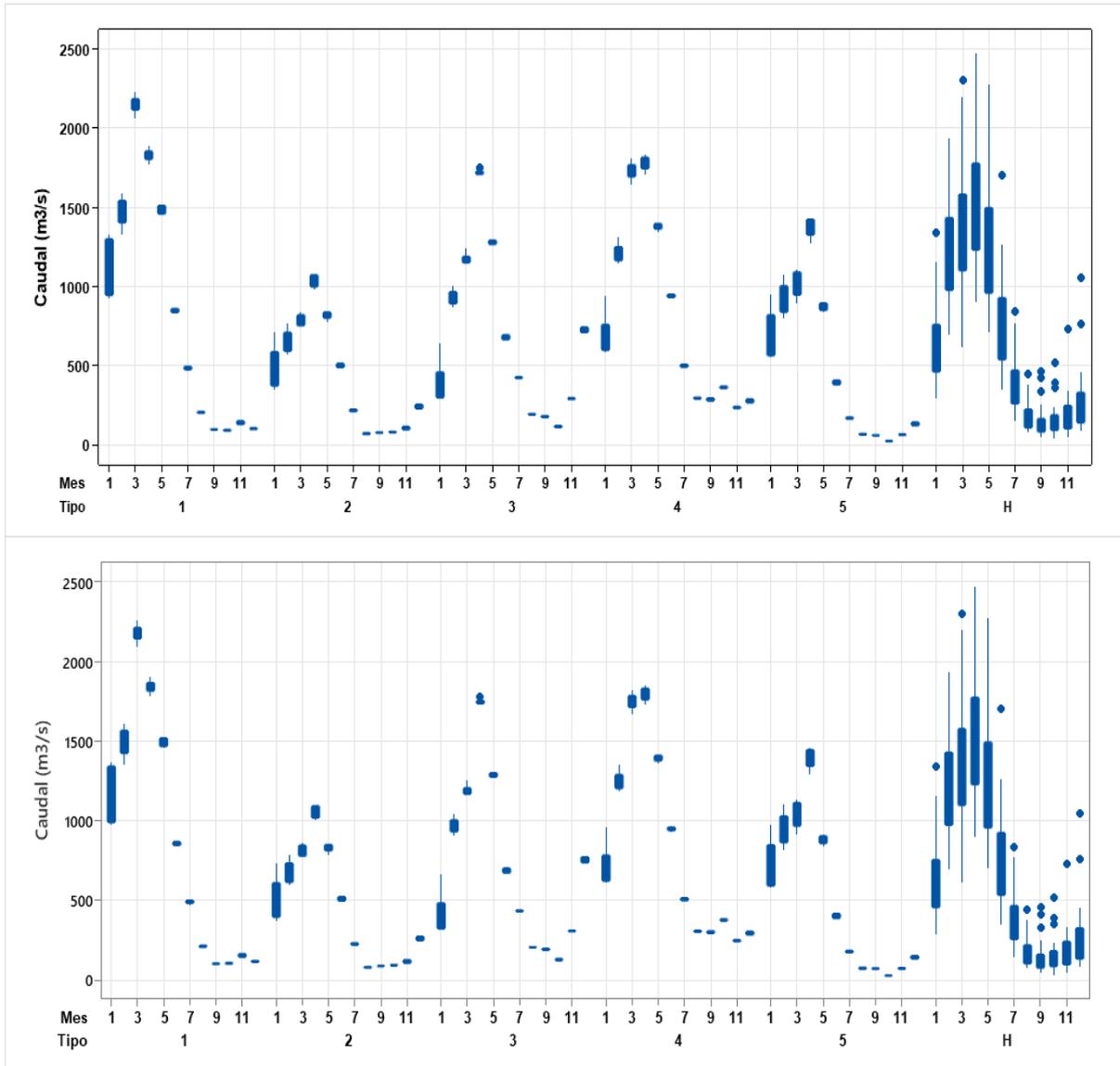
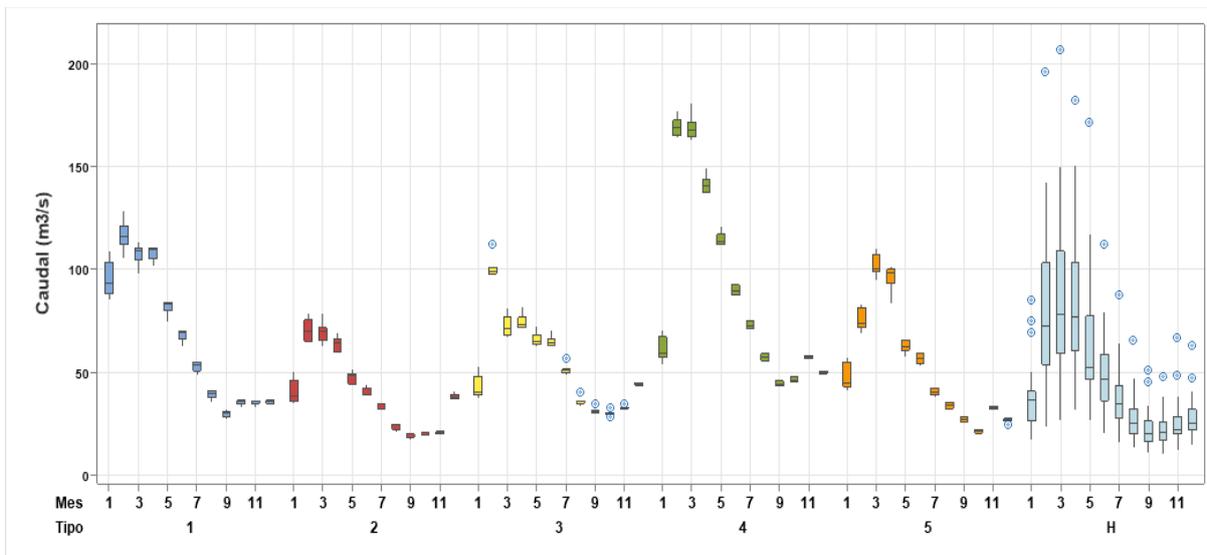


Figura 21. Distribución mensual de caudales por año típico en el escenario 1 (arriba) 2 (abajo) en Esmeraldas.



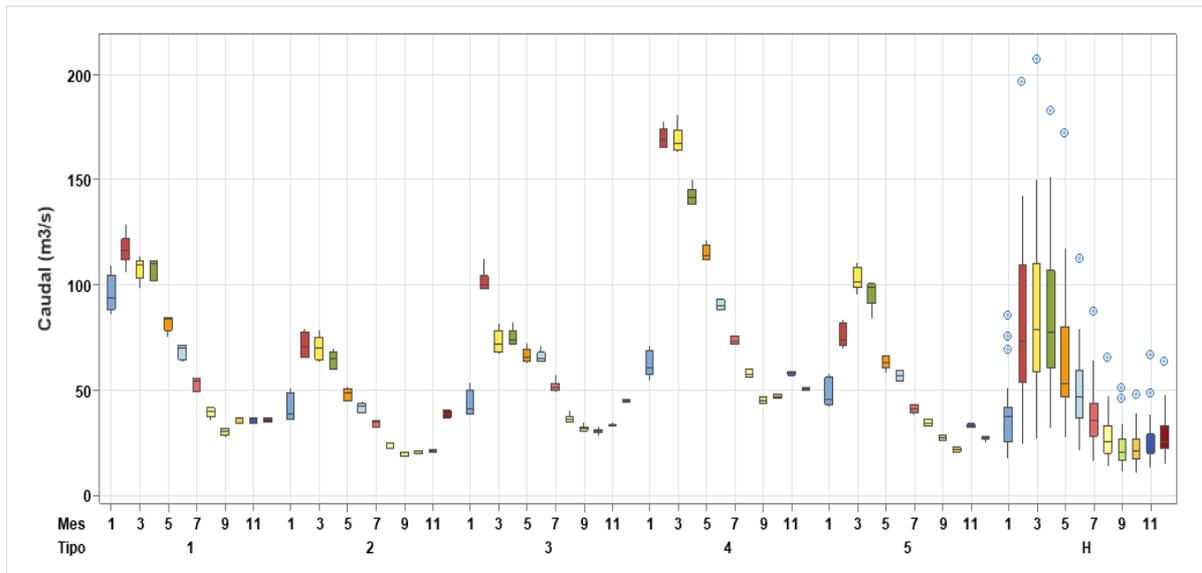


Figura 22. Distribución mensual de caudales por año típico en el escenario 1 (arriba) 2 (abajo) en Jubones.

### 3.3 Variaciones de la degradación específica

SWAT permite estimar la producción de sedimentos mediante la ecuación universal modificada de pérdida de suelo (MUSLE) (William, 1975). A continuación, se analizan las variaciones

de degradación específica mediante el estudio de los cambios en la producción de sedimentos, medidos como tn/ha/año, para cada una de las unidades hidrográficas, por año típico climático, para el promedio de los escenarios a futuro 1 y 2 respecto al período referencial (Figura 23, 24 y 25).

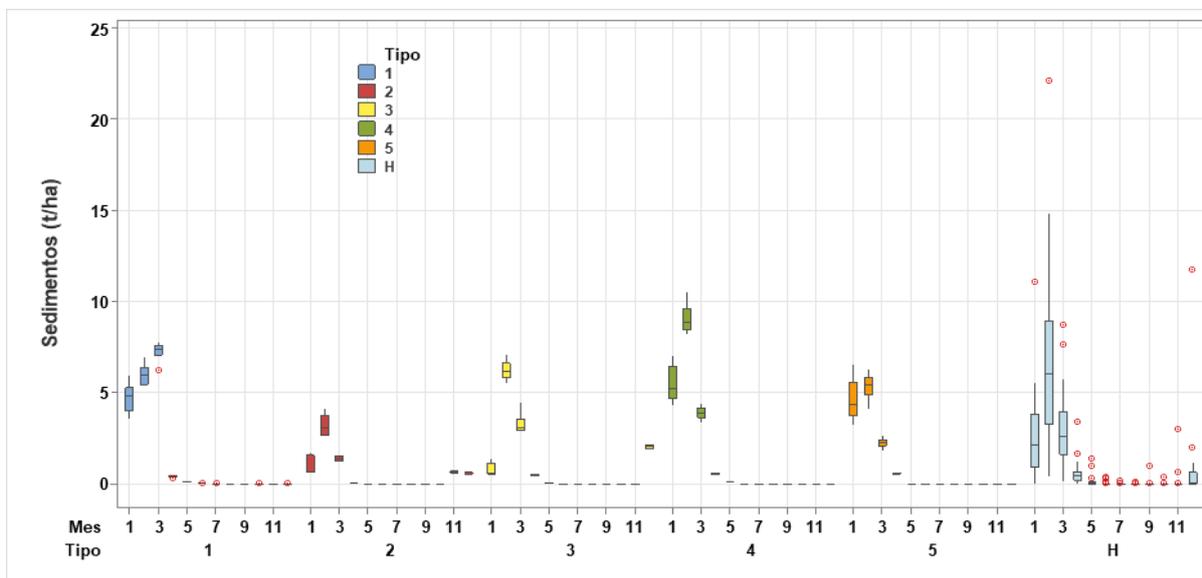


Figura 23. Distribución mensual de la producción de sedimentos (t/ha) por año típico en promedio para el escenario futuro 1 y 2 en la unidad hidrográfica Guayas

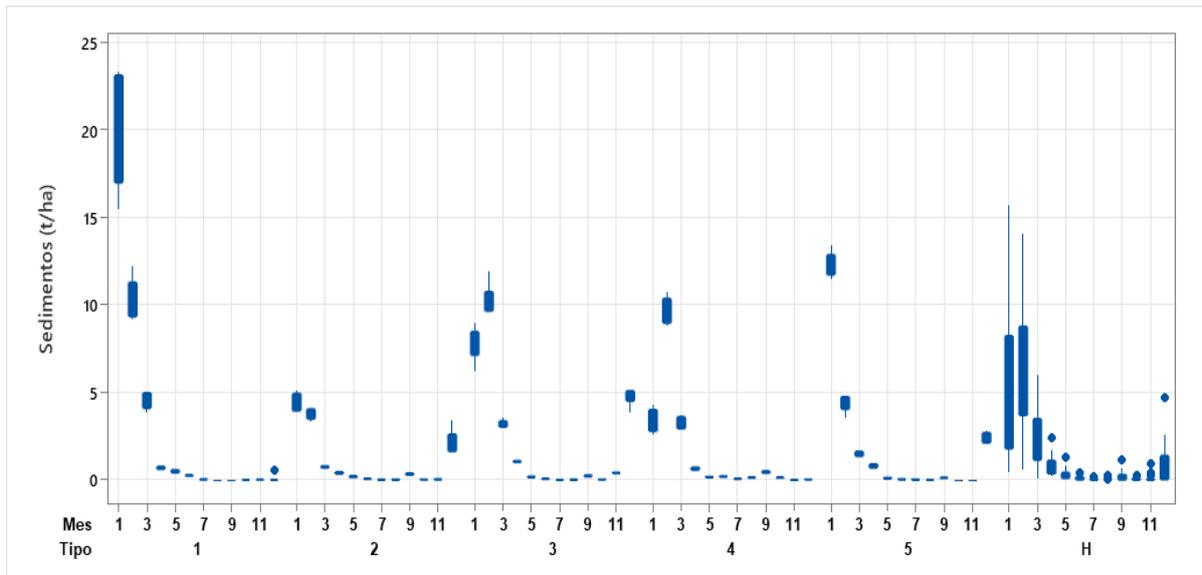


Figura 24. Distribución mensual de la producción de sedimentos (t/ha) por año típico en para el escenario futuro 1 y 2 en la unidad hidrográfica Esmeraldas

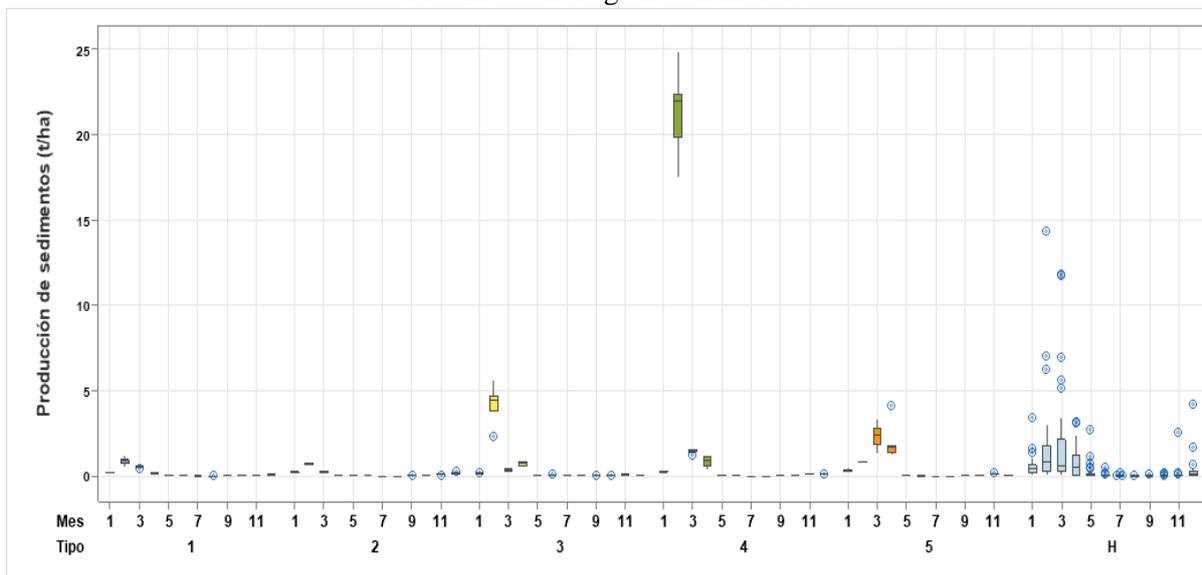


Figura 25. Distribución mensual de la producción de sedimentos (t/ha) por año típico en promedio para el escenario futuro 1 y 2 en la unidad hidrográfica Jubones.

### 3.4 Variaciones en erosión hídrica

La erosión hídrica del suelo consiste en la remoción, transporte y deposición de las partículas individuales de la masa de suelo por acción del agua, se diferencia de la degradación específica o producción de sedimentos (entendida como “la salida total de partículas de suelo de una cuenca hidrográfica, medida en una sección transversal de

referencia y por un periodo de tiempo”) por presentar valores mucho más altos, ya que no todas las partículas removidas alcanzan a llegar a la red de drenaje y salir de la cuenca como sedimentos. Se analizan a continuación las variaciones de erosiones hídricas medidas en tn/ha/año, climáticas, tanto para el escenario futuro 1 y 2 respecto al período referencial (Figura 26, 27 y 28).

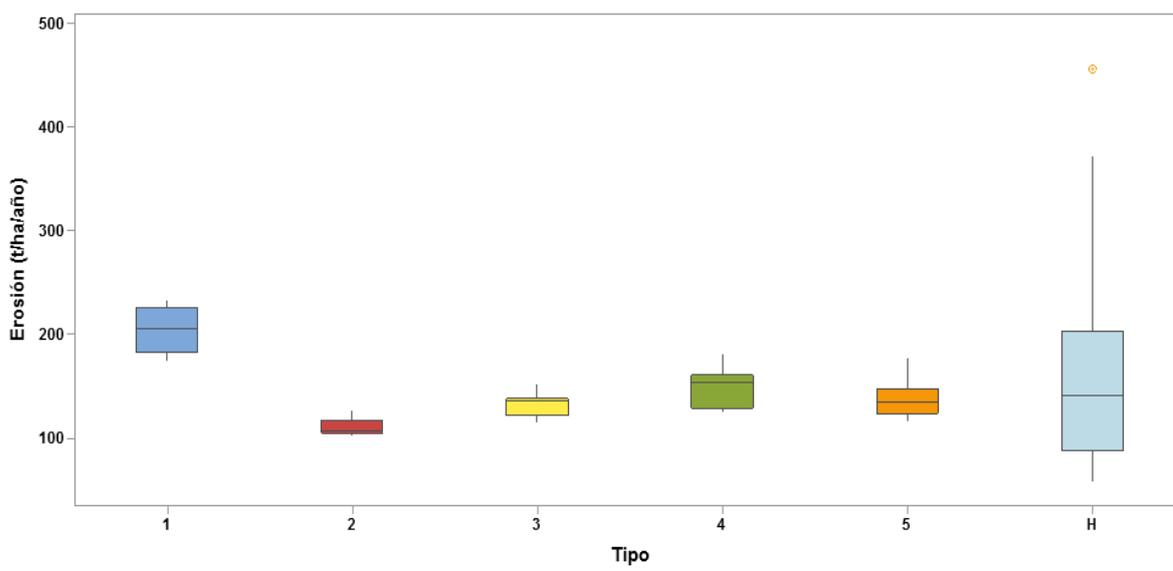


Figura 26. Valores de erosión del suelo por año típico para la unidad hidrográfica de Guayas

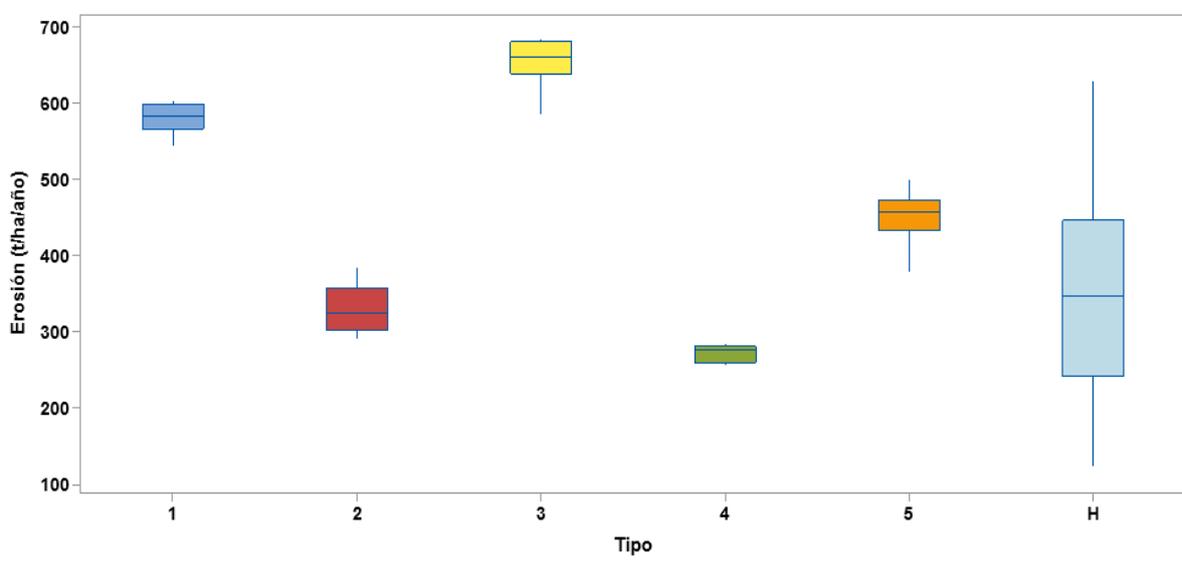


Figura 27. Valores de erosión del suelo por año típico para la unidad hidrográfica de Esmeraldas

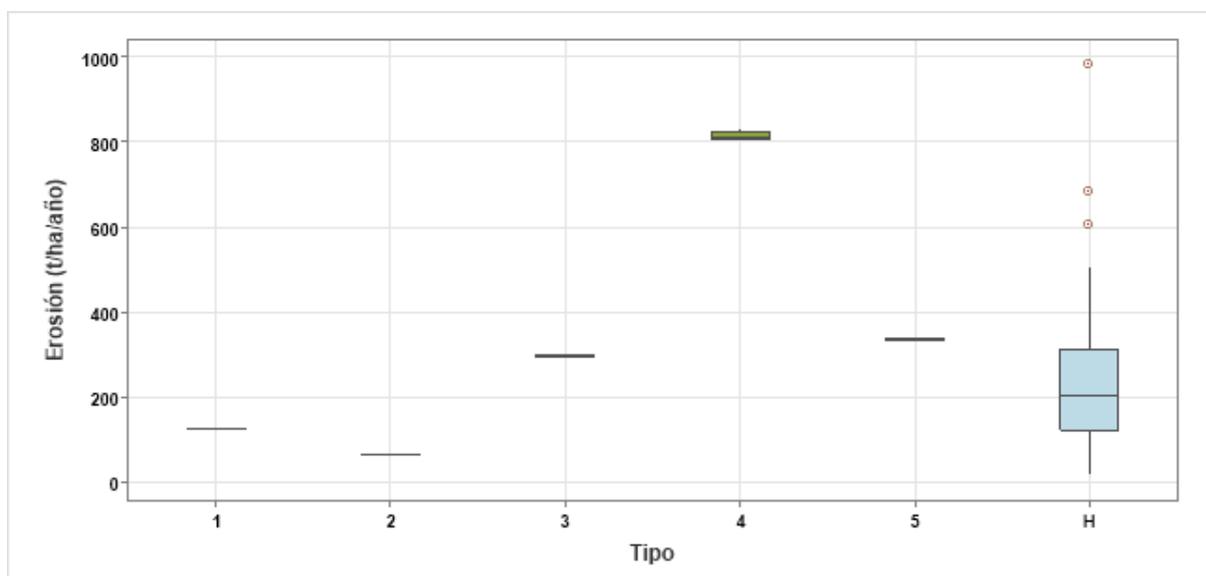


Figura 28. Valores de erosión del suelo por año típico para la unidad hidrográfica de Jubones

### 3.5 Grado de alteración hidrológica

El grado de alteración hidrológica (Zimmerman et al., 2018) se estima para cada UH como la relación entre el valor mediano del caudal diario calculado para el futuro (b) y el valor mediano para el período de referencia (a), teniendo en cuenta el valor b

diferente para cada uno de los escenarios futuros (Tabla 11, Tabla 12). La alteración hidrológica se clasifica como agotamiento severo si la relación  $b/a < 0.1$ , agotamiento alto si  $0.1 \leq b/a < 0.3$ , agotamiento moderado si  $0.3 \leq b/a < 1$ , inflación moderada si  $1 \leq b/a < 2$ , inflación alta si  $2 \leq b/a < 3$ , e inflación severa si  $b/a \geq 3$

Tabla 11. Resultados de alteración hidrológica para el escenario futuro 1

| Unidad hidrológica | Alteración hidrológica (b/a) |                            |                              |                              |                              |                              |
|--------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                    | (a)                          | AT1                        | AT2                          | AT3                          | AT4                          | AT5                          |
| Guayas             | 189.88                       | 1,21 (inflación moderada)  | 0,527 (agotamiento moderado) | 0,768 (agotamiento moderado) | 0,872 (agotamiento moderado) | 0,759 (agotamiento moderado) |
| Esmeraldas         | 661,37                       | 1,283 (inflación moderada) | 0,665 (agotamiento moderado) | 1,051 (inflación moderada)   | 1,247 (inflación moderada)   | 0,753 (agotamiento moderado) |
| Jubones            | 47,51                        | 1,414 (inflación moderada) | 0,861 (agotamiento moderado) | 1,140 (inflación moderada)   | 1,888 (inflación moderada)   | 1,094 (inflación moderada)   |

Tabla 12. Resultados de alteración hidrológica para el escenario futuro 2

| Unidad hidrológica | Alteración hidrológica (b/a) |                            |                              |                              |                             |                              |
|--------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
|                    | (a)                          | AT1                        | AT2                          | AT3                          | AT4                         | AT5                          |
| Guayas             | 189.88                       | 1,21 (inflación moderada)  | 0,526 (agotamiento moderado) | 0,767 (agotamiento moderado) | 0,81 (agotamiento moderado) | 0,758 (agotamiento moderado) |
| Esmeraldas         | 661,37                       | 1,253 (inflación moderada) | 0,635 (agotamiento moderado) | 1,017 (inflación moderada)   | 1,216 (inflación moderada)  | 0,725 (agotamiento moderado) |
| Jubones            | 47,51                        | 1,414 (inflación moderada) | 0,861 (agotamiento moderado) | 1,140 (inflación moderada)   | 1,888 (inflación moderada)  | 1,094 (inflación moderada)   |

### 3.6 Escasez de agua

A continuación, se analiza el número de meses con escasez de agua para cada uno de los escenarios a futuro y años típicos climáticos, teniendo en cuenta

que se considera mes con escasez de agua aquel cuyo caudal medio (considerando la demanda de agua) queda por debajo del caudal ecológico<sup>1</sup> (Figura 29, 30 y 31).

<sup>1</sup> Para cada unidad hidrográfica se toma la información del caudal ecológico y demanda de agua a futuro reportado en el Plan Hidrológico Nacional del Ecuador (SENAGUA &

CISPDR, 2015) en las secciones de las estaciones de aforo a la salida de cada una de ellas.

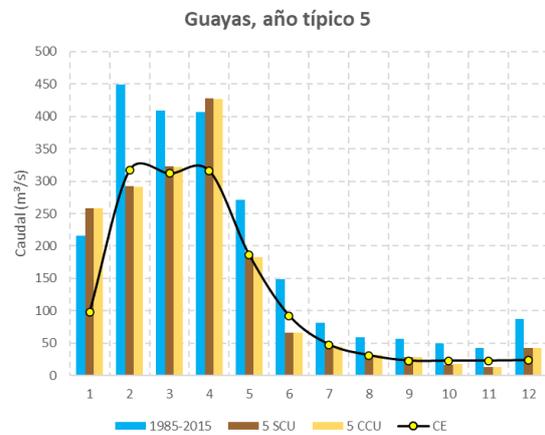
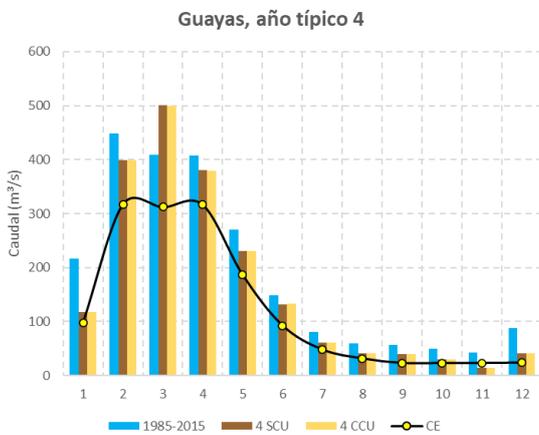
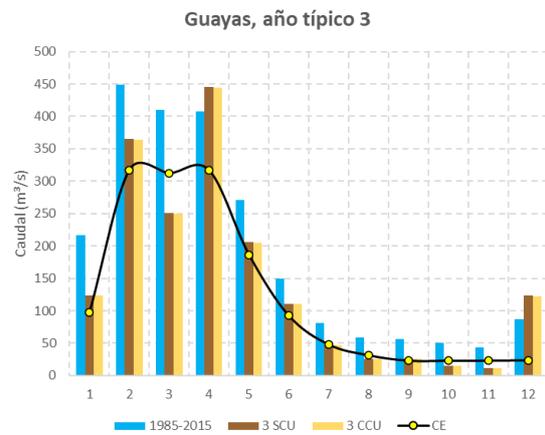
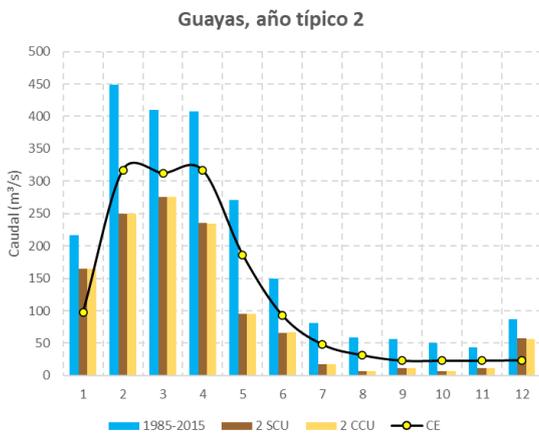
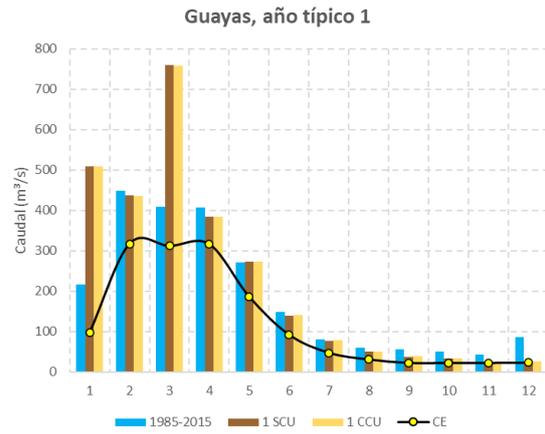
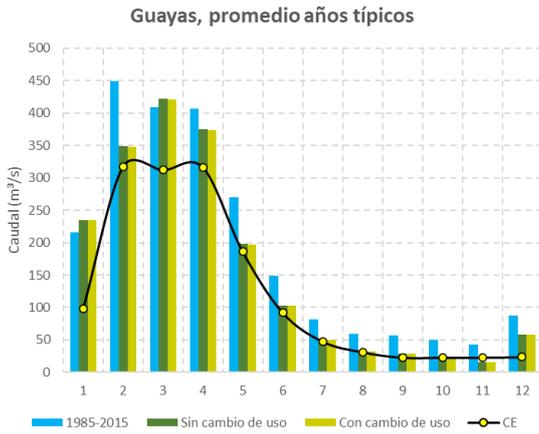


Figura 29. Gráfica indicativa de los meses con escasez de agua (caudal medio por debajo del caudal ecológico) para el escenario futuro 1 y 2, respecto al caudal mensual promedio 1985-2015 en la unidad de Guayas. SCU = sin cambio de uso, CCU = con cambio de uso, CE = caudal ecológico.

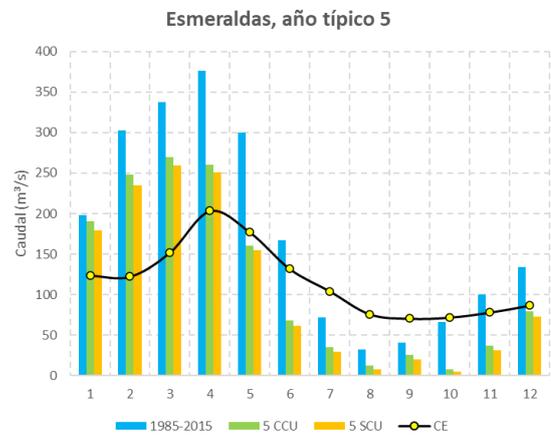
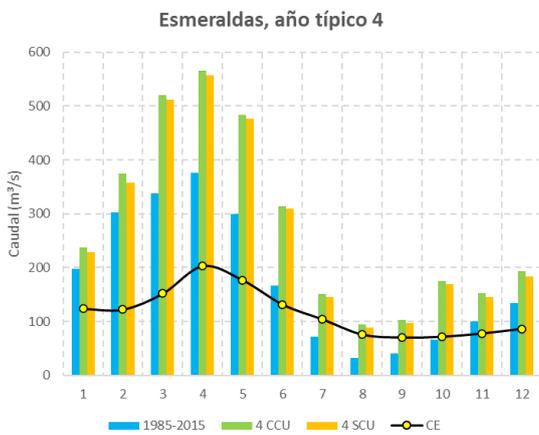
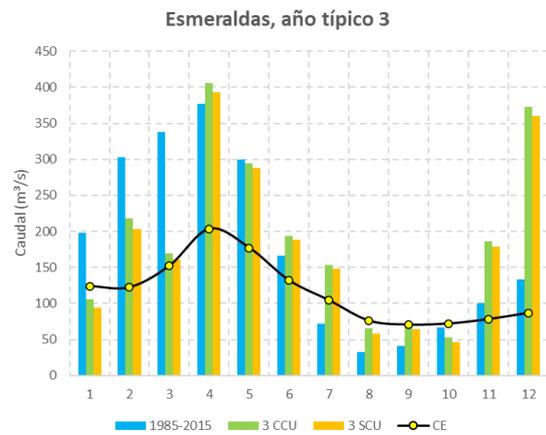
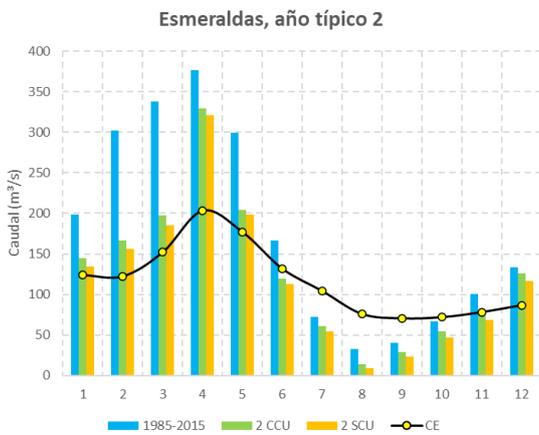
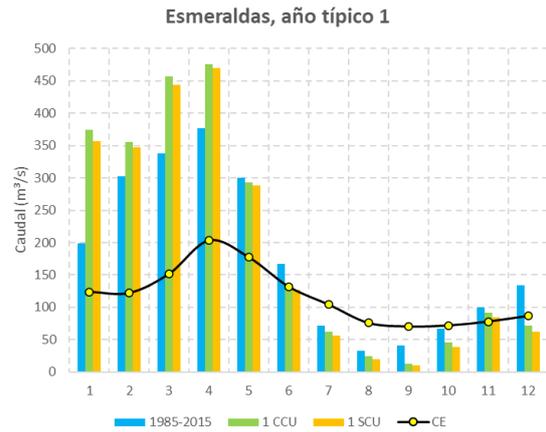
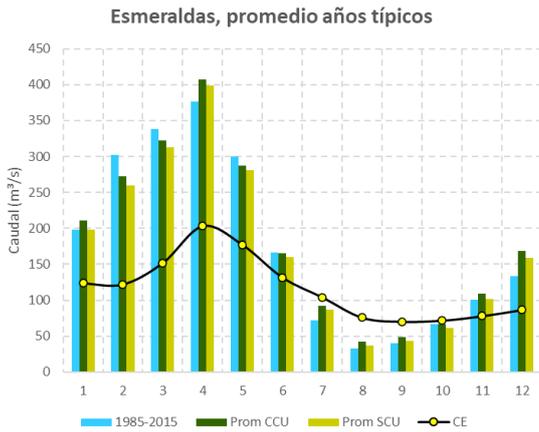


Figura 30. Gráfica indicativa de los meses con escasez de agua (caudal medio por debajo del caudal ecológico) para el escenario futuro 1 y 2, respecto al caudal mensual promedio 1985-2015 en la unidad de Esmeraldas. SCU = sin cambio de uso, CCU = con cambio de uso, CE = caudal ecológico.



Figura 31. Gráfica indicativa de los meses con escasez de agua (caudal medio por debajo del caudal ecológico<sup>2</sup>) para el escenario futuro 1 y 2, respecto al caudal mensual promedio 1985-2015 en la unidad de Jubones (H0529). SCU = sin cambio de uso, CCU = con cambio de uso.

### 3.7 Sequía meteorológica e hidrológica

Por último, se han calculado los índices meteorológicos de sequía SPEI (Índice de Evapotranspiración y Precipitación Estandarizado)

y SRI (Índice de Escorrentía Estandarizado) para cada uno de los años típicos climáticos para el acumulado de 1 mes. A continuación, se presentan los resultados comparativos respecto a la serie

<sup>2</sup><https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/download/1601/1226/5934>

temporal del SRI y del SPEI a lo largo del periodo histórico de 1985-2015 (Figura 32, 33 y 34).

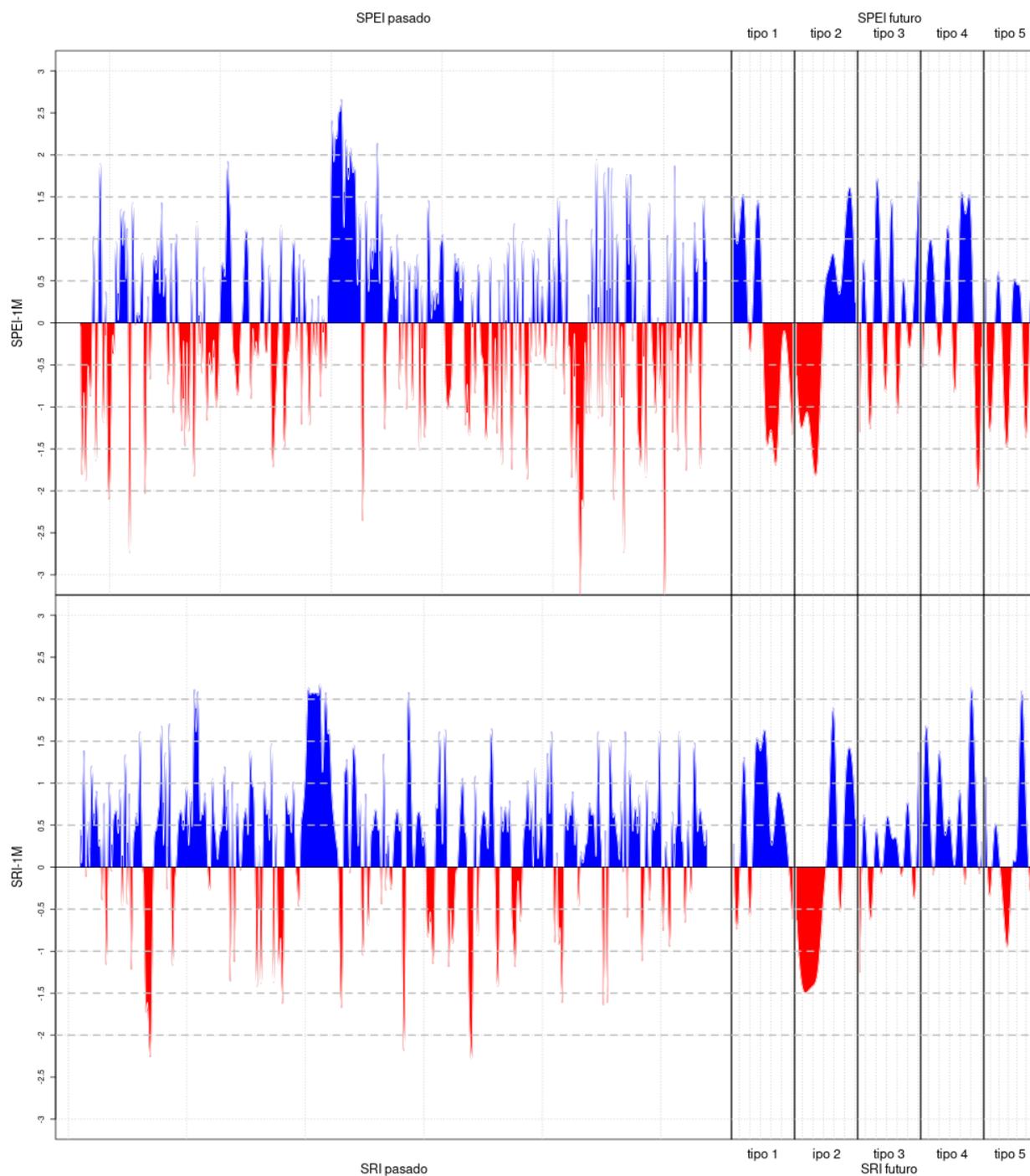


Figura 32. Comparativa entre la serie temporal del SRI y del SPEI a lo largo del periodo 1985-2015 frente a cada uno de los años tipo para el acumulado a 1 mes obtenidos para la unidad hidrográfica de Guayas. Los episodios en azul muestran épocas de exceso hídrico mientras que los episodios rojos se corresponden con periodos de déficit hídrico.

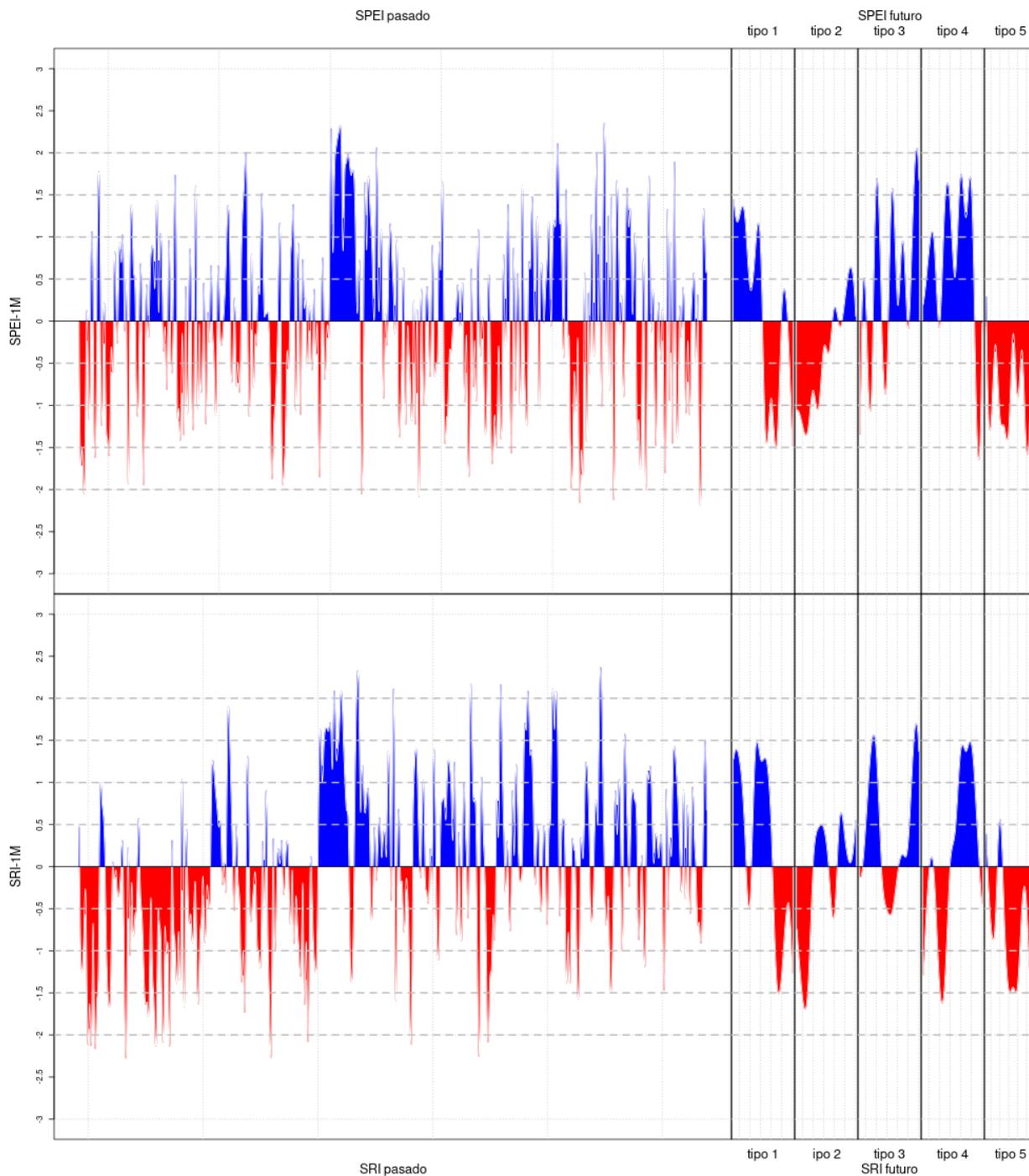


Figura 33. Comparativa entre la serie temporal del SRI y del SPEI a lo largo del periodo 1985-2015 frente a cada uno de los años tipo para el acumulado a 1 mes obtenidos para la unidad hidrográfica de Esmeraldas. Los episodios en azul muestran épocas de exceso hídrico mientras que los episodios rojos se corresponden con periodos de déficit hídrico.

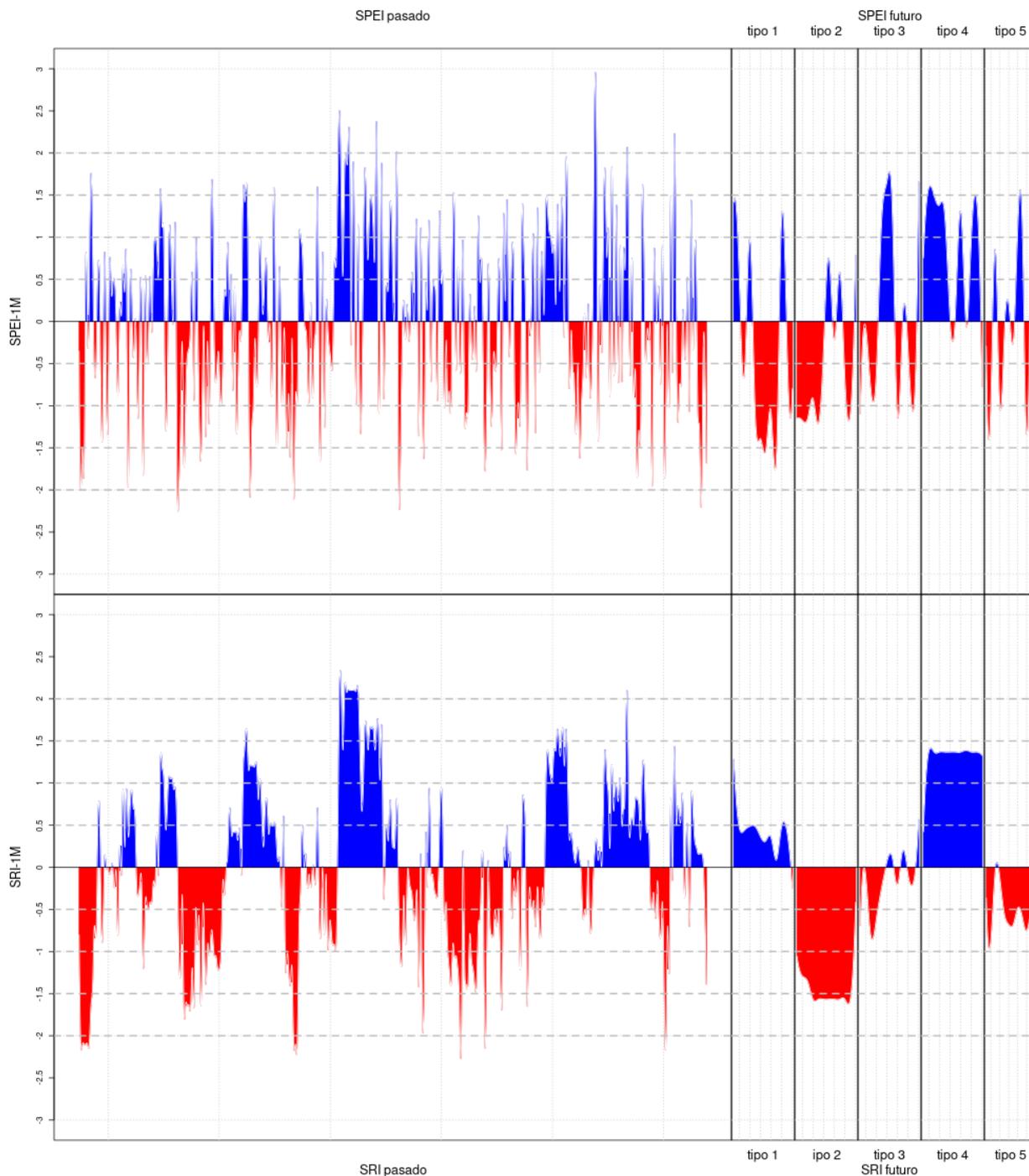


Figura 34. Comparativa entre la serie temporal del SRI y del SPEI a lo largo del periodo 1985-2015 frente a cada uno de los años tipo para el acumulado a 1 mes obtenidos para la unidad hidrográfica de Jubones. Los episodios en azul muestran épocas de exceso hídrico mientras que los episodios rojos se corresponden con periodos de déficit hídrico.

#### 4 Discusión y conclusiones

En todas las unidades hidrográficas se ha procedido con un proceso iterativo con pruebas de 400 o 1000 simulaciones cada una, refinando el rango de los 23 parámetros utilizados en cada prueba en base al método de calibración global, es decir permitiendo

el cambio de varios parámetros a la vez y sus posibles combinaciones. El grado de ajuste del modelo se ha medido a través de los estimadores PBIAS, R2, KGE y NSE. El grado de incertidumbre ha sido analizado a través de los estimadores P y R factor.

Las calibraciones finales en Guayas, Esmeraldas y Jubones muestran que el modelo tiene buen comportamiento en la simulación de los caudales a escala mensual, tal como lo muestran los valores de los estimadores de ajuste; R2 bueno, y NSE y PBIAS muy bueno. En el caso de Guayas y Jubones, la comparación de los hidrogramas observado y simulado y la gráfica de correlación muestran una ligera tendencia a subestimar los caudales, que de acuerdo con el valor del PBIAS es del orden del 7%. En el caso de Esmeraldas, la tendencia del modelo es a sobreestimar los caudales, del orden del 4%.

Las calibraciones finales en el caso de Pastaza muestran niveles de ajuste insatisfactorios, principalmente debido a inconsistencias generales entre las series de precipitación y de caudales observados, los que presentan una muy baja correlación. Especialmente, el comportamiento del modelo en Pastaza es insuficiente, debido a las siguientes circunstancias específicas:

- Los registros de caudal y precipitación, son escasos y dispersos, principalmente debido a la escasa red de estaciones de medida en las áreas de sierra y, en general, en el sector este.
- Los periodos comunes en datos observados en las diferentes estaciones son limitados.
- Es posible que la precipitación horizontal (condensación por nieblas) tenga una incidencia directa y clara en el desajuste observado entre caudal y precipitación. Su consideración no es posible dada la ausencia de datos observados.
- Esta unidad presenta la mayor superficie con cobertura de páramo, cuyo comportamiento hidrológico es incierto y complejo.

Para las unidades calibradas y validadas, en el marco de este estudio se han analizado, en primer lugar, los aspectos cuantitativos del agua que son afectados por un cambio en el clima (impactos comunes), como elemento vertebrador del estudio derivado de la aplicación específica del modelo hidrológico SWAT. Estos impactos climáticos se analizan también bajo un segundo escenario en el que se tienen en cuenta además los impactos derivados de los cambios proyectados en el uso del suelo a futuro. Se han considerado estimadores porcentuales de cambio basados en los mismos porcentajes de cambios históricos, lo que supone un método simplista, dado que considera que las complejas dinámicas territoriales no experimentarán cambios respecto al pasado,

incluyendo cambios en el crecimiento socioeconómico, de producción, o de políticas de conservación y uso de la tierra. Es recomendable, por lo tanto, avanzar en el análisis detallado de estas complejas tendencias a futuro, al objeto de reducir su incertidumbre en futuros estudios.

Para ambos escenarios futuros se analizan estimadores de variación en el régimen hídrico (caudal/escorrentía media) en términos anuales y mensuales; niveles de escasez hídrica, grado de alteración hidrológica, cambios en la degradación específica y en erosión hídrica, entre otros, cuyos resultados se detallan a continuación.

La variación de caudal anual resultante para el escenario futuro 1 en el caso de la unidad de Guayas indica una reducción del 47%, 23%, 12% y 24% para el año típico 2, 3, 4 y 5 respectivamente, y un aumento del 21% de caudal anual para el año típico 1 respecto al histórico, siendo cifras muy similares para el escenario futuro 2, aunque con tendencia general a aminorar el caudal medio. Dada su importancia económica y productiva de la unidad, Guayas podría presentar problemas para satisfacer la demanda de agua de las actividades productivas. A nivel mensual, los caudales más altos se presentan en los meses de febrero, marzo, abril, marzo y mayo para los años típicos 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente. Para el año típico 1 se espera la presencia de eventos extremos con caudales máximos estimados en 770,1 para el escenario 1 y en 768.2 m<sup>3</sup>/s para el escenario 2. El año típico 2 representa el caso crítico ya que los resultados de las simulaciones muestran la presencia de riesgos de presión hídrica, se estima que los caudales bajo estas condiciones de precipitación pueden reducirse hasta en un 47.13% para ambos escenarios, lo que pondría en riesgo las actividades productivas básicas de esta unidad hidrológica.

La variación resultante para el escenario futuro 1 en el caso de la unidad de Esmeraldas indica una reducción del caudal medio anual del 33% y 25% para el año típico 2 y 5, que pasan a reducirse hasta el 37% y el 27% para el escenario 2; y un aumento de caudal anual del 28% y del 25% para los años 1 y 4, para el escenario futuro 1 y del 25% y 22% para el escenario 2. El año típico 3 se mantiene casi constante respecto al histórico, mostrando un comportamiento estable en la variación anual de los caudales. A nivel mensual, los valores máximos de caudal se presentan en el mes de marzo, abril, abril,

mayo y abril, para los tipos 1, 2, 3, 4, y 5, respectivamente. Los eventos extremos se presentan con mayor frecuencia en los años típicos 1 con gastos estimados superiores a los 2.000 m<sup>3</sup>/s. Los años típicos 2 y 5 siguen una distribución mensual similar al comportamiento de la serie histórica, aun cuando sus caudales son inferiores al promedio histórico, en su momento pueden presentar problemas para satisfacer la demanda de la población y las actividades productivas.

La variación resultante para el escenario futuro 1 y 2 en el caso de la unidad de Jubones indica una reducción del caudal medio anual del 14% para el año típico 2; y un aumento de caudal anual del 41%, 14%, del 88% y del 9% para los años 1, 3, 4 y 5, con escasas variaciones para ambos escenarios futuros. Para los escenarios futuros, el modelo estima el aumento del caudal hasta 61,7 m<sup>3</sup>/s equivalente al 27,75% promedio para los dos escenarios. Los cambios de uso de suelo proyectados para los años futuros son mínimos en relación a los cambios de uso que se dieron en el pasado reciente, lo que hace que la respuesta hidrológica en los escenarios con cambio y sin cambio sean muy similares en su distribución mensual y caudales por año típico. Los años tipo 3 y 5 tienen un comportamiento similar al de la serie histórica con gastos un poco inferiores (14,0 y 9,3%, respectivamente); para el año típico 1 se estima un incremento de caudal del 41,3% con caudales promedio y máximos de 67,2 y 128,7 m<sup>3</sup>/s. En esta unidad, los años con riesgos de eventos extremos son los tipos 4 y 2, se estima que en los años típicos 4 se presenten caudales máximos de 180,9 m<sup>3</sup>/s y promedios de 88,7 m<sup>3</sup>/s, por su parte en los años tipo 2 se espera que el caudal se reduzca en un 13,8%.

En Guayas, para los dos escenarios a futuro y en términos promedio, se estima que la degradación específica se incremente ligeramente (2,5%) para ubicarse en valores promedio para toda la unidad de 1,2 t/ha/año; esta unidad hidrográfica es de especial importancia en las actividades agrícolas, de manera que son estas las más vulnerables a los procesos de pérdidas de suelo, algunas áreas llegan a superar las 80 t/ha/año, ubicándose en valores promedio de 62 t/ha/año para cultivos de maíz, específicamente en los años tipo 1 y 4. En la unidad Hidrológica Esmeraldas se estima que la producción de sedimentos se incrementará para ambos escenarios en proporciones muy similares y será del orden de 1,97 t/ha/año; aunque en los años tipo 1 pueden

alcanzar valores superiores a las 23 t/ha/año. La degradación específica en Jubones se estima en 18,08 t/ha/año para la serie histórica, con un decremento del 12,7% promedio para los escenarios futuros. El año con mayor producción de sedimentos es el año típico 4, con incrementos promedio de 206 % (37,3 t/ha/año).

Respecto a los resultados de erosión promedio, para Guayas la serie histórica arroja valores de 160 t/ha/año con máximos para esta serie estimados en 455 t/ha/año, para los escenarios futuros se estima que los valores promedio sean de 150,4 t/ha/año, sin embargo existen usos de suelo que son muy vulnerables a este proceso, específicamente los usos agrícolas que llegan a reportar valores superiores a las 500 t/ha/año. Los años 3, 4, y 5 presentan valores de erosión muy cercanos al promedio de la serie, sin embargo, en los años tipo 1 los valores promedio son superiores en 26,33% respecto al histórico. Para el caso de Esmeraldas, las tasas de erosión en el histórico son del orden de las 343 t/ha/año, en un futuro se estima que estos alcancen valores promedio de 466 t/ha/año para ambos escenarios; por año típico los mayores riesgos de erosión se presentan en el año tipo 3, con el que pueden alcanzarse tasas de 689 t/ha/año. Y, por último, en Jubones las tasas de erosión estimadas para la serie histórica son de 202 t/ha/año, que tiende a incrementarse en el futuro hasta alcanzar las 329 t/ha/año. Por años típicos esta variable está íntimamente relacionada con la precipitación, donde el año tipo 4 es el más crítico con valores superiores a las 800 t/ha.

Para Guayas y para el promedio de años típicos, se obtienen 3 meses con escasez de agua para el escenario futuro 1 y 2, siendo más acentuada en el periodo de estiaje (julio-noviembre), incluso la escorrentía sería insuficiente para satisfacer el caudal ecológico para los meses de agosto, octubre y noviembre. Se encontró que para el año típico 2 se podrían dar las condiciones de escasez de hasta 10 meses donde el caudal ecológico no quedaría cubierto; seguido de los años típicos 5 y 3, con 6 y 5 meses de escasez grave de agua, respectivamente. En Esmeraldas el histórico, arroja 4 meses con escasez grave de agua (julio-octubre), similar al reportado para el promedio de años típicos. El año típico 5 representa la situación más desfavorable, con 8 meses de escasez grave, seguido de los años típicos 1 y 2. En el año típico 3 el número de meses con escasez se mantiene respecto a la serie histórica.

Finalmente, como puede observarse, el año 4 sería el más caudaloso, el cual no presentaría meses con escasez hídrica grave. Para el caso de Jubones, el número de meses con escasez grave de agua es de 2 para la serie histórica, principalmente comprendidos entre octubre y noviembre. El año típico 2 representa la situación más desfavorable, con 4 meses de escasez grave, seguido del año típico 5.

Para el caso de Jubones, el número de meses con escasez grave de agua es de 2 para la serie histórica, principalmente comprendidos entre octubre y noviembre. El año típico 2 representa la situación más desfavorable, con 4 meses de escasez grave, seguido del año típico 5.

Respecto a los impactos por sequía, los resultados obtenidos para los indicadores SPEI y SRI para el periodo 2020-2050 van en concordancia con lo esperado en base a las proyecciones climáticas de temperatura y precipitación. No se espera que en promedio climático las cuencas hidrográficas tiendan hacia una sequía prolongada y extrema, pero si que se espera alternancia entre períodos húmedos y secos, especialmente para períodos acumulados de medio a largo plazo.

La evolución de los episodios de sequía 2020-2050 es muy similar al patrón observado en el periodo de referencia 1985-2015. Los valores obtenidos para el SRI (basado en escorrentía) siguen un patrón similar a aquellos obtenidos para el SPEI (basado en valores climáticos). Estos últimos indicadores pueden ser de utilidad para evaluar los episodios de sequía en aquellas regiones donde no se disponga de información para calcular el SRI u otros indicadores de características similares.

Al analizar los resultados obtenidos por año típico, vemos que hay disparidad entre ellos según sea un año más o menos seco/húmedo. En términos generales, el año típico 1 se caracteriza por una época inicial húmeda seguida de una seca. El año típico 2 presenta una distribución totalmente opuesta, una época inicial seca seguida de una más húmeda. El año típico 3, también se caracteriza por una época inicial seca aunque de menor duración que aquella esperada en el año típico 2, seguida de una época húmeda que se alterna con algún mes seco. El año típico 4 es prácticamente húmedo en su totalidad y finalmente, el año típico 5 es prácticamente seco en su totalidad, pudiendo presentar alternancia con momentos de exceso

hídrico. Nótese, que estos resultados son globales y que pueden variar en función de la escala temporal evaluada (mensual o trimestral) y la unidad hidrográfica para la que se simulan.

Finalmente, se incluyen a continuación las principales necesidades y brechas de información que se derivan de los resultados del presente estudio, con la finalidad de incluirlas como recomendaciones a abordar dentro del marco establecido en el Plan Nacional de Adaptación:

- Una limitación importante con incidencia directa, por ejemplo en los resultados de escasez hídrica, es la ausencia de información de la capacidad de los vasos de almacenamiento, obras de captación de agua, volúmenes de trasvases y de aprovechamientos mensualizados, según uso, en las áreas analizadas. Se hace muy recomendable implementar una red centralizada de monitoreo de dicha información a nivel nacional y de forma integral.
- La información asociada a las series históricas hidrometeorológicas es deficitaria para algunas de las unidades hidrológicas del Ecuador, presenta inhomogeneidades, datos atípicos o periodos sin información. En base a ello, se hace muy recomendable para futuros estudios hidrológicos en la escala nacional, ahondar esfuerzos en la mejora de la red de monitoreo del recurso hídrico y de la información meteorológica, cuyos datos puedan servir directamente a aminorar las incertidumbres asociadas a su uso, aprovechamiento, gestión y destino del recurso hídrico.
- Otra limitación importante respecto a las series de precipitación es la ausencia de información o estudios que aborden la incidencia de la precipitación horizontal en zonas andinas y preandinas, cuyos aportes pueden ser relevantes en análisis hidrológicos.
- En el Ecuador existe una alta variabilidad espacial de los suelos, producto de la geología, topografía, clima y cobertura vegetal, que

complican simular su comportamiento hidrológico y limitan la estimación del potencial productivo y los riesgos de degradación. Existe una deficiencia de información de los parámetros físicos de los suelos, en especial en los suelos de páramo cuyo comportamiento hidrológico es muy particular, lo que obliga a recurrir a fuentes de información global. Por lo tanto, se requieren abordar estudios edafológicos específicos para mejorar las bases de información nacional en dichos suelos.

- Invariablemente en los procesos de movimiento de agua en las Unidades hidrográficas, se encuentran ligados los procesos de erosión hídrica, degradación específica y movimiento de solutos, la capacidad predictiva de los modelos de simulación hidrológica puede mejorar sustancialmente en la medida que se integre información confiable de los aforos de sedimentos y monitoreo de las fuentes puntuales y no puntuales de la calidad del agua.
- La aplicación del modelo de simulación constituye una plataforma común de información que debe ser alimentada con la información que se genere tanto en el Ministerio y los Centros de Investigación como en las Universidades del país.

## 5 Agradecimientos

El presente trabajo se enmarca dentro del Plan de Adaptación Nacional del Ecuador, liderado por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) en su calidad de Autoridad Nacional Designada (NDA) al Fondo Verde para el Clima, e implementado con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) como Agencia Acreditada. Específicamente, se dirigen los agradecimientos al personal que ha intervenido: Jorge Núñez como coordinador del proyecto, Camelia Sofíe como especialista en adaptación encargada del seguimiento técnico; Rosana González, Jessica Calle y Pablo Caza como especialistas del MAATE a cargo del seguimiento técnico del estudio.

Además, los autores agradecen el apoyo técnico, los aportes y revisiones regulares por parte de los expertos locales independientes para el sector hídrico que han apoyado desde el MAATE: Pool Segarra, Wellington Bastidas y Jorge Andrés Espinosa Marín.

Finalmente, los autores agradecen la colaboración del Grupo de Actores Clave para el Sector Hídrico que han asistido a los talleres de retroalimentación de insumos en cada una de las fases del estudio.

## 6 Bibliografía

Abbaspour, K.C., Johnson, A., Van Genuchten, M.T., 2004, Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure: *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340-1352. [https://www.researchgate.net/publication/254714289\\_Estimating\\_Uncertain\\_Flow\\_and\\_Transport\\_Parameters\\_Using\\_A\\_Sequential\\_Uncertainty\\_Fitting\\_Procedure](https://www.researchgate.net/publication/254714289_Estimating_Uncertain_Flow_and_Transport_Parameters_Using_A_Sequential_Uncertainty_Fitting_Procedure)

Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., Srinivasan, R., 2007, Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT: *Journal of Hydrology*, 333(2), 413-430. [https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilung\\_siam/software/swat/thur.pdf](https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilung_siam/software/swat/thur.pdf)

Abbaspour, K.C., (2015). SWAT-Calibration and uncertainty programs (CUP)-User Manual: Duebendorf, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), 100 pp. [https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual\\_swatcup.pdf](https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf)

Alianza Clima y Desarrollo (CDKN). (2014). El Quinto Reporte de Evaluación del IPCC ¿Qué implica para América Latina?. <https://cdkn.org/sites/default/files/files/INFORME-del-IPCC-Que-implica-para-Latinoamerica-CDKN.pdf>

Arias, P.A., N. Bellouin, E. Coppola, R.G. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M.D. Palmer, G.-K. Plattner, J. Rogelj, M. Rojas, J. Sillmann, T. Storelvmo, P.W. Thorne, B. Trewin, K. Achuta Rao, B. Adhikary, R.P. Allan, K. Armour, G. Bala, R. Barimalala, S. Berger, J.G. Canadell, C. Cassou, A. Cherchi, W. Collins, W.D. Collins, S.L. Connors, S. Corti, F. Cruz, F.J. Dentener, C. Deroczynski, A. Di Luca, A. Diongue Niang, F.J.

Doblas-Reyes, A. Dosio, H. Douville, F. Engelbrecht, V. Eyring, E. Fischer, P. Forster, B. Fox-Kemper, J.S. Fuglestedt, J.C. Fyfe, N.P. Gillett, L. Goldfarb, I. Gorodetskaya, J.M. Gutierrez, R. Hamdi, E. Hawkins, H.T. Hewitt, P. Hope, A.S. Islam, C. Jones, D.S. Kaufman, R.E. Kopp, Y. Kosaka, J. Kossin, S. Krakovska, J.-Y. Lee, J. Li, T. Mauritsen, T.K. Maycock, M. Meinshausen, S.-K. Min, P.M.S. Monteiro, T. Ngo-Duc, F. Otto, I. Pinto, A. Pirani, K. Raghavan, R. Ranasinghe, A.C. Ruane, L. Ruiz, J.-B. Sallée, B.H. Samset, S. Sathyendranath, S.I. Seneviratne, A.A. Sörensson, S. Szopa, I. Takayabu, A.-M. Tréguier, B. van den Hurk, R. Vautard, K. von Schuckmann, S. Zaehle, X. Zhang, and K. Zickfeld, 2021: Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf)

Bobal, P., Sir, B., Richnavsky, J., Unucka, J., 2010, Analysis of the impact of land cover spatial structure change on the erosion processes in the catchment: *Acta Montanistica Slovaca*, 15(4), 269-276. <https://actamont.tuke.sk/pdf/2010/n4/2bobal.pdf>

Douville, H., K. Raghavan, J. Renwick, R.P. Allan, P.A. Arias, M. Barlow, R. Cerezo-Mota, A. Cherchi, T.Y. Gan, J. Gergis, D. Jiang, A. Khan, W. Pokam Mba, D. Rosenfeld, J. Tierney, and O. Zolina, 2021: Water Cycle Changes. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1055–1210, doi:10.1017/9781009157896.010.

[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter08.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter08.pdf)

De Carvalho Lopes, Daniela and Steidle Neto, Jose Antonio. (2011) Simulation models applied to crops with potential for biodiesel production. *Computers and Electronics in Agriculture* 75(1):1-9 DOI:10.1016/j.compag.2010.10.002 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169910001961>

D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, T. L. Veith, (2007) . Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)* 50(3) DOI:10.13031/2013.23153. <https://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeval.pdf>

El-Sadek, A., Irvem, A., (2014). Evaluating the impact of land use uncertainty on the simulated streamflow and sediment yield of the Seyhan River basin using the SWAT model: *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 38(4), 515-530. [https://www.researchgate.net/publication/262560407\\_Evaluating\\_the\\_impact\\_of\\_land\\_use\\_uncertainty\\_on\\_the\\_simulated\\_streamflow\\_and\\_sediment\\_yield\\_of\\_the\\_Seyhan\\_River\\_basin\\_using\\_the\\_SWAT\\_model](https://www.researchgate.net/publication/262560407_Evaluating_the_impact_of_land_use_uncertainty_on_the_simulated_streamflow_and_sediment_yield_of_the_Seyhan_River_basin_using_the_SWAT_model)

FAO, IIASA, ISRIC-World Soil Information, ISSCAS, & JRC. (2014). Harmonized World Soil Database. <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/hwsd/es/>

Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martínez, G.F., 2009, Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling: *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91. <https://experts.arizona.edu/en/publications/decomposition-of-the-mean-squared-error-and-nse-performance-crite>

IUSS-WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update2015. International soil classification system for naming soils and creating legend for soil maps. World Soil Resources Reports, N° 106. FAO. Rome. <https://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>

IPCC. (2022). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021:Impacts, Adaptation and*

Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) (2018). Diagnóstico para la integración del Patrimonio Hídrico en el componente de adaptación de la NDC de Ecuador. Consultor: Basantes-Serrano, R.

Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE). (2020). Generación de insumos técnicos clave para la realización de análisis de riesgo climático en el sector patrimonio hídrico. Consultor: Pool Segarra.

Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) y PNUD. (2021). “Consultoría para homogeneizar y rellenar información climatológica e hidrológica de estaciones priorizadas a nivel nacional, a través del desarrollo de un software que permita la automatización del proceso”, elaborada en el marco del PLANACC en conjunto con INAMHI. Consultor: Wellington Bastidas.

Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), (2021). Informe de generación de series de tiempo diarias para aplicaciones sectoriales incluyendo series para 5 años tipo en el período 2020-2050. Consultoría PLANACC para 'Generación de información de clima futuro a nivel nacional para el periodo 2020 – 2050 a partir de un análisis de circulación atmosférica y el empleo de modelos climáticos del CMIP6. Consultor: y CMC-INT CONSULTORES MODELACIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL S.A.

Ministerio del Ambiente. (2012). Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador (ENCC) 2012–2025. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/ESTRATEGIA-NACIONAL-DE-CAMBIO-CLIMATICO-DEL-ECUADOR.pdf>

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. Journal of Hydrology, 10, 282-290. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

Secretaría del Agua (SENAGUA) y Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research (CISPDR). (2015). Plan nacional de la gestión integrada e integral de los recursos hídricos de las cuencas y microcuencas hidrográficas de Ecuador. <http://suia.ambiente.gob.ec/files/MEMORIA%20PLA%20NACIONAL%20DEL%20AGUA.pdf>

J.K.H. Zimmerman, D.M. Carlisle, J.T. May, K.R. Klausmeyer, T.E. Grantham, L.R. Brown, J.K. (2018) Howard Patterns and magnitude of flow alteration in California, USA Freshw. Biol., 63 , pp. 859-873, 10.1111/fwb.13058 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/fwb.13058>

Williams, J.R. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. Water Resour. Bull., 11(5): 965-974. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1752-1688.1975.tb01817.x>

World Bank Group: Climate Risk Profile: Ecuador (2021). Disponible en: [https://climateknowledgeportal.worldbank.org/site/default/files/country-profiles/15988-WB\\_Ecuador%20Country%20Profile-WEB.pdf](https://climateknowledgeportal.worldbank.org/site/default/files/country-profiles/15988-WB_Ecuador%20Country%20Profile-WEB.pdf)