



ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

***“MODELO HIDROLOGICO DE LA CUENCA DEL RÌO GUAYAS BAJO
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÀTICO RCP 4.5 Y 8.5 UTILIZANDO EL
MODELO HIDROLÓGICO SWAT.”***

PROYECTO DE TITULACIÓN

**Previo a la obtención del Título de
MÁSTER “CAMBIO CLIMÁTICO”**

Presentada por:
Santiago David Llerena Cabezas

Dirigido por:
Gladys Ricón Polo Ph.D

**Guayaquil – Ecuador
2025**

COMITÉ EVALUADOR

Gladys Rincón Polo Ph. D.

TUTOR

Iván Saltos Andrade Mtr.

VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponden confirma al reglamento de propiedad intelectual de la institución; **SANTIAGO DAVID LLERENA CABEZAS CI. 0201937471**, doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Santiago David Llerena Cabezas

CI. 0201937471

ÍNDICE GENERAL

1	CAPÍTULO I	1
1.1	Introducción	1
1.2	Planteamiento del problema	4
1.3	Planteamiento del problema	9
1.4	Justificación.....	9
1.5	Objetivos	11
1.5.1	Objetivo general	11
1.5.2	Objetivos específicos.....	12
2	CAPÍTULO II.....	13
2.1	Marco teórico	13
2.1.1	Antecedentes.....	13
2.1.2	Contexto global	18
2.1.3	Cambio climático en Ecuador	19
2.1.4	Escenarios climáticos	20
	Modelos climáticos globales	20
2.1.5	Escenarios RCP	22
2.1.6	Ciclo hidrológico	23
2.1.7	Ciclo hidrológico	25
2.1.8	Modelo hidrológico	26

2.2	Modelo SWAT	27
2.2.1	Esorrentía superficial	27
2.2.2	Infiltración	33
2.2.3	Esorrentía subterránea.....	34
2.2.4	Evapotranspiración	35
2.2.5	Erosión.....	35
2.2.6	Calibración y Validación	36
2.3	Sistemas de información geográfica	38
2.3.1	Sistemas de Información Geográfica y modelos hidrológicos	39
3	Metodología.....	41
3.1	Región de estudio	41
3.1.1	Cuenca del Río Guayas.....	41
3.1.2	Subcuenca del Río Vines	43
3.2	Desarrollo del modelo hidrológico SWAT	44
3.2.1	Datos de entrada	45
3.2.2	Datos de salida.....	48
3.3	Calibración del modelo hidrológico SWAT.....	49
3.4	Validación del modelo hidrológico SWAT.....	51
3.5	Aplicación de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5.	51
	3.5.1 aplicación de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 en el modelo hidrológico	52

3.6	Medidas para el plan modelo para la gestión integrada de la cuenca.....	54
4	Resultados.....	57
4.1	Resultados del modelo hidrológico SWAT.....	57
4.2	Resultados de la calibración.....	59
4.3	Resultados validación.....	61
4.4	Resultados de los escenarios	64
4.4.1	Escenario RCP 4.5.....	65
4.4.2	Escenario RCP 8.5.....	77
4.4.3	Escenarios comparativos RCP 4.5 y RCP 8.5	89
4.5	Plan Modelo para la Gestión integrada de la cuenca del Río Guayas	93
5	Conclusiones.....	128
5.1	Conclusiones	128
5.2	Recomendaciones.....	129
6	Bibliografía.....	131
	ANEXOS.....	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Rutas de Concentración Representativas	22
Tabla 2 Input data biofísica y climática para el modelo SWAT	47
Tabla 3 Parámetros de calibración para el modelo SWAT	49
Tabla 4 Input data biofísica y climática para el modelo SWAT	57
Tabla 5 Parámetros de validación para el modelo SWAT	61
Tabla 6 Cuadro de actores institucionales.....	94
Tabla 7 Criterios de ponderación para los actores institucionales	98
Tabla 8 Resultados de ponderación para los actores institucionales.....	98
Tabla 9 Actores institucionales Nivel 1 – Plan modelo	103
Tabla 10 Actores institucionales Nivel 2 – Plan modelo	105
Tabla 11 Actores institucionales Nivel 3 – Plan modelo	106
Tabla 12 Actores institucionales Nivel 4 – Plan modelo	107
Tabla 13 Actores institucionales Nivel 5 – Plan modelo	108
Tabla 14 Medida No. 1 – Reducción de inundaciones y sequias.....	110
Tabla 15 Medida No. 2 – Calidad de agua y reúso	111
Tabla 16 Medida No. 3: Gestión de sedimentos e intrusión salina.....	113
Tabla 17 Medida 4: Control de erosión	114
Tabla 18 Medida 5: Riego eficiente y retención	116

Tabla 19 Medida 6: Gestión de crecidas y sequías con EWS por impacto.....	118
Tabla 20 Medida 7: Conservación y restauración.....	120
Tabla 21 Medida 8: Caudales ecológicos (Qecol) y acuerdos de uso.....	121
Tabla 22 Medida 9: Gobernanza financiera (fondos de agua)	123
Tabla 23 Medida 10 : Integración cuenca estuario (operación coordinada de presas, compuertas, drenajes).....	125
Tabla 24 Medida 11: Red de datos y EWS integrado (datos abiertos)	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Anomalías registradas de la temperatura oceánica y terrestre; B) Aumento del nivel del mar desde 1850 C).....	19
Figura 2 A) Cambios observados de la temperatura superficial entre 1901 y 2012; B) Cambios observados de la precipitación entre 1951 – 2010.	20
Figura 3Proceso secuencial para generar escenarios de CC	21
Figura 4 Balance hídrico simulado por SWAT	23
Figura 5 Componentes de los sistemas de información geográfica	38
Figura 6 Flujograma de la metodología empleada	56
Figura 7 Gráfico del periodo de calibración.....	60
Figura 8 Gráfico del periodo de validación.....	63
Figura 9 Distribución mensual de caudales – RCP 4.5 (2013 – 2030)	65
Figura 10 Precipitación vs escurrimiento – RCP 4.5 (2013 – 2030)	67
Figura 11 Distribución mensual de caudales – RCP 4.5 (2031 – 2050)	69
Figura 12 Precipitación vs escurrimiento – RCP 4.5 (2031 – 2050)	71
Figura 13 Distribución mensual de caudales – RCP 4.5 (2051 – 2070)	73
Figura 14 Precipitación vs escurrimiento – RCP 4.5 (2051 – 2070)	75
Figura 15 Distribución mensual de caudales – RCP 8.5 (2013 – 2030)	77
Figura 16 Precipitación vs escurrimiento – RCP 8.5 (2013 – 2030)	79

Figura 17 Distribución mensual de caudales – RCP 8.5 (2031 – 2050)	81
Figura 18 Precipitación vs escurrimiento – RCP 8.5 (2031 – 2050)	83
Figura 19 Distribución mensual de caudales – RCP 8.5 (2051 – 2070)	85
Figura 20 Precipitación vs escurrimiento – RCP 8.5 (2051 – 2070)	87
Figura 21 Hidrograma diario por periodo	89
Figura 22 Caja de bigotes escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5	91
Figura 23 Mapa de actores	100
Figura 24 Niveles de gestión.....	102

ÍNDICE DE MAPAS

MAPA 1 Subcuencas modelo hidrológico SWAT.....	144
MAPA 2 Uso de suelo y cobertura vegetal	145
MAPA 3 Tipo de suelo.....	147
MAPA 4 Clasificación de pendientes	148

ABREVIATURAS

CADS	Centro de Aguas y Desarrollo Sustentable - ESPOL
CC	Cambio Climático
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CIIFEN	Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño
CGEI	Gases de Efecto Invernadero
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
ESPOL	Escuela Politécnica del Litoral
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GIRH	Gestión Integral de los Recursos Hídricos
IPCC	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
MAATE	Ministerio de Agua, Ambiente y Transición Ecológica
ONUAGUA	Organización de las Naciones Unidas para el Agua
RH	Recursos hídricos
RCP	Rutas de Concentración Representativas

SENAGUA	Secretaría nacional del Agua
SNGR	Sistema Nacional de Gestión de Riesgos
SWAT	Herramienta para la evaluación de agua y suelo

AGRADECIMIENTO

A la coordinación de la maestría de Cambio Climático, a Gladys Rincón PhD y a los maestros que imparten sus conocimientos, al Centro de Agua y Desarrollo Sustentable a cargo de Luis Domínguez PhD, al grupo de investigación de Ecología Acuática de la Universidad de Gante a cargo de Peter Goethals PhD, con quienes a través del programa WATER+ fui beneficiario en la formación en el uso de SWAT para culminar la investigación.

Santiago David Llerena Cabezas

DEDICATORIA

En memoria de mis abuelitos, a mis padres, hermanas, familiares y demás personas que contribuyeron en mi proceso de formación, en especial a mi esposa y mi hijo quienes han sido mi compañía y motivación.

Santiago David Llerena Cabezas

RESUMEN

La cuenca del río Guayas con una extensión de 34.500 km² es una de las más importantes del Ecuador y de la costa del océano pacífico, en ella se encuentra cerca del 40% de la población nacional, es la zona de mayor producción de bienes agropecuarios del país y se estimada que en época seca alcanza a niveles promedio de 230 m³/s y en época lluviosa supera los 1500 m³/s.

El desarrolló el modelo hidrológico para la cuenca del Río Guayas se llevó a cabo con SWAT, a través de ArcMap versión 10.5, el cual fue debidamente calibrado y validado bajo la interfaz de SwatCup con el algoritmo de SUFI 2, obteniendo como resultado una validación con un **R²= 0.63**, **NSE=0.601** y un **Pbias= -15.4%**, a pesar que este último valor indica que el modelo sobrestima la producción de caudales simulados versus los observados, se encuentran dentro del rango de aceptable, por lo que las simulaciones que arroje el modelo son útiles para fines académicos.

La incorporación de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 para la subcuenca del río Vines, resultó que producción de caudales mantienen una estacionalidad marcada que coincide con la época lluviosa, sin embargo, una tendencia creciente para cada escenario, además de presenciar valores extremos con más intensidad en los meses de febrero y abril.

Palabras claves: Antropogénico, Caudal, Cambio climático, Ciclo hidrológico
Clima futuro, Escenarios RCP, Gases de efecto invernadero, Modelo hidrológico.

ABSTRACT

The Guayas River basin, with an area of 34,500 km², is one of the most important in Ecuador and on the Pacific coast. It is home to nearly 40% of the national population. It is the area with the highest production of agricultural goods in the country. It is estimated that during the dry season it reaches average levels of 230 m³/s and during the rainy season it exceeds 1,500 m³/s.

The development of the hydrological model for the Guayas River basin was carried out with SWAT, through ArcMap version 10.5, which was duly calibrated and validated under the SwatCup interface with the SUFI 2 algorithm, obtaining as a result a validation with an $R^2 = 0.63$, $NSE = 0.601$ and a $Pbias = -15.4\%$, although this last value indicates that the model overestimates the production of simulated flows versus those observed, they are within the acceptable range, so the simulations that the model produces are useful for academic purposes.

The incorporation of the RCP 4.5 and RCP 8.5 climate change scenarios for the Vinges River sub-basin resulted in flow production maintaining a marked seasonality that coincides with the rainy season, however, with an upward trend for each scenario, in addition to witnessing extreme values with greater intensity in the months of February and April.

Keywords: Anthropogenic, Flow, Climate change, Hydrological cycle, Future climate, RCP scenarios, Greenhouse gases, Hydrological model.

1 CAPÍTULO I

1.1 Introducción

En el mundo actual, los caudales como parte de los recursos hídricos se encuentran bajo una presión constante debido al continuo crecimiento de las demandas hídricas provenientes del sector doméstico, agrícola, industrial, energético, ambiental entre otros (Domínguez Calle et al., 2023). Este incremento de la necesidad hídrica muchas veces ha ido por encima del recurso disponible, como consecuencia de esto se ha alterado el régimen natural de los caudales, comprometiendo la estabilidad de los ecosistemas fluviales y la sostenibilidad de este (Chávez-Jiménez & González-Zeas, 2015).

El agua como recurso natural está estrechamente relacionado con el clima, parte de las variables climáticas como la precipitación y la temperatura son precursores básicos de la producción de caudales, sin embargo, en los últimos años la alteración que ha sufrido el sistema climático debido al aumento promedio de la temperatura global como una consecuencia de las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI, siglas en español) en la atmósfera (Livingston & Rummukainen, 2020), han modificado los patrones de precipitación y temperatura, esto ha tenido una incidencia directa sobre la disponibilidad en cantidad y calidad del agua (USGS., 2020).

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, siglas en inglés) con un alto nivel de confianza manifiesta que desde la época industrial la emisión de GEI atribuidos al forzamiento antropogénico por la combustión fósil y

procesos industriales como impulsores principales, han tenido un aumento sin precedentes, registrando 27Gt de CO₂ eq para el 1970 a 52 Gt de CO₂ eq para el 2010, esto ha hecho que los últimos 30 años se considere como la época con la temperatura superficial más cálida de los últimos 800 años y, la época en donde ha habido mayor presencia de eventos extremos relacionados con el clima (IPCC, 2014a).

El clima futuro y sus impactos presenta un grado de incertidumbre, razón por la cual el IPCC con un alto nivel de confianza presenta escenarios de cambio climático denominadas Rutas de Concentración Representativas (RCP, siglas en inglés) como una forma de presentar cuatro posibles climas futuros basados en la forzante radiativa a causa de la emisión de GEI; el escenario RCP 8.5 (3.2 – 5.4 °C) considerado el de mayor emisión, el RCP 6.0 (2.0 – 3.7 °C) y 4.5 (1.7 – 3.2 °C) escenarios de mediana reducción de GEI y RCP 2.6 (0.9 – 2.3°C) considerado el más bajo en emisiones de GEI (IPCC, 2014a).

A través de los escenarios RCP se prevé un aumento de la temperatura para el pacífico ecuatorial, afectando con la escasez de agua e inundaciones, siendo las zonas rurales las impactadas de manera desproporcional debido a las condiciones socioeconómicas (Armenta Porras & Villa Cedeño, 2016).

En los últimos años, numerosos estudios analizan el comportamiento hidrológico bajo determinadas condiciones (escenarios RCP), estas investigaciones a nivel de cuencas hidrográficas permiten identificar, el vínculo de la estacionalidad y las tendencias de los caudales superficiales con los cambios de los patrones de precipitación y temperatura

(Bates, 2008), se estima que por cada grado de aumento de la temperatura se disminuye $\pm$ 20% de la disponibilidad del recurso hídrico (ONU-AGUA., 2019).

El agua en la cuenca del río Guayas es esencial para el desarrollo social y económico, el acceso del agua se relaciona con la calidad de vida y el desarrollo humano, en sectores como el agrícola es vital para el riego, millones de personas dependen únicamente de esta actividad, más aun siendo la base que potencia el turismo en la región y el 65% de la electricidad producida por hidroeléctricas, sin dejar a un lado la importancia para la diversidad biológica y los ecosistemas (Campo Carrera et al., 2023).

Las tendencias de la temperatura para el Ecuador según (Armenta Porras & Villa Cedeño, 2016) han venido aumentándose en los últimos años en el territorio nacional, la temperatura mínima para el sector de la costa aumentó entre 0.2 y 0.1 °C/década, presentando incrementos en las precipitaciones extremas para el litoral, como resumen se observa que las temperaturas han incrementado en los valores medios, máximos y mínimos, hay menos días y noches frías y más días y noches calientes en el año.

El recurso hídrico es el eje central de desarrollo en la sociedad actual, en especial en regiones con una importante dedicación al aprovechamiento del agua para el consumo humano, producción agrícola y la generación de energía como sucede en la cuenca del río Guayas, donde los caudales de la cuenca, son reconocidos como un recurso estratégico y los más abundantes del Ecuador (8.847 m³/hb/año), pero el crecimiento desordenado y desmedido de las ciudades, la extensión e intensidad de las actividades agropecuarias, la

generación de energía, ejercen una demanda constante sobre los caudales para poder satisfacer las demandas hídricas, sin tomar en cuenta la estacionalidad de los volúmenes de agua en época seca y de lluvia, ejerciendo una presión en ocasiones superior a la disponible (García, 2012).

A pesar de los esfuerzos por gestionar de manera integral e integrada la cuenca del Río Guayas, no se ha logrado concretar esfuerzos en conjunto, quedado solo en papeles las intenciones plasmadas, obligando a cada territorio dentro de su jurisdicción, encaminar mínimos esfuerzos en gestionar este importante recurso.

A través del desarrollo del modelo hidrológico de la cuenca del río Guayas, como un aporte desde la academia a los tomadores de decisiones, con la finalidad de demostrar el resultado del modo de desarrollo basado en emisiones sobre los recursos naturales, en especial el agua como un recurso vital, de esta forma dilucidar el panorama y las acciones que pueden integrarse a fin de, adaptarnos a la incertidumbre que lleva consigo los impactos del cambio climático en el recurso hídrico, tomando en consideración la importancia que representan la cuenca del Río Guayas, ya que en ella se encuentra casi el 40% de toda la población del territorio nacional.

1.2 Planteamiento del problema

El *Panel Intergubernamental de Cambio Climático* (IPCC por sus siglas en inglés) menciona que el calentamiento del sistema climático es inequívoco y su evidencia es el

aumentos del promedio de la temperatura global, como consecuencia el deshielo de los cuerpos sólidos de agua y en el aumento del nivel del mar (IPCC, 2014b), además se sostiene que las alteraciones climáticas registradas no son atribuidas exclusivamente a la variabilidad natural del clima, sino a la acción antrópica (Allen et al., 2000).

En la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, siglas en español), se establecieron compromisos por reducir las emisiones de GEI, sin embargo, a pesar de los esfuerzos por reducir las emisiones, la larga permanencia de los GEI en la atmósfera y las formas de desarrollo basadas en las emisiones seguirá afectando de manera negativa el sistema climático, incidiendo a su vez sobre la estacionalidad en los caudales superficiales (United Nations, 2018).

El clima y el agua están estrechamente relacionados, como consecuencia del cambio climático se espera que el aumento de la temperatura tenga cambios significativos en el balance hídrico y por consiguiente la disponibilidad del recurso hídrico (Gómez, 2012), adicional que la humedad del suelo y escorrentía superficial, principales elementos del balance hídrico se ven fuertemente afectados por el cambio climático, como consecuencia, la calidad y la cantidad de la escorrentía superficial cuenca abajo escasea (Cabezas, 2015).

El cambio climático se define como una alteración que se evidencia a largo plazo en las condiciones meteorológicas medias de todo el mundo, alteraciones en la escala temporal (años, meses, días, etc.) y la escala espacial (local y/o regional), condiciones

amenazantes que sumando a esto los niveles de vulnerabilidad, exacerbaban los riesgos climáticos, la calidad y cantidad de agua dulce se encuentra amenazada por los eventos climáticos extremos (Bedoya et al., 2010).

En la región, en los últimos decenios los eventos relacionados con el clima como sequías, deslizamientos, precipitaciones y temperaturas intensas, inundaciones, huaicos, vendavales, han tenido un incremento y se han presentado con distintas intensidades, incluso en lugares donde jamás hubo un registro, eventos extremos que se estima impacten la producción del agua a nivel de cuencas hidrográficas (Reyes-García et al., 2022).

El impacto desfavorable del cambio climático sobre los recursos hídricos, en los últimos años ha sido causal de un sin número de estudios a nivel de cuenca hidrográfica, hay que informar que la integración de escenarios RCP dentro de los modelos hidrológicos, permiten además de comprender la dinámica existente entre los componentes biofísicos y climáticos, la importancia de los diferentes servicios que esta ofrece, siendo la producción de agua el más importante (Duque Yaguache & Vázquez Zambrano, 2015).

El Ecuador considerado como uno de los países más vulnerables ante el cambio climático, eventos como la disminución de los glaciares, incremento en los niveles del mar y las anomalías climáticas asociados a eventos de El Niño y la Niña, inciden significativamente en el bienestar de la sociedad (Cadilhac et al., 2017).

En la actualidad el Ecuador cuenta con escenarios climáticos realizados a partir de los modelos climáticos globales CMIP5, en los cuáles se estima que las anomalías para la temperatura media el RCP 2,6 será de 0,6°C y para el RCP 8,5 de 2,8°C; para la temperatura máxima el RCP 2,6 será de 0,8°C y para el RCP 8,5 de 3,5°C y para la temperatura mínima el RCP 2,6 será de 0,6°C y para RCP 8,5 de 2,8°C (Armenta Porras & Villa Cedeño, 2016)

La cuenca del Río Guayas es una de las más importantes de la costa del Pacífico y para el Ecuador sin duda alguna, ya que representa cerca del 12.57% del territorio nacional y en ella habitan el 40% de la población ecuatoriana, su disponibilidad hídrica es de 8.847 m³/hb/año se encuentra por encima del promedio mundial 6.783 m³/hb/año (Tapia J. , 2012).

Según la SENAGUA, la disponibilidad del caudal superficial se destina 69.46% Riego, 25.02% generación de energía, 3.61% industrial, 1.11% consumo humano, 0.50% acuicultura, 0.15% turismo y termal, 0.11% abrevadero, 0.006% envasado de agua y 0.001% otras, indistintamente del uso y aprovechamiento, el agua es indispensable (SENAGUA., 2017), Se localiza entre las provincias de Los Ríos, Guayas, Cotopaxi, Bolívar, Manabí, Cañar, Chimborazo y Santo Domingo, caracterizada por la actividad agrícola, ganadera, forestal, acuicultura y pesca, es la zona agropecuaria de mayor producción nacional (Tapia J. , 2012).

A pesar de ser una cuenca en la que se realizan estudios en las distintas áreas del conocimiento, hasta la actualidad no se ha incorporado proyecciones de cambio climático en modelos hidrológicos, la coordinación de la maestría de Cambio Climático, haciendo uso de la Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua (SWAT siglas en inglés) pretenden desarrollar un modelo hidrológico en el cuál debidamente calibrado y validado logre integrar proyecciones de cambio climático y contrastar el impacto que generaría las proyecciones de precipitación y temperatura sobre los caudales como parte de los procesos hidrológicos.

Información que servirá de argumento, fundamento y sustento técnico para asesorar a los tomadores de decisiones sobre las acciones asertivas que pueden ser implementadas por los gobiernos e instituciones indistintamente de sus competencias dentro del territorio, para mejorar la gestión del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Guayas tomando en cuenta la época de déficit hídrico y superávit hídrico.

De igual manera la diversidad de servicios socio ambientales y sus distintas características desde la parte baja (sector costa) hasta la parte alta (sector sierra), además actividades que para su normal desarrollo requieren indispensablemente grandes volúmenes de agua, entre las más destacadas; el riego para la producción agropecuaria, el volumen de agua requerido para la generación de energía, el consumo humano, la industria, el turismo entre otras, de la misma forma el mantener las condiciones mínimas para el funcionamiento de los ecosistemas (Encalada, 2010a).

1.3 Planteamiento del problema

¿En qué medida afectará las variaciones de los patrones de precipitación y temperatura que presentan los escenarios RCP 4,5 y 8,5 sobre los caudales superficiales de Río Guayas?

1.4 Justificación

El fenómeno del cambio climático se ha convertido en uno de los mayores desafíos de la actualidad, especialmente en lo relacionado con la regulación y disponibilidad del agua en las cuencas hidrográficas (ONU-WWAP, 2020). En ese contexto, las variaciones en los patrones de precipitación y temperatura, el aumento de sequías prolongadas y la intensificación de eventos extremos como inundaciones, exigen la implementación de herramientas de análisis que permitan anticipar sus efectos y plantear medidas de gestión adecuadas, por ello, el desarrollo de un modelo hidrológico bajo escenarios de cambio climático para la cuenca del río Guayas resulta prioritario y estratégica.

Desde el componente social, el desarrollo de este tipo de estudios favorece la planificación de un acceso seguro y equitativo al agua, implementando medidas que reducen la vulnerabilidad de comunidades expuestas a fenómenos extremos y protege actividades productivas como la agricultura, ganadería, consumo humano, industria, ecosistemas, entre otros que dependen directamente del recurso hídrico, además que la gestión del mismo, representa un medio para reducir las desigualdades sociales vinculadas al abastecimiento de agua y mejorar la calidad de vida de la población.

Disponer de un modelo hidrológico permite comprender cómo las variaciones climáticas impactan en los ecosistemas hídricos, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Cervantes et al., 2021). Por tanto, esta información es clave para impulsar estrategias de conservación, restauración y adaptación que fortalezcan la capacidad de respuesta de los sistemas naturales frente a escenarios cada vez más críticos (Chavez Barriga & Castillo Ortega, 2021).

La investigación de igual forma se convierte en un instrumento fundamental para la formulación de políticas públicas, ya que su argumento, sustento se respaldan en evidencia científica, proporcionando a las instituciones y gobiernos una base técnica que orienta la gestión integrada del recurso hídrico a nivel de cuenca hidrográfica, la definición de planes de trabajo encaminados en la adaptación y mitigación promueve una gobernanza del agua más participativa, transparente y eficiente (Santiago Jiménez, 2023).

En lo que respecta a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), la investigación responde de manera directa con el ODS 6, al promover una gestión responsable del agua; con el ODS 13, al fortalecer las acciones frente al cambio climático; y con el ODS 15, al contribuir con la preservación de ecosistemas terrestres estratégicos (Barrero-Barrero & Baquero-Valdés, 2020).

En síntesis, el desarrollo de un modelo hidrológico bajo escenarios de cambio climático no solo responde a una necesidad científica, sino que también constituye una propuesta integral con impacto en el bienestar social, la conservación del medio ambiente,

el fortalecimiento institucional y el cumplimiento de compromisos internacionales en materia de sostenibilidad.

Con la investigación se pretende ofertar un documento que sirva para la toma de acciones de gestión integral de la cuenca del Guayas, desde la conservación de las fuentes de agua hasta la reducción de las externalidades, en conjunto con la participación de todos los niveles de gobierno de las provincias que se encuentran dentro de la delimitación.

A través de la investigación y la transferencia de conocimientos se pretende contar con una metodología de integración de modelos hidrológicos y escenarios de cambio climático a nivel de cuenca hidrográfica, constara información acerca de los datos biofísicos y climáticos para el modelo, métodos para la evaluación de la calidad de los datos y herramientas para realizar la calibración y validación de los modelos, que podrá ser replicada para el estudio de Cuencas hidrográficas en el Ecuador.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Desarrollar un modelo hidrológico de la cuenca del río Guayas mediante la herramienta SWAT, con énfasis en la subcuenca del río Vines, para simular la producción de caudales bajo escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5, con el fin de generar insumos científicos para la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos.

1.5.2 Objetivos específicos

- Realizar el modelo hidrológico para la cuenca del río Guayas, mediante SWAT considerando los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5
- Analizar los cambios proyectados en los caudales superficiales de la subcuenca del río Vinces bajo escenarios RCP 4.5 y 8.5
- Proponer medidas de para la gestión integrada de los recursos hídricos para reducir la vulnerabilidad ante la amenaza de sequía e inundaciones

2 CAPÍTULO II

2.1 Marco teórico

2.1.1 Antecedentes

El impacto desfavorable del cambio climático en relación con la escasez de agua ha generado un incremento de los estudios hidrológicos en los últimos años (Jodar, 2018), en la actualidad se conoce el desarrollo de aproximadamente 16 modelos hidrológicos que su utilidad depende de su finalidad y según (Cabezas, 2015) los modelos se clasifican por;

Su finalidad: Pretende modelar el comportamiento de variables.

Su escala: La distribución y semi distribución de los modelos, resolución espacial.

Alcance temporal: Simulación por episodios o simulación continua.

El software SWAT es una herramienta para la evaluación del suelo y del agua a nivel de cuenca hidrográfica, que funciona como una extensión más de los sistemas de información geográfica, entre los más conocidos QGIS que añadida la extensión SWAT toma el nombre de QSWAT ambos de libre acceso y con ArcGis, que requiere licencia para su funcionamiento toma el nombre de ArcSwat (CIAT., 2019). SWAT es un modelo continuo que ayuda a predecir las complicaciones que tendrá el recurso hídrico por la acción antropogénica y climática, los parámetros básicos de entrada son, climática; temperatura y precipitación la data debe ser diaria, los parámetros biofísicos; Modelo de Elevación Digital del Terreno, shapes de uso de suelo y cobertura de suelo y tipo de suelo sin importar la escala.

La herramienta para la Evaluación de Suelo y Agua (SWAT Soil and Water Assessmet Tool siglas en inglés) fue creada en los años de 1990 por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) y la Universidad de Texas A&M (TAMU por sus siglas en inglés), hasta la actualidad, el mantener una plataforma virtual en donde los usuarios exponen sus problemas e inquietudes, ha permitido un mejoramiento continuo, en funciones y aplicaciones (Hurtado, 2015). En la región el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) haciendo uso del modelo SWAT logró determinar que el impacto del Cambio Climático para el Ecuador será un incremento en el caudal en los meses de enero – agosto debido a la época invernal (MAE., 2017).

La Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua (SWAT siglas en inglés) ha sido utilizada para desarrollar modelos hidrológicos en el mundo, sin embargo, en los últimos años se ha identificado el impacto significativo sufren los procesos hidrológicos de las cuencas hidrográficas cuando se han incorporado las variaciones de temperatura y precipitación como un efecto del Cambio Climático.

Para ampliar el conocimiento sobre el uso de la herramienta y las proyecciones climáticas mencionaremos varios estudios que resultan importantes para argumentar el trabajo investigativo:

En la cuenca del río Beijiang localizada al sur de China (Song & Zhang, 2012), se realizó un estudio para identificar cual es la respuesta hidrológica frente al cambio

climático, haciendo uso de SWAT se simuló el flujo de la corriente de la cuenca del río Beijiang, los datos de entrada para el modelo; el modelo de elevación digital se lo descargó a una escala de 100m del Servicio Geológico de los Estados Unidos, los datos de suelo del Instituto de Investigación Ecológica y Ambiental de la provincia de Guangdong, la data climática se obtuvo de 1956 al 2005, la calibración del modelo se lo realizó comparando los datos simulados versus los observados en una estación, cada simulación se fue ajustando y comparando de manera gráfica y numérica hasta obtener resultados satisfactorio, además que para la calibración se utilizaron datos de 20 años de 1961 a 1980 y para la validación 10 años desde 1981 al 1990, la evaluación de la simulación y el observado se realizó a través del coeficiente de eficiencia de Nash and Sutcliffe a través del cual se obtuvo un R^2 0.896. Como resultado se verificó que el modelo SWAT podía simular de manera efectiva el cambio de flujo en la cuenca del río Beijiang y a través de 15 combinaciones de cambios de temperatura y precipitación, resultó que, cuando la temperatura aumenta, también aumenta la evapotranspiración por lo que el rendimiento del agua disminuye y que el rendimiento del agua, solo aumenta cuando hay presencia de lluvia y, cuando la lluvia aumenta pero la temperatura se mantiene igual la evapotranspiración y agua también aumentan.

Un estudio adicional, se realizó un modelo hidrológico para evaluar el impacto del cambio climático sobre la cuenca del río Heeia Oahu en Hawai, que por ser una isla volcánica, sus suelos son permeables y sufren de escasez de datos hidrológicos, los datos

de entrada; el modelo digital de elevación a 10m, shape de tipo de suelo de 24m del departamento de Agricultura, Nature Resources Conservation Service y el shape de cobertura vegetal a 30m obtenido de Earth Resources Observation and Science Center. La data climática se obtuvo desde el año 2000 al año 2013 del Hawaii Institute of Marine Biology, la calibración del modelo se realizó a través del algoritmo de SwatCup (SUF2) el cual evalúa los parámetros que resultan más significativos para el modelo, la calibración se realizó de 2002 al 2008 y la validación del 2009 al 2013, una vez calibrado y validado se integró las proyecciones climáticas B1 y A1F1 que representan a una reducción del 5% y 10% de la lluvia. Como resultado el modelo indicó que la cuenca tiene una alta extracción del agua lluvia debido a los suelos, las corrientes simuladas versus las observadas mostraron un desempeño satisfactorio en la aplicabilidad de SWAT para desarrollar hidrológicos en cuencas hidrográficas a más de ser un método simple para resolver problemas, bajo los escenarios de cambio climático se observó una disminución de la precipitación en la estación húmeda y un aumento de la estación seca por lo que el flujo de agua subterránea puede disminuir hasta un 15% debido a los cambios en los patrones de lluvia, afectando así la disponibilidad del agua subterránea.

Otro estudio similar; La modelación se llevó a cabo en la cuenca del río del Valle del Jovel en Chiapas-México, con la finalidad de predecir los efectos del cambio climático sobre el balance hídrico en la cuenca hidrográfica antes mencionada, se diseñó en ArcSwat un modelo hidrológico que se basa en la ecuación del balance hídrico para evaluar el

impacto del cambio climático sobre los procesos hidrológicos, la información de entrada; el modelo digital de elevación de a 30m obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano, para suelos se utilizó la base HWSD de la FAO igual a 30m, para la cobertura vegetal la cartografía nacional del Inventario Forestal, la data climática se utilizó del Global Weather Data for SWAT, de 1984 al 2014 y las proyecciones de cambio climático RCP 4.5 para (2015 - 2039). Se observó que, en los escenarios de cambio climático, existen diferencias cuantitativas, la escorrentía superficial se reduce en un 16%, la evaporación y la evapotranspiración un 9% y la recarga del acuífero un 6%.

Una modelización hidrológica experimental de un área de la cuenca del río Guayas, investigación a cargo de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de la Plata en conjunto con el Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR), identificó que el caudal base varía según el periodo, entre enero – junio el caudal base es de 10 a 15 m³/s, en cambio entre el mes de julio a diciembre de 3 a 8 m³/s, los meses que hay excedente de agua y disponible para su uso es desde el mes de septiembre a julio, también se identificó que la cuenca del Guayas es una zona de alto riesgo de erosión hídrica (Tapia C. , 2012).

El Centro de Investigación de Agua y Desarrollo Sustentable (CADS) a través del convenio que mantiene con la Universidad de Gante, desarrollaron un modelo hidrológico para la cuenca del Guayas, para modelar pesticidas, debido a la intensidad agrícola por la que se caracteriza la cuenca y su impacto en el sistema fluvial. El modelo fue calibrado y

validado con estaciones medidas en campo proporcionadas por el Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología.

Un estudio que resulto muy peculiar fue el modelo realizado en la provincia de Chimborazo – Ecuador a nivel de subcuenca con el propósito de identificar el impacto del cambio climático sobre la sub cuenca y establecer políticas públicas para incorporar la gestión del recurso hídrico en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial, el escenario utilizado en este caso fue el RCP 2.6 que corresponde al Modelo Global de Circulación (GCM siglas en inglés), como resultado se logró contrastar las condiciones normales y la proyección que existe una variación en la recarga del caudal superficial debido a la reducción de las precipitaciones.

2.1.2 Contexto global

Como se muestra en la figura 1(A), el sistema climático presenta cambios significativos en comparación con las observaciones registradas desde 1850, se puede observar la presencia de calentamiento en la atmosfera y el océano, con tendencias positivas superiores a 1°C. El panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático mencionan que el aumento del nivel del mar ha sido de 19cm a partir de 1901 y se prevé que para el año 2100 el aumento entre 26 a 98 cm (IPCC, 2014a), como se observa en la figura 1 (B) los niveles del mar registrados en los últimos 25 años y en la figura 1 (C) los niveles de CO₂.

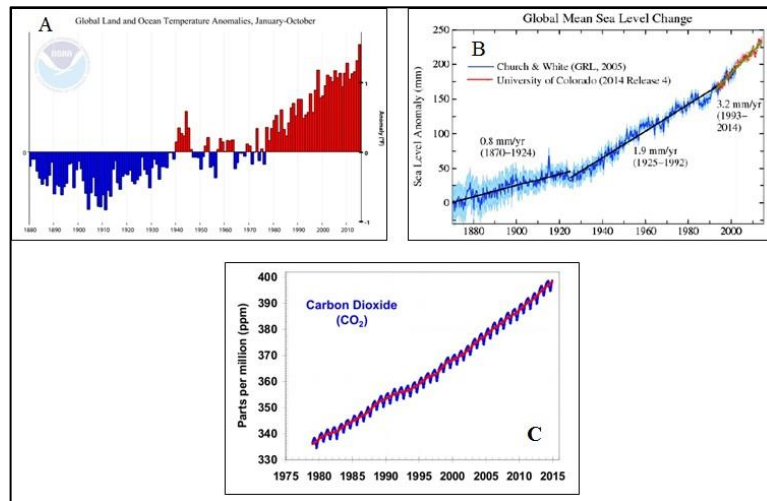


Figura 1 Anomalías registradas de la temperatura oceánica y terrestre; B) Aumento del nivel del mar desde 1850 C)

Fuente: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA).

Desde 1901 se han registrado eventos climáticos y meteorológicos extremos alrededor del mundo, y es probable que en regiones las precipitaciones intensas se hayan agudizado y en otras haya disminuido (IPCC, 2014a).

2.1.3 Cambio climático en Ecuador

El Ecuador posee una extensión total de 256 370 km², por su ubicación geográfica y condiciones socioeconómicas hace que sea un país vulnerable a eventos de diferente índole, una de las evidencias del impacto del cambio climático mejor documentadas ha sido el retroceso de los glaciares, medidos a través de imágenes satelitales y el uso de sistemas de información geográfica, como resultado se logró evidenciar que existe pérdida

entre el 25 y 60% de los glaciares de los volcanes del Ecuador (MAE., 2017). A partir del siglo XX, las observaciones globales para el Ecuador presentan un aumento entre 0.4 y 0.8 °C, como se observa en la figura 2, la precipitación no ha presentado cambios significativos.

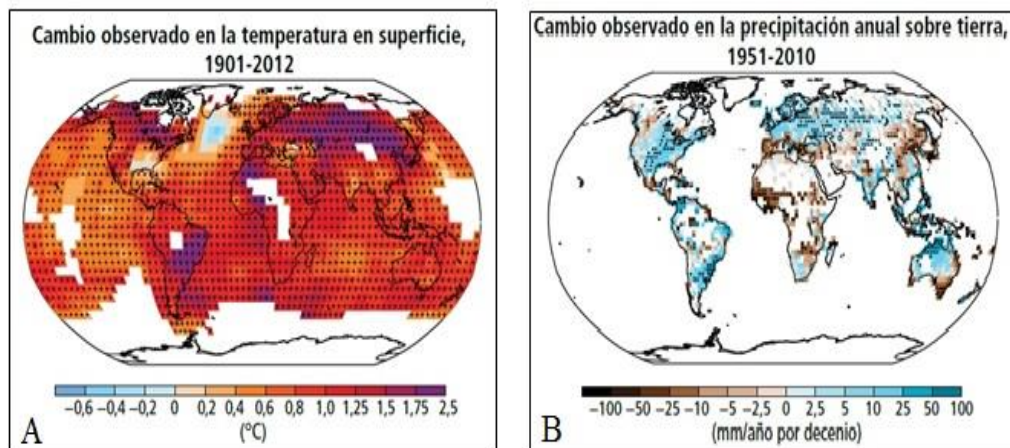


Figura 2 A) Cambios observados de la temperatura superficial entre 1901 y 2012; B) Cambios observados de la precipitación entre 1951 – 2010.

Fuente: Panel intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

2.1.4 Escenarios climáticos

Modelos climáticos globales

La dinámica atmosférica y la circulación alrededor del planeta son representados a través de modelos numéricas multidimensionales de circulación (GCM siglas en inglés), que se busca la representación de los procesos físicos de la atmósfera y, son la herramienta más avanzada que se cuenta para simular las condiciones futuras con respecto a los

aumentos de la emisión de gases de efecto invernadero (IPCC, 2013). La resolución con que se presentan los modelos es de aproximadamente 111km por cada grado de arco, lo que significa que las simulaciones no responden a las condiciones climáticas locales, se debe realizar reducción de escala a través de métodos estadísticos, dinámicos y una mezcla entre los ambos (Armenta Porras & Villa Cedeño, 2016).

Escenarios de Cambio Climático

Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, menciona que, para mejorar la comprensión de las interacciones existentes entre el sistema climático, ecosistemas y acciones humanas, proponen escenarios, que pretenden mostrar cómo será el futuro bajo ciertas condiciones, los cuáles fueron realizados mediante un proceso secuencial (figura 3) con la finalidad de reducir al máximo la incertidumbre de las proyecciones.

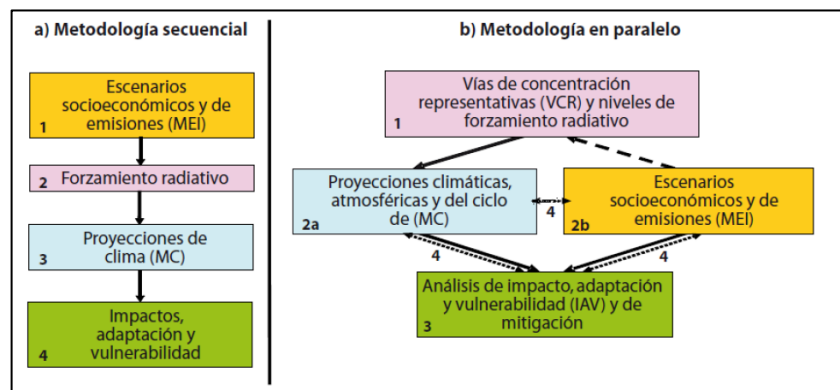


Figura 3 Proceso secuencial para generar escenarios de CC

Fuente: Proyecciones Climáticas para el Ecuador (Armenta Porras & Villa Cedeño, 2016)

2.1.5 Escenarios RCP

Los escenarios son rutas plausibles identificadas por los científicos como consecución del forzamiento radiativo, en él se incluye información sobre el uso de suelo, cobertura vegetal y concentración radiativa de especies, denominados Caminos representativos de concentración (RCP Representative Concentration Pathways por sus siglas en inglés), se puede apreciar de mejor manera en la siguiente tabla:

Tabla 1 Rutas de Concentración Representativas

	FR	Tendencia de FR	CO ₂ en 2100
RCP 2,6	2,6 W/m ²	Decreciente en 2100	421 ppm
RCP 4,5	4,5 W/m ²	Establece en 2100	538 ppm
RCP 6,0	6,0 W/m ²	Creciente	670 ppm
RCP 8,5	8,5 W/m ²	Creciente	936 ppm

FR= Forzamiento Radiativo

RCP= Senda Representativa de Concentración

Fuente: Impacto del cambio climático en el comportamiento hidrológico de cuencas hidrográficas (Espinoza, A. 2017)

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), publicado el reporte AR5, existe la probabilidad de que a finales del siglo XXI el aumento de la temperatura superficial sea de 1,5°C en comparación con el periodo

1850 – 1900 para todos los RCP con excepción del RCP 2,6; el RCP 4,5 y RCP 6,0 la probabilidad es de al menos 2°C y el RCP 8,5 la temperatura será superior a 3°C.

2.1.6 Ciclo hidrológico

El agua se encuentra en el planeta en constante movimiento, en diferentes estados y formas, denominado como ciclo hidrológico, el cual está compuesto por los siguientes componentes (S. L. Neitsch et al., 2011a):

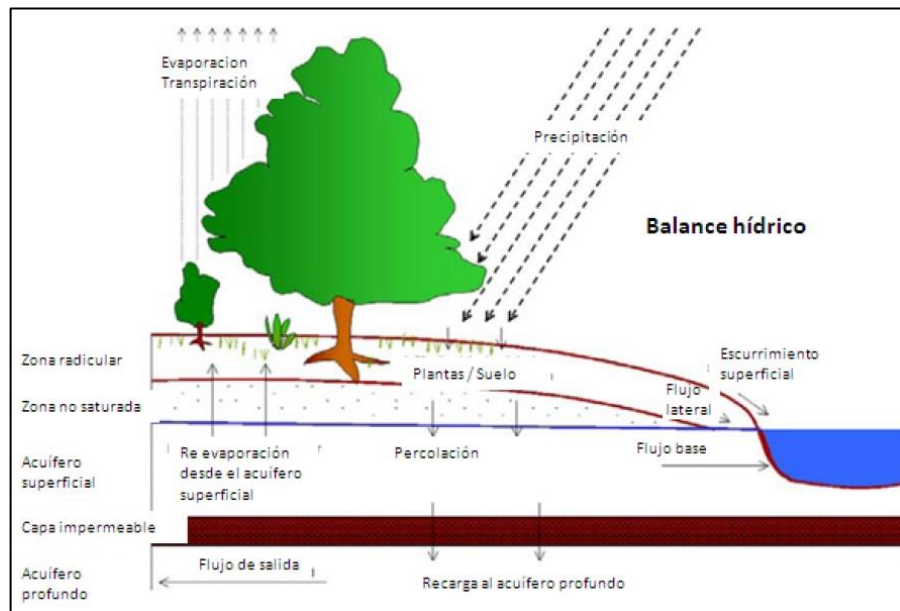


Figura 4 Balance hídrico simulado por SWAT

Fuente: Balance hídrico (S. L. Neitsch et al., 2011a)

La precipitación es la cantidad de agua que proviene de la humedad atmosférica y cae sobre la superficie terrestre, esta puede ser en estado líquido o sólido, dentro de la hidrología es el proceso meteorológico más importante (Lozano-Rivas, 2018)

La evapotranspiración resulta de dos procesos distintos como son; la evaporación que es el proceso físico mediante el agua pasa de estado líquido a vapor (Villegas & Torres, 1977), proviene del suelo, de la vegetación y de las superficies de agua, en cambio la transpiración es la pérdida de agua proveniente de las plantas, las cuales a través de sus raíces toman agua del suelo, toman lo necesario y el resto lo transpiran, la cantidad total de agua que se pierde en la atmósfera se denomina bajo el concepto de evapotranspiración (Sánchez, 2010)

La infiltración es la cantidad de agua que se encuentra sobre la superficie y penetra hacia el interior, la infiltración dependerá de las condiciones del suelo, cantidades de agua y aire presentes en el interior, la infiltración de agua humedece las capas de suelo de arriba hacia abajo (Chuez, 2015)

La percolación está relacionada con la recarga de acuíferos, debido que el agua que desciende después de la lluvia llega a niveles del suelo que van más allá de las raíces de las plantas (Echeverría et al., 2007).

Flujo lateral del agua se refiere al agua que se encuentra en el suelo sobre la superficie de los acuíferos y es la que alimenta a los canales de drenaje (Gonçalves et al., 2011)

Flujo de agua subterránea es el proceso mediante el cual se crea un flujo que sirve de base para el agua superficial y subterránea, gran porcentaje de esta agua se utiliza para abrevaderos y riego (Gonçalves et al., 2011).

2.1.7 Ciclo hidrológico

El agua se encuentra en el planeta en constante movimiento, en diferentes estados y formas, denominado como ciclo hidrológico, el cual está compuesto por los siguientes componentes (S. L. Neitsch et al., 2011a):

La precipitación es la cantidad de agua que proviene de la humedad atmosférica y cae sobre la superficie terrestre, esta puede ser en estado líquido o sólido, dentro de la hidrología es el proceso meteorológico más importante (Lozano-Rivas, 2018)

La evapotranspiración resulta de dos procesos distintos como son; la evaporación que es el proceso físico mediante el agua pasa de estado líquido a vapor (Villegas & Torres, 1977), proviene del suelo, de la vegetación y de las superficies de agua, en cambio la transpiración es la pérdida de agua proveniente de las plantas, las cuales a través de sus raíces toman agua del suelo, toman lo necesario y el resto lo transpiran, la cantidad total de agua que se pierde en la atmósfera se denomina bajo el concepto de evapotranspiración (Sánchez, 2010)

La infiltración es la cantidad de agua que se encuentra sobre la superficie y penetra hacia el interior, la infiltración dependerá de las condiciones del suelo, cantidades de agua y aire presentes en el interior, la infiltración de agua humedece las capas de suelo de arriba hacia abajo (Chuez, 2015), la percolación está relacionada con la recarga de acuíferos, debido que el agua que desciende después de la lluvia llega a niveles del suelo que van más allá de las raíces de las plantas (Echeverría et al., 2007).

Flujo lateral del agua se refiere al agua que se encuentra en el suelo sobre la superficie de los acuíferos y es la que alimenta a los canales de drenaje (Gonçalves et al., 2011). Flujo de agua subterránea es el proceso mediante el cual se crea un flujo que sirve de base para el agua superficial y subterránea, gran porcentaje de esta agua se utiliza para abrevaderos y riego (Gonçalves et al., 2011).

2.1.8 Modelo hidrológico

Los modelos hidrológicos son representaciones matemáticas del ciclo del agua sobre un área de interés para el investigador, mediante la selección de parámetros asociados al sistema hidrológico se pretende disminuir la complejidad del mismo, sin embargo, hay que entender que entre menos preciso son las variables de entrada, más incertidumbre traerán sus resultados (Ponce, 1989).

En la actualidad se cuenta con sistemas de información geográfica que incorporan dentro de sus paquetes ambientes de trabajo para la implementación de modelos hidrológicos entre los cuales mencionaremos Hydrologic Simulation package-ortran (HSPF), Hydrologic Modeling System (HEC – HMS) y Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Herramienta para la evaluación del suelo y del agua, permite semi distribuir al modelo, de tal manera que separa discretamente las variables de entrada, siendo climáticos y biofísicos (S. L. Neitsch et al., 2011b)

Empezó usándose SWAT para estimar el impacto del uso y cambio del uso de suelo, producción de sedimentos, variación del caudal, disponibilidad de agua, sin

embargo, en América Latina, en los últimos años ha crecido las investigaciones relacionadas con la gestión de los recursos hídricos adicionando las proyecciones climáticas.

2.2 Modelo SWAT

La herramienta para la evaluación del suelo y el agua SWAT (Soil and Water Assessment Tool), es un software que modela varios eventos en tiempo continuo, esto quiere decir a largo plazo, se basa en el balance hídrico para determinar la salida y almacenamiento de la cuenca que se va a estudiar (Morales, 2016).

También menciona (Morales, 2016) que la ventaja que presenta SWAT frente a otros modelos hidrológicos es que trabaja con la interfaz de programas de uso común como lo son ArcMap y Qgis, hace más fácil su manejo y utilización, se puede cuantificar variables de interés relacionadas con procesos físicos, además que es un método ágil y la salida de los resultados es inmediata, es de código abierto.

En esta sección aclararemos los cálculos considerados más importantes de la Herramienta para la Evaluación de Agua y Suelo (SWAT siglas en inglés), es necesario tener una visión general de los procesos internos del modelo.

2.2.1 Escorrentía superficial

Cuando la tasa de infiltración es excedida tiene lugar a la escorrentía superficial, a medida que el suelo empieza a humedecerse la tasa de infiltración disminuye, cuando las

depresiones superficiales se llenan y el agua cae continuamente, el agua corre sobre la superficie.

Swat integra el método del servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos para calcular la esorrentía superficial y es ampliamente utilizado en hidrología CHUNG ET AL 2010, además que a cada unidad de respuesta hidrológica calcula el caudal máximo de avenida, el tiempo de concentración sobre la superficie, flujo canalizado y el retraso:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad 1$$

Donde Q_{surf} es la esorrentía superficial o exceso de precipitación en (mm), R_{day} es la precipitación diaria en (mm), I_a es el almacenamiento superficial en (mm), S es la capacidad límite de almacenamiento de agua sin que se produzca la esorrentía (mm)

El cambio del uso de suelo, cobertura vegetal la pendiente son factores que inciden en la capacidad máxima de almacenamiento de agua, la retención se define como:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad 2$$

De manera experimental se encontró que el umbral de esorrentía es aproximadamente de 0,2S entonces la ecuación de Coeficiente de Escurrimiento (CN Curve Number siglas en ingles se expresa:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2 \cdot I_a)^2}{(R_{day} - 0.8 + S)} \quad 3$$

Hay que mencionar algunos cálculos que integra la Herramienta para la Evaluación de Agua y Suelo, “Peak Runoff Rate” caudal máximo de avenida, se refiere a los niveles

máximos que alcanzaría un caudal bajo un evento de precipitación determinado (S. L. Neitsch et al., 2011a):

$$q_{peak} = \frac{a_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot A}{3.6 \cdot T_{conc}} \quad 4$$

Donde q_{peak} es el caudal máximo en ($m^3 \cdot s^{-1}$), a_{tc} es el tiempo de concentración que tiene una fracción de la precipitación diaria, Q_{surf} es la escorrentía superficial en (mm), A es el área de la subcuenca (km^2), T_{conc} es el tiempo de la concentración de la subcuenca en (h) con un valor 3.6 que es un factor de conversión de unidad.

SWAT realiza estos cálculos para cada unidad de respuesta hidrológica, realizando modificaciones en la estimación del caudal con la finalidad de adaptar a la ecuación de HRU que consisten, remplazar la subcuenca por unidades de respuesta hidrológica y la para la concentración la longitud del canal se multiplica por la fracción de la unidad de respuesta hidrológica de cada subcuenca.

El tiempo de concentración

Se refiere el tiempo que tarda una gota de lluvia desde el punto de la cuenca hasta llegar al flujo de cierre de la sección, para obtener este valor se suma el tiempo de flujo sobre la superficie y el tiempo de propagación del flujo canalizado:

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad 5$$

Donde t_{conc} es el tiempo de la concentración en la subcuenca, t_{ov} es el tiempo de concentración del flujo superficial, t_{ch} es el tiempo de concentración de la canalización del flujo

Cuando se desconoce el valor del tiempo de la concentración del flujo superficial se usa la siguiente ecuación:

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0,6} \cdot n^{0,6}}{18 \cdot slp^{0,3}} \quad 6$$

Donde L_{slp} es la longitud que tiene la ladera de la subcuenca (m), n es el coeficiente de rugosidad adimensional y slp es la media de la pendiente (m/m), para obtener el tiempo de concentración canalizado se utiliza la siguiente ecuación

$$t_{ch} = \frac{0.62 \cdot L \cdot n^{0.75}}{A^{0.25} \cdot slp_{ch}^{0.375}} \quad 7$$

Donde t_{ch} tiempo de concentración canalizado (h), L se refiere a la longitud del canal desde el punto más lejano hasta la desembocadura (km), n es el coeficiente de rugosidad adimensional, A es el área de la subcuenca (km^2) y finalmente slp_{ch} la pendiente media del canal (m/m).

El retraso de la escorrentía superficial “LAG”

Como lo menciona (S. L. Neitsch et al., 2011a), cuando el tamaño de las subcuencas es de gran tamaño y superan el 1 día en los tiempos de concentración, el software incluye el cálculo del retraso de la escorrentía superficial con la siguiente formula:

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-sur_{lag}}{t_{conc}}\right) \right] \quad 8$$

Donde Q_{surf} es la esorrentía descargada hacia el canal superficial en un determinado día (mm), Q'_{surf} es la esorrentía superficial generada a partir de la subcuenca (mm), $Q_{stor,i-1}$ es la esorrentía retrasada del día anterior o esorrentía almacenada (mm), $surlag$ es el coeficiente del retraso de la esorrentía superficial y t_{conc} es el respectivo tiempo de concentración de la subcuenca (h).

Tránsito de avenidas

La esorrentía superficial generada una vez alcanzada la red de drenaje se convierte en un flujo confinado que su comportamiento dependerá de la velocidad del flujo y la morfología del cauce, SWAT analiza el transido de las avenidas con dos métodos, Musking y Propagación del almacenamiento variable (Variable Storage Routing Method siglas en inglés - VSRM) pero el que se configura por defecto es la última cuya fórmula es la siguiente;

$$q_{in,ave} + \frac{V_{stored,1}}{\Delta t} - \frac{q_{out,1}}{2} = \frac{V_{stored,2}}{\Delta t} + \frac{q_{out,2}}{2} \quad 9$$

Donde $q_{in,ave}$ es el caudal que ingresa durante un intervalo de tiempo, Δt es el aumento de tiempo(s), $q_{out,1}$ es el canal que resulta al inicio de cada intervalo (m^3/s), $V_{stored,1}$ es el volumen almacenado al inicio de cada intervalo (m^3), $q_{out,2}$ es el caudal resultante al final del intervalo (m^3/s) y $V_{stored,2}$ es el volumen almacenado al final del intervalo (m^3).

Para calcular el tránsito del caudal se lo realiza dividiendo el volumen de agua por el caudal

$$TT = \frac{V_{stored}}{q_{out}} = \frac{V_{stored,1}}{q_{out,1}} = \frac{V_{stored,2}}{q_{out,2}} \quad 10$$

Donde TT es el tiempo del tránsito del caudal (s), V_{stored} es el volumen almacenado (m^3) y q_{out} es el caudal de salida (m^3/s).

Al final resulta una ecuación en la que integra el tiempo de tránsito más el coeficiente de almacenamiento (SC), quedando de la siguiente forma:

$$q_{\text{out},2} = SC \cdot q_{\text{in},\text{ave}} + (1 + SC) \cdot q_{\text{out},2} \quad 11$$

Los valores calculados anteriormente, expresados en unidades de volumen a través del método de Propagación convexa (Convex Routing Method) y el método Musking (Overton, 1966)

$$V_{\text{out},2} = SC \cdot (V_{\text{in}} + V_{\text{stored},1}) \quad 12$$

Donde $V_{\text{out},2}$ salida final del intervalo (m^3), SC coeficiente de almacenamiento, V_{in} cantidad de agua que ingresa al cauce (m^3) y V_{stored} es la cantidad de agua al comienzo del intervalo (m^3).

La laminación del hidrograma de la esorrentía es producida por el tránsito de las avenidas, el agua se almacena en los caudales a medida que el agua se distribuye por la cuenca.

Como menciona (Neitsch, 2005), el balance del agua en el cauce se calcula a través de:

$$V_{\text{stored},2} = V_{\text{stored},1} + V_{\text{in}} - V_{\text{out}} - t_{\text{loss}} - E_{\text{ch}} + \text{div} + V_{\text{bnk}} \quad 13$$

Donde $V_{\text{stored},2}$ agua almacenada en el cauce al final del paso del tiempo (m^3) $V_{\text{stored},1}$ volumen contenido en el cauce al inicio del intervalo (m^3), V_{in} agua que ingresa en el cauce (m^3), E es la evaporación del canal (m^3), div cantidad de agua agregada o retirada

mediante derivaciones (m^3) y V_{bnk} cantidad de agua que se agrega debido al retorno del almacenamiento en la orilla (m^3).

2.2.2 Infiltración

Se denomina infiltración al agua que ingresa al suelo por diferentes motivos, el primero se debe a la absorción que realizan las plantas, cuando el agua percola más allá del suelo y sirve de recarga de los acuíferos y al moverse en sentido lateral en el perfil del suelo y dirigirse hacia los ríos.

Se ha establecido dos estados intermedios en el contenido del agua debido a la interacción de la vegetación y el suelo, el primero es la capacidad de campo, que se refiere al contenido de agua en un suelo saturado y el punto de marchitamiento que es nivel de humedad del suelo cuando la vegetación no puede absorber más agua, la cantidad de agua retenida en el suelo es producto de la diferentes entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente, se la considera como el agua disponible para la vegetación.

$$AWC = FC - WP \quad 14$$

Donde FC se refiere a la cantidad de agua retenida en una succión de suelo de 0.033 Mpa, WP es la cantidad de agua que es retenida por el suelo a una tensión de 1.5 MPa.

Hay que recordar que después de la infiltración el agua no se mantiene estática y esta puede fluir bajo condiciones saturados y/o saturadas, SWAT simula directamente el flujo saturado cuando el contenido de agua excede la capacidad de campo, etc. Quiere

decir que el agua fluye por acción de la gravedad con dirección ascendente (Neitsch, 2005).

SWAT considera que la distribución del agua es uniforme, niveles de contenido que van de 1 a 10, esta suposición limita la modelación del flujo no saturado en sentido horizontal. Cuando la temperatura del suelo es inferior a 0°C no se calcula el movimiento del agua debido que el suelo este helado.

2.2.3 Escorrentía subterránea

Para cada subcuenca SWAT tiene la capacidad de simular dos sistemas de acuíferos, el superficial y el profundo. Haciendo referencia al acuífero superficial es el acuífero libre que contribuye al cauce principal en cambio el profundo es aquel acuífero cuya contribución es fuera de la cuenca(S. Neitsch et al., 2005).

El balance de agua para el acuífero está dado por:

$$aq_{sh,i} = aq_{as,i-1} + W_{rchrg} - Q_{gw} - W_{revap} - W_{deep} - W_{pump,sh} \quad 15$$

Donde, $aq_{sh,i}$ es el volumen de agua almacenado en el acuífero superficial en un día determinado i (mm), $aq_{as,i-1}$ es el volumen de agua almacenado en el acuífero superficial del día i restado 1 (mm), W_{rchrg} se refiere a la recarga del acuífero (mm), Q_{gw} es el flujo base o flujo de agua subterránea hacia el canal principal (mm), W_{revap} es el agua que pasa del acuífero (mm), W_{deep} es la cantidad de agua que pasa desde el acuífero superficial

hacia el acuífero profundo y $W_{pump,sh}$ es la retención por bombeo del agua en el acuífero superficial (mm).

2.2.4 Evapotranspiración

SWAT al utilizar el método CN para calcular la escurrimiento superficial, la retención del agua por cobertura vegetal lo agrupa como un parámetro inicial, entonces SWAT calcula que la cantidad de agua retenida por la vegetación está dada por:

$$can_{day} = can_{mx} \cdot \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad 16$$

Donde can_{day} es la cantidad máxima que puede ser retenida el agua por la vegetación (mm), can_{mx} es la cantidad máxima que puede el agua ser retenida cuando la vegetación es desarrollada (mm), LAI es el área follor y LAI_{mx} es el área follor máxima para la planta.

2.2.5 Erosión

SWAT estima la producción de erosión y sedimento por cada unidad de respuesta hidrológica, a través del método de MUSLE, que se utiliza para modelar la producción de erosión y sedimento.

$$sed = 11.8 \left(Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru} \right)^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad 17$$

Donde sed es la cantidad de producción de sedimentos (tn), Q_{surf} cantidad de la escurrimiento (mm), q_{peak} es la escurrimiento máxima (mm), $area_{hru}$ áreas de respuesta

hidrológica, K_{USLE} es el factor de erodabilidad del suelo, LS_{USLE} factor de la topografía y CFRG es el factor de fragmento macro.

2.2.6 Calibración y Validación

La finalidad de la calibración es que los valores simulados logren un ajuste satisfactorio en comparación con los valores observados cuando se modifique los valores en los parámetros de mayor influencia en la simulación.

Los hidrogramas como resultado del modelo visualmente pueden ser comparados, sin embargo, hay que considerar la existencia de parámetros estadísticos que ayudan en la calibración del modelo, dentro de la hidrología los que se utilizan son: coeficiente de correlación de Pearson (r), la eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE), el error cuadrático medio (RMS) y la desviación que presentan los volúmenes de la escorrentía (DV):

Coeficiente de correlación de Pearson (r):

$$r = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}}) (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum_{t=1}^n (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}} \quad 18$$

Donde Q_{obs} es el caudal observado, $\overline{Q_{obs}}$ es el caudal medio observado, Q_{sim} es el caudal simulado y $\overline{Q_{sim}}$ es el caudal medio simulado y n es el número de datos.

El parámetro de eficiencia de Nash y Sutcliffe

Es un parámetro aceptado en hidrología para analizar la eficiencia de los modelos hidrológicos, mantiene un sentido similar que el r^2 , mientras los valores se acercan a uno

(1), el modelo es de mejor calidad, pero un valor de 0.50 manifiesta un modelo satisfactorio.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad 19$$

Donde Q_{obs} es el caudal observado, $\overline{Q_{obs}}$ es el caudal medio observado, Q_{sim} es el caudal simulado y $\overline{Q_{sim}}$ es el caudal medio simulado y n es el número de datos.

El error cuadrático medio RMS (Hogue et al., 2006)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2} \quad 20$$

Donde Q_{obs} es el caudal observado, Q_{sim} es el caudal simulado y n el número de datos.

La desviación del volumen de la escorrentía DV

$$DV = \frac{\sum_{t=1}^n Q_{sim}}{\sum_{t=1}^n Q_{obs}} \quad 21$$

Donde Q_{obs} es el caudal observado, Q_{sim} es el caudal simulado y n el número de datos.

Para la calibración de los modelos hidrológicos, el uso de r y NSE deben ser optimizados y con el parámetro RMS y DV sus valores deben acercarse a 1, la calibración y la validación permiten reducir el grado de incertidumbre en las simulaciones. El modelo SWAT se recomienda realizar un análisis de la sensibilidad de los parámetros para identificar cuáles son los que tienen mayor influencia en el modelo, así evitar dificultad en el proceso de calibración.

2.3 Sistemas de información geográfica

Los sistemas de información geográfica parten de un término que ha sido empleado en una amplia área de disciplinas, como un sistema hace referencia a la parte manual y automática que requiere de personal y maquinas que mediante métodos, organizan, agrupan, procesan y transmiten información para los usuarios(Cotos Yañez & Taboada Gonzalez, 2011).

Los sistemas de información geográfica se componen de etapas que sirven para la toma de decisiones, la información procesada es representada mediante mapas temáticos, cuya finalidad es ayudar a la gestión y la planificación de problemas complejos(Feliu Torrent, 2013). Los componentes principales para el funcionamiento de los sistemas de información geográfica son los que se muestran a continuación:



Figura 5 Componentes de los sistemas de información geográfica

Fuente: Elaboración propia

El hardware se refiere a los equipos físicos tecnológicos, computadoras portátiles o de mesa que se encuentran disponibles en el mercado y que requieren poseer una capacidad gráfica para el procesamiento de datos. El software hace referencia a los programas que requieren ser instalados en las computadoras, son las herramientas que proveen al usuario la capacidad de procesar bases de datos, es la interfaz de interacción del usuario.

Recurso humano u operador, depende de las habilidades y los conocimientos que tenga sobre el funcionamiento de los sistemas de información geográfica, los resultados dependerán del conocimiento del usuario. Los procesos, son métodos que son aplicados para satisfacer las necesidades del usuario, cada método dependerá de la finalidad que a la que se quiera llegar. De acuerdo con la procedencia de los datos estos pueden tener características particulares, pueden ser ráster o vectorial.

2.3.1 Sistemas de Información Geográfica y modelos hidrológicos

Los intereses que comparten los sistemas de información geográfica y la hidrología han permitido incrementar esfuerzos para el desarrollo de herramientas que permiten la representación espacial de las redes de drenaje (Villacrés, 2015). Los sistemas de información geográfica permiten la gestión y el análisis espacial de información, además se puede integrar información topográfica, edafológica, uso de suelo, climática y simular escenarios pasados y futuros (Galván, 2011).

Las limitantes espaciales que presentan los modelos que han sido representados a través de ecuaciones numéricas, ha permitido que los sistemas de información geográfica combinen sus técnicas para la realización de un sin número de operaciones, posibilitando a los investigadores conseguir resultados con menor esfuerzo, sin descuidar la propiedad más importante de los modelos hidrológicos la representación de las variaciones temporales y espaciales de los parámetros de entrada y salida (Galván, 2011).

3 METODOLOGÍA

3.1 Región de estudio

3.1.1 Cuenca del Río Guayas

La cuenca del río Guayas se localiza en la región Costa del Ecuador, específicamente en la zona centro-occidental del territorio nacional. Esta importante cuenca está integrada por los ríos Daule y Babahoyo, los cuales, tras recorrer sus respectivos cauces, se unen en las proximidades del cantón Samborondón; a partir de esta confluencia nace el río Guayas, que finalmente vierte sus aguas en el océano Pacífico, justo frente a la Isla Puná (Tapia, 2012).

Con una superficie aproximada a los 53.299 km², esta cuenca representa la mayor red hidrográfica de toda la costa pacífica de Sudamérica y se reconoce, además, como la principal arteria de recursos hídricos del Ecuador. Su vasta extensión comprende territorios de varias provincias, entre ellas Guayas, Los Ríos, Bolívar, Chimborazo, Cotopaxi, Manabí y Santo Domingo de los Tsáchilas (Tapia, 2012).

Según los datos del censo de 2010, en el área de la cuenca habitaban aproximadamente 6,55 millones de personas, cifra que equivale a una fracción considerable de la población total del país. Dentro de este territorio, la ciudad de Guayaquil se destaca como el núcleo urbano más relevante, ya que concentra la mayor parte de la dinámica económica y social de toda la región (Hurtado, 2012).

La cuenca tiene marcados sus contrastes sociales, por un lado, se encuentran comunidades rurales dedicadas principalmente a la agricultura, la ganadería y la pesca artesanal, por otro lado, áreas urbanas que cuentan con mejor infraestructura, así como de mayores oportunidades educativas y de servicios básicos, esta diferencia de condiciones provoca brechas sociales notorias, que a su vez impulsan procesos de desigualdad (Chacón, 2021).

La cuenca constituye el principal motor agrícola del Ecuador, sus suelos fértiles de origen aluvial favorecen la siembra de productos de exportación como banano, cacao, arroz y caña de azúcar. A ello se añaden cultivos de ciclo corto y una variada producción destinada al consumo interno, lo que consolida a esta región como el mayor abastecedor de alimentos y una fuente clave de divisas agropecuarias para el país (Salazar, 2000).

En el aspecto ambiental, la cuenca afronta desafíos significativos, entre ellos la deforestación, la erosión de los suelos, la contaminación del agua por el uso de agroquímicos y las descargas provenientes de zonas urbanas, además de una creciente presión sobre ecosistemas estratégicos (Chacón, C, 2021).

La cuenca se caracteriza por un ambiente tropical húmedo en las áreas bajas, mientras que en las estribaciones andinas predominan precipitaciones de origen orográfico. En varios sectores, los registros de lluvia superan los 2.000 mm anuales, una condición que, si bien favorece la productividad agrícola, también incrementa el riesgo de inundaciones frecuentes (Tapia, 2012).

3.1.2 Subcuenca del Río Vinces

La cuenca del Río Vinces, constituye una unidad hidrográfica que forma parte de la cuenca principal del río Guayas, ubicada mayormente en la provincia de Los Ríos, aunque también abarca sectores de Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi. Desde el punto de vista geográfico, sus límites se extienden aproximadamente entre los paralelos 0°14'S y 2°27'S, y los meridianos 78°36'O y 80°36'O. Esta subcuenca comprende áreas alta, media y baja, lo que influye directamente en su topografía, régimen hidrológico, uso del suelo y dinámica productiva (Universidad Nacional del Sur, 2022).

Respecto a la población y los asentamientos, los cantones más relevantes de la subcuenca son Vinces, Mocache y Quevedo, siendo estos dos últimos los que presentan mayor densidad poblacional y una infraestructura más desarrollada vinculada al comercio agrícola. Las actividades agrícolas intensivas, especialmente los monocultivos destinados a la exportación como banano, cacao y arroz, predominan en las zonas media y baja de la subcuenca, en contraste, las áreas altas mantienen usos menos intensivos, con presencia de vegetación de ribera y cultivos a menor escala (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Mocache, 2020).

La red hidrográfica de la subcuenca del Vinces está formada por numerosos ríos tributarios y microcuencas, entre los que destacan el río Lulo Grande, Lulo Chico, Manguila, estero Valencia, río Las Saibas, estero Peñafiel y río Pise, junto con otros drenajes de menor tamaño. Todas estas corrientes confluyen en el cauce principal del río

Vinces, que a su vez desemboca en ríos de mayor magnitud dentro del sistema Guayas, aportando de manera significativa al caudal estuarino del río Babahoyo y conformando, en conjunto, una red hidrográfica interconectada que sustenta tanto la dinámica hídrica como las actividades productivas de la región (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Vinces., 2020).

En términos climáticos e hidrológicos, la subcuenca Vinces muestra un régimen de precipitaciones característico de la región litoral, con lluvias concentradas en determinados meses y una estación seca claramente definida. Por lo tanto, la disponibilidad de agua superficial depende directamente de estos niveles de precipitación, aunque la prolongación de la temporada seca impone limitaciones importantes para la implementación de sistemas de abastecimiento de agua (Muñoz et al., 2020).

3.2 Desarrollo del modelo hidrológico SWAT

La herramienta para la evaluación del suelo y agua (*SWAT siglas en inglés*) es un modelo hidrológico de base física y semi distribuido que permite analizar y predecir los procesos hidrológicos en cuencas de gran extensión, enfocándose especialmente en la generación de caudales a diferentes escalas temporales.

El modelo hidrológico SWAT se emplea de manera extendida para proyectar cómo los escenarios futuros afectan la disponibilidad de agua, los escenarios climáticos se ajustan mediante técnicas de downscaling, para generar proyecciones de precipitación y temperatura bajo distintas trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero,

cuyos datos se introducen en SWAT con el fin de simular los posibles cambios en el régimen de caudales a futuro (Yeste et al., 2024).

SWAT simula el ciclo hidrológico bajo la ecuación de balance hídrico propuesta por (S. L. Neitsch et al., 2011a)

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad 23$$

Donde:

SW_t = Contenido final del agua en el suelo (mm), SW_0 = Contenido de agua inicial en el día i (mm) en el tiempo (día), R_{day} = Cantidad de precipitación en el día i (mm), Q_{surf} = Escorrentía superficial en el día i (mm), E_a = Evapotranspiración en el día i (mm), W_{seep} = Cantidad de agua que entra en la zona no saturada del perfil en el suelo en el día i (mm) y Q_{gw} = Cantidad de flujo de retorno en el día i (mm).

La aplicación de SWAT bajo escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 permite de identificar variaciones en la magnitud, frecuencia y estacionalidad de los caudales, este tipo de proyecciones resulta fundamental para diseñar estrategias para la gestión integrada de la cuenca hidrográfica frente al cambio climático (Basso y Cammarano, 2023).

3.2.1 Datos de entrada

Para representar la diversidad espacial de la cuenca, el modelo divide la cuenca en subcuencas y luego en Unidades de Respuesta Hidrológica (*HRUs, por sus siglas en inglés*), que integran características del uso del suelo, tipo de suelo y pendiente del terreno, adicionando a esto la información climática como precipitaciones, temperatura, radiación

solar, humedad relativa y viento, permitiendo así simular de manera precisa el comportamiento hidrológico en distintas condiciones (Gassman et al., 2007).

Dentro de la información biofísica procesada se encuentra el modelo digital de elevación a una resolución de 30m del Servicio Geológico de los Estados Unidos (*USGS siglas en inglés*) el uso de suelo obtenido de la información geopedología a escala 1:25.000 del Ministerio de Agricultura y Ganadería (*MAG siglas en español*), el tipo de suelo de la Data Base del suelo armonizado de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (*FAO siglas en inglés*) a escala 1:5.000.000 y el polígono de la cuenca del Río Guayas y del río Vinces obtenido del Plan de Gestión Socio – Ambiental de la cuenca del Río Guayas y Península de Santa Elena, el procesamiento de la información se realizó a través de ArcMap.

Hay que mencionar que el archivo en formato shape del uso de suelo y del tipo de suelo, fueron homologada para la lectura SWAT, acorde a la bibliografía sobre las instrucciones de la misma página SWAT, además de comparar la clasificación con otros estudios similares ver Anexo 1 y Anexo 2.

La información climática fue proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (*INAMHI siglas en español*), se describe la obtención de la data de 31 estaciones meteorológicas, con una temporalidad media diaria para precipitación y, para temperatura 31 estaciones con el valor mínimo y máximo diario, con un rango de años desde 1981 – 2015. La información de los caudales medios diarios se obtuvo a través

del Ministerio del Ambiente y Transición Ecológica, de 12 estaciones con un rango de años desde 1980 – 2015.

Las proyecciones RCP 4.5 y 8.5 fueron proporcionadas por la Subsecretaría de Cambio Climático, estas últimas de igual forma de temporalidad diaria y de las mismas estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura, las mismas que fueron desarrolladas a través del CMIP5.

Tabla 2 Input data biofísica y climática para el modelo SWAT

Data biofísica	Descripción
DEM	Descargado del USGS a una escala de 30m de resolución
Uso de suelo y cobertura vegetal	Descargado del Geoportal del Agro Ecuatoriano del MAG a una escala de 25m
Tipo de suelo	Descargado de la plataforma de Suelos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) a una escala de 100 m
Data climática	Descripción
Lluvia	El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Inamhi) proporcionó información de precipitación media diaria de 31 estaciones meteorológicas que se encuentran dentro de la cuenca del Río Guayas, con años de inicio que van desde 1980 – 2015
Temperatura	El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Inamhi) proporcionó información de temperatura máxima y mínima diaria de

	31 estaciones meteorológicas que se encuentran dentro de la cuenca del Río Guayas, con años de inicio que van desde 1980 – 2015
Radiación solar	Estos datos debido a la inconsistencia que presentaron los datos proporcionados por el Inamhi se recurrieron a los datos de la base de climática que tiene la misma página de SWAT (https://swat.tamu.edu/data/), donde a través del dibujo de un polígono que encierra la cuenca de las guayas se procede a descargar los datos diarios de radiación solar, viento y humedad, con un rango de años de 1980 – 2015
Viento	
Humedad	
Caudales	La información media diaria de caudales fue proporcionada por Ministerio de Agua, Ambiente y Transición Ecológica, de 12 estaciones cuyo rango de años varía entre 1980 - 2015
Proyecciones RCP 4.5	La información proporcionada por la Subsecretaría de Cambio Climático del MAATE, con el protocolo de extracción de datos de pixel a 10kmx10km para la zona de estudio.

Fuente: Manual para el uso del modelo SWAT (SWAT, 2024)

3.2.2 Datos de salida

El horizonte del modelo hidrológico se limita al tiempo inicial y final de la data añadida, para el modelo la data presenta un tiempo inicial que va desde 1981 al 2015, lo cual da la facilidad de seleccionar años para adaptación o calentamiento, para la calibración y validación, como datos de salida se obtiene un archivo en formato Access donde se encuentran la simulación de caudales, sedimentos, nutrientes, calidad de agua,

evapotranspiración, entre otros. Para nuestro estudio es la producción de caudales con la unidad de medida de mm^3/seg .

3.3 Calibración del modelo hidrológico SWAT

Con programa SwatCup, se llevó a cabo la calibración con el algoritmo Ajuste de Incertidumbre Secuencias (*SUFI 2 siglas en ingles*), que es ampliamente utilizado por su integración de parámetros óptimos para la modelación hidrológica (Abbaspour et al., 2015). Este método utiliza muestreos estadísticos que ajustan los valores de los parámetros del modelo buscando un acercamiento a los valores satisfactorios para el coeficiente de eficiencia (*NSE*) y de determinación (R^2), además de reducir el sesgo (*Pbias*).

El algoritmo SUFI-2 busca reducir la incertidumbre de los procesos hidrológicos, tratando de asegurar que los valores observados se encuentren dentro de los rangos de los datos simulados, es ampliamente utilizado en procesos de calibración y validación, más aun en cuencas de región tropical y andina. Para la cuenca se destinó 4 años de calentamiento o adaptación, lo que implica que la data inicial de 1981 se suma 4 años, es decir el periodo de calibración inicia desde 1985 al 2005 con los siguientes parámetros:

Tabla 3 Parámetros de calibración para el modelo SWAT

Parámetro	Valor min	Valor Max
v__EPCO.hru	0.425715	1.277285
v__GWQMN.gw	-298.924225	3233.92432
v__ESCO.hru	0.210215	0.736785

v__CANMX.hru	-9.878468	63.378468
v__TIMP.bsn	0.401215	1.203785
v__SMFMX.bsn	-1.769616	12.744616
v__SMTMP.bsn	8.414304	25.245695
v__BIOMIX.mgt	-0.346284	0.551284
v__GWHT.gw	5.644297	16.935703
v__SURLAG.bsn	15.589015	26.768986
v__SMFMN.bsn	-0.981768	13.006768
v__SHALLST.gw	249.085968	547.314087
v__GW_DELAY.gw	160.085983	386.71402
v__GW_REVAP.gw	0.097619	0.252881
v__REVAPMN.gw	201.285782	403.914246
v__SFTMP.bsn	-7.551822	17.351822
v__DEEPST.gw	1798.43396	7266.56592
v__RCHRG_DP.gw	0.336715	1.010285
r__CN2.mgt	23.14253	54.382469
v__CH_K2.rte	90.225372	363.424591
v__CH_N2.rte	0.281968	0.826042
v__TLAPS.sub	-9.30787	-3.10213
v__GW_SPYLD.gw	-0.054514	0.248514

v__ALPHA_BF.gw

-7.399281

7.534281

Fuente: Elaboración propia

3.4 Validación del modelo hidrológico SWAT

Este proceso se construye después de la calibración, su propósito es el de verificar la capacidad predictiva del modelo versus los datos observados, este paso precisa de aquellos parámetros con los valores que mejor se han ajustado, para el periodo de 2006 – 2012, donde de igual forma se comparan los valores resultantes del coeficiente de eficiencia (NSE) y de determinación (R^2) y el sesgo ($Pbias$), con una validación robusta y con valores aceptables indica que el modelo no solo es capaz de ajustarse a los parámetros calibrados sino a las condiciones climáticas.

Una validación aceptable indica que el modelo es aplicable para estudios de cambio climático, producción de sedimentos, calidad de agua, ciclo de nutrientes, cambios de uso de suelo, entre otros (Arnold et al., 2013).

3.5 Aplicación de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5

Para el Ecuador, en el marco del escenario RCP 4.5, se prevé un incremento moderado de la temperatura promedio, lo que derivaría en un aumento de la evapotranspiración y, por ende, en una menor disponibilidad de agua en ciertas cuencas, especialmente aquellas ubicadas en zonas costeras y de transición. Asimismo, los patrones de precipitación podrían mostrar cambios estacionales: mientras algunas regiones enfrentarían reducciones de lluvia durante la estación seca, en la temporada húmeda

podrían presentarse episodios de precipitaciones intensas (Universidad Politécnica de Cartagena, 2021).

Bajo el escenario RCP 8.5, se anticipan impactos mucho más intensos, incluyendo incrementos significativos de temperatura, aumento de la evaporación y alteraciones en los patrones de precipitación, caracterizadas por eventos extremos más frecuentes, concentraciones de lluvias intensas en pocos días y períodos prolongados de sequía.

Los sectores más vulnerables a estos cambios serían la agricultura de riego, el abastecimiento de agua urbana y la generación hidroeléctrica, de hecho, estudios realizados en cuencas costeras de Ecuador sugieren que, bajo este escenario, aunque la precipitación podría aumentar en ciertos periodos húmedos, la disponibilidad neta de agua disminuiría debido al mayor consumo atmosférico y a la pérdida de eficiencia en el uso del suelo (Universidad Politécnica de Cartagena, 2021).

3.5.1 aplicación de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 en el modelo hidrológico

La Subsecretaría de Cambio Climático proporcionó la información sobre las proyecciones RCP, en un archivo que contiene datos cartográficos, datos meteorológicos y una ficha técnica en donde explica como extraer las proyecciones, donde:

- La ficha técnica provee información sobre las proyecciones climáticas y las necesidades por parte del estado ecuatoriano en concordancia con el informe AR5 para desarrollar las proyecciones, ver anexo Anexo 3.

- Dentro de los años de las proyecciones contempla información histórica que va desde 1981 al 2015 y, respectivamente para las proyecciones RCP 4.5 y 8.5 los años van desde 2011 al 2070, dentro de la información de las proyecciones se encuentra la precipitación media diaria, temperatura máxima, media y mínima.
- La información cartográfica contempla una grilla de 10km x 10 km que cubre el Ecuador continental, del cual, a través de la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el modelo, se identifica el ID de la grilla que se encuentra dentro de los límites de las estaciones y se busca en la carpeta los archivos correspondientes del ID, ver Anexo 4.
- La información de descarga y se ajusta según el formato de lectura de SWAT (día/mes/año) en otro Excel para luego ser guardado en formato delimitado por comas csv.
- Los datos extraídos son añadidos al modelo calibrado y validado, en la base de datos del clima, donde los datos de las proyecciones (RCP 4.5 y 8.5 – años 2015 - 2070) remplazan a los datos utilizados en el modelo (históricos 1981 – 2015), para las variables de precipitación y temperatura, que son los únicos parámetros que se cuenta en las proyecciones.
- Dentro del panel de configuración del modelo hidrológico SWAT, específicamente en el apartado del clima, se ingresa las proyecciones de

cambio climático, tanto para la variable de precipitación y temperatura, se rescribe las tablas pero con estos datos, posterior a esto se configura el modelo seleccionando la subcuenca en la que se va a trabajar, para este caso la subcuenca N°1, se colocan los parámetros de sensibilidad con sus respectivos valores, se configura la simulación para los tamos de años que hayamos establecido, se guarda la corrida y se procesa la información, la misma que será presentada en hidrogramas y análisis de los porcentajes de variación de los escenarios RCP 4.5 y 8.5.

- Una vez obtenido las salidas con ambos escenarios se selecciona las subcuentas con las que se trabajará con la finalidad de tener una mayor apreciación de la variación presente.
- Los datos de caudales son copiados de las salidas (archivo formato Access), RCP 4.5 (2013 – 2030; 2030 – 2050; 2050 – 2070) y RCP 8.5 (2013 – 2030; 2030 – 2050; 2050 – 2070).
- Los datos son procesados en R estudio donde se realiza un análisis exploratorio hidrológico.

3.6 Medidas para el plan modelo para la gestión integrada de la cuenca

Para las medidas para la gestión integrada hacemos referencia al método de Umbrella Review, a través de los motores de búsqueda académicos como; Google escolar, The Science Direct, Mendeley, Scielo, Scopus, repositorios de tesis, entre otros, se

establecen criterios de búsqueda y selección, con la finalidad de que la información contenida en las medidas sea aplicables para el contexto, la búsqueda se la efectúa con palabras claves del tema investigativo, se seleccionan los documentos y se los aparta según el año, de estos se filtra aquellos cuyos resultados sean comprobables y se asemejen a contextos parecidos.

Para demostrar en síntesis el desarrollo de la metodología se explica en la siguiente Figura 6:

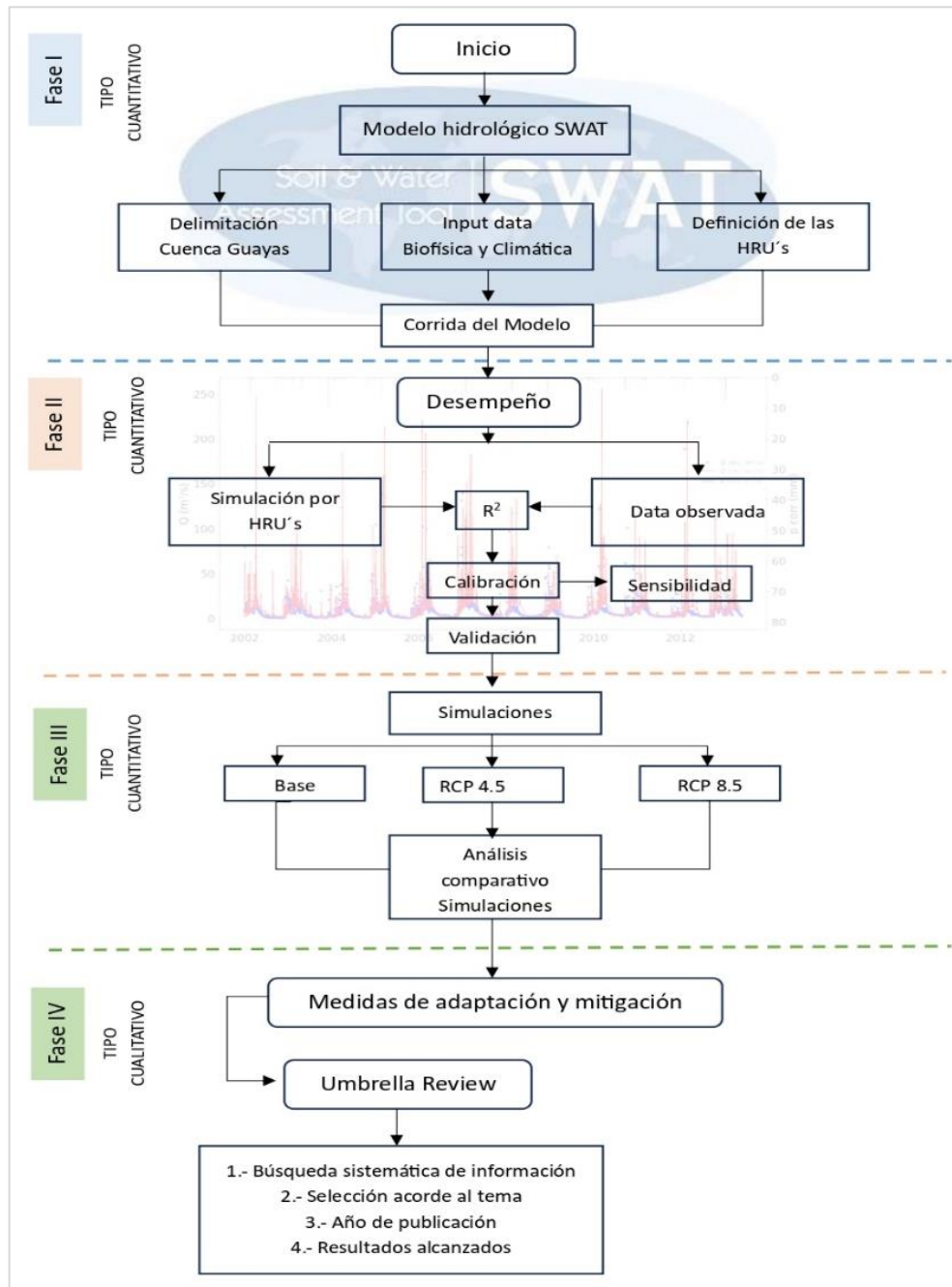


Figura 6 Flujograma de la metodología empleada

Fuente: Elaboración propia

4 RESULTADOS

4.1 Resultados del modelo hidrológico SWAT

El modelo hidrológico para la cuenca fue desarrollado en ArcMap 10.5 la información de entrada fue la siguiente:

Tabla 4 Input data biofísica y climática para el modelo SWAT

	Descripción	Escala	Fuente
Biofísica	Modelo digital de elevación	1:30	Servicio Geológico de los Estados Unidos
	Uso y cobertura de suelo	1:25	Sistema de Información Público Agropecuario
	Tipo de suelo	1:00	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación
Clima		31 estaciones	
	Precipitación	Temporalidad diaria (1981- 2015)	INAMHI
	Temperatura	Temporalidad diaria (1981- 2015)	INAMHI
		Área de estudio	
	Radiación solar	Temporalidad diaria (1981- 2015)	SWAT Tamu

Área de estudio		
Viento	Temporalidad diaria	SWAT Tamu
	(1981- 2015)	
Área de estudio		
Humedad	Temporalidad diaria	SWAT Tamu
	(1981- 2015)	

Fuente: Elaboración propia

El desarrollo del modelo contempla información biofísica como el modelo digital de elevación, la cartografía de uso y cobertura vegetal, el tipo de suelo y, dentro de la información climática la obligatoria es la precipitación y temperatura de temporalidad diaria para mejorar la precisión del modelo (Jodar-Abellan et al., 2018).

Se delimito 29 subcuencas, además una red de drenaje que conduce hacia la desembocadura del río Guayas, este paso es importante porque se define espacialmente la dinámica hidrológica, delimitando las rutas de la red de drenaje, flujos, distribuciones y cargas, este proceso se fundamenta en el modelo digital de elevación a 30 metros, según (S. L. Neitsch et al., 2011c) este paso facilita la representación hidrológica y su simulación a diferentes escalas, ver anexos MAPA 1.

El uso de suelo cobertura vegetal a una escala de 25m para la cuenca del Guayas, permite representar la relación entre la superficie terrestre y el ciclo hidrológico, según (Arnold et al., 2013) es importante caracterizar correctamente ya que una mayor precisión

permite simular de mejor forma la influencia de la ocupación del suelo en la producción del agua ver Anexos MAPA2.

Con el tipo de suelo a escala 100m, este parámetro físico es aquel que controla la capacidad de almacenamiento, infiltración, percolación, nutrientes, lo que influye directamente en el transporte del agua ver Anexo MAPA 3.

La clasificación de la pendiente a través del modelo digital de elevación a 30m dentro de la definición de las unidades de respuesta hidrológica es indispensable ya que esta determina la velocidad de la infiltración y escurrimiento ver Anexo MAPA 4

Resultaron 29 subcuencas y 2109 unidades de respuesta hidrológica con un thresholds de 1% para el uso de suelo, 1% para tipo de suelo y 1% para pendiente, para el presente estudio de toda la extensión de la cuenca el río Guayas se seleccionó la subcuenca del río Vinces.

4.2 Resultados de la calibración

Se realizó la primera simulación que corresponde al periodo de calibración de 1985 al 2005, sin olvidar 4 años de calentamiento previo o adaptación, resultado de aquello tenemos la siguiente gráfica.

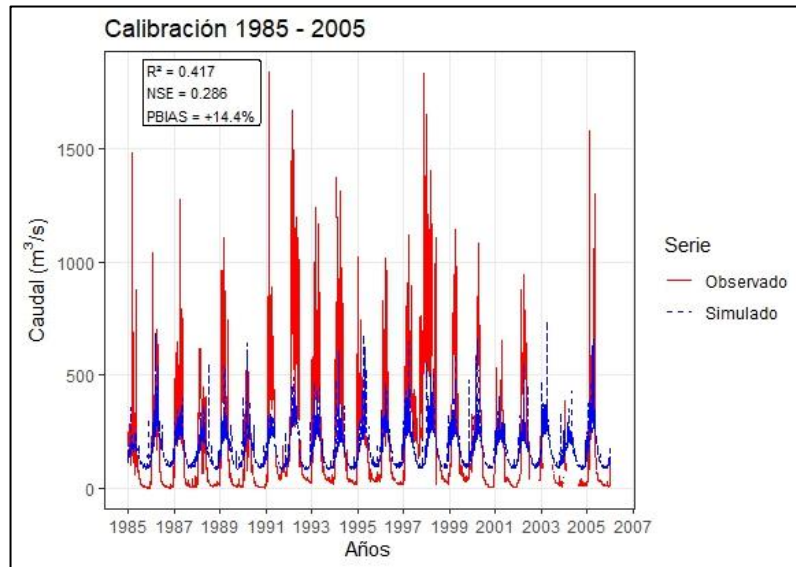


Figura 7 Gráfico del periodo de calibración

Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y discusión.

La figura 7, indica claramente con un valor de $R^2 = 0.417$, que los caudales simulados versus los observados tienen una aligera relación, el valor de eficiencia $NSE = 0.286$ indica un bajo desempeño del modelo y (Moriasi et al., 2007) manifiesta que los valores cercanos a 1 indican un buen desempeño del modelo. El valor de $Pbias = +14.4\%$ representa a una sobrestimación en la producción de caudales.

Autores como (Abbaspour et al., 2017) mencionan que es normal que en la calibración los valores de las métricas como R^2 , NSE y $Pbias$, resulten con valores menos

de los aceptables, ya que es en esta parte que se identificara aquellos parámetros que previo ajusten mejoran el rendimiento del modelo.

4.3 Resultados validación

Una vez calibrado el modelo, se procede a modificar acorde a los valores ajustados, cada uno de los parámetros dentro de la configuración del modelo SWAT, para el presente caso los valores ajustados fueron:

Tabla 5 Parámetros de validación para el modelo SWAT

Parámetro	Valor
v__EPCO.hru	0.489583
v__GWQMN.gw	142.68184
v__ESCO.hru	0.618307
v__CANMX.hru	43.232811
v__TIMP.bsn	0.501536
v__SMFMX.bsn	5.124644
v__SMTMP.bsn	19.775492
v__BIOMIX.mgt	-0.18921
v__GWHT.gw	13.830566
v__SURLAG.bsn	25.930489
v__SMFMN.bsn	12.657055
v__SHALLST.gw	301.27588

v__GW_DELAY.gw	313.05991
v__GW_REVAP.gw	0.140316
v__REVAPMN.gw	257.00861
v__SFTMP.bsn	14.238866
v__DEEPST.gw	2208.5439
v__RCHRG_DP.gw	0.589304
r__CN2.mgt	39.543499
v__CH_K2.rte	110.71532
v__CH_N2.rte	0.622014
v__TLAPS.sub	-3.56756
v__GW_SPYLD.gw	0.089424
v__ALPHA_BF.gw	2.680873

Fuente: Elaboración propia

Con los valores que muestra la Tabla 3 se realizó la nueva simulación para los años 2006 – 2012, se escogió esta cantidad de años ya que para el periodo de calibración se sugiere que se concentre la mayor parte de los datos, ya que es en este proceso donde el modelo ajustará los parámetros con la finalidad de que la simulación se encuentre próxima a la observada.

Como resultado se obtuvo de la calibración la siguiente figura:

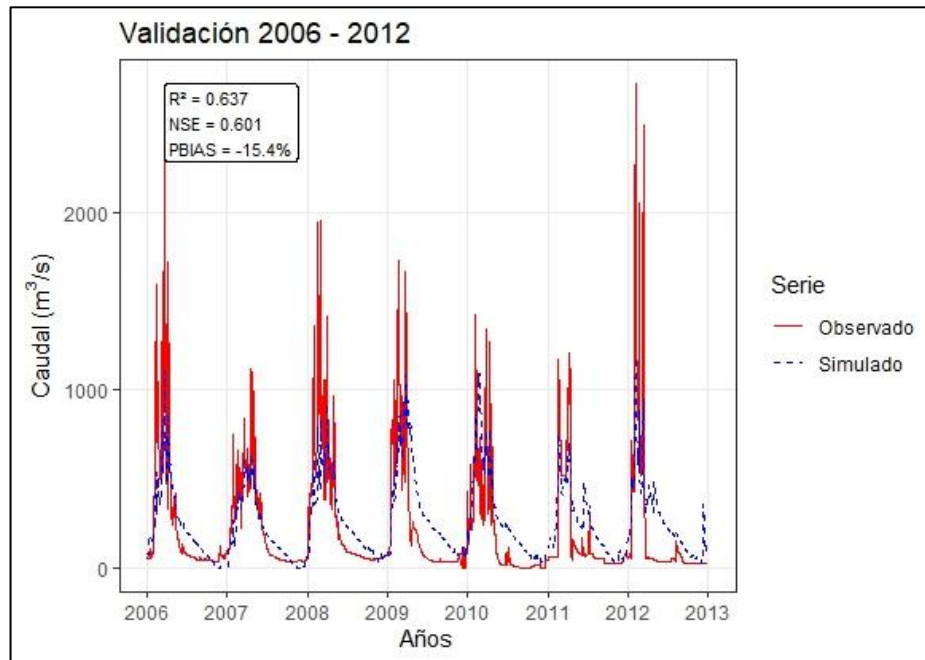


Figura 8 Gráfico del periodo de validación

Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y discusión.

De los años de calibración (2006 - 2012), resultó con un valor $R^2 = 0.63$ lo que quiere decir una correlación moderada entre los caudales observados y simulados, el valor de eficiencia del modelo $NSE = 0.601$ indica que es aceptable el desempeño del modelo y según (Moriasi et al., 2007) los valores en NSE que superan el valor 0.5 son aceptables dentro de las modelaciones hidrológicas, sin embargo, el valor de $Pbias = -15.4\%$ implica que, a pesar de la correlación y el desempeño, el modelo tiende a sobreestimar los caudales simulados versus los observados.

Por otro en la Figura 8 se aprecia una estacionalidad tanto para los observados como los simulados, que mantienen su ascenso en época seca y su descenso en época lluviosa asociándose a la variabilidad climática, lo que refleja que el modelo simula adecuadamente la estacionalidad hidrológica aun conociendo que el valor Pbias indica que sobre estima la simulación del caudal.

En sustentación con (Moriasi et al., 2007), los valores obtenidos en la validación, son considerados aceptables, con posibilidad a mejorar a través de calibraciones multi objetivos, por otro lado (Abbaspour et al., 2015) refiere que los valores negativos en Pbias, suelen ocurrir debido a la presencia de valores atípicos en precipitación, con los valores de NSE superiores a 0.5 (Arnold et al., 2013) manifiesta que el modelo es útil para la gestión integrada a nivel de cuenca hidrográfica.

4.4 Resultados de los escenarios

Una vez validado el modelo con los valores que se encuentran dentro del rango de aceptable, se procede a insertar los respectivos valores que corresponden a los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5, con esto se configura el modelo para simular nuevos caudales para el rango de años del 2013 – 2030, 2031 – 2050 y 2050 – 2070, para cada escenario.

4.4.1 Escenario RCP 4.5

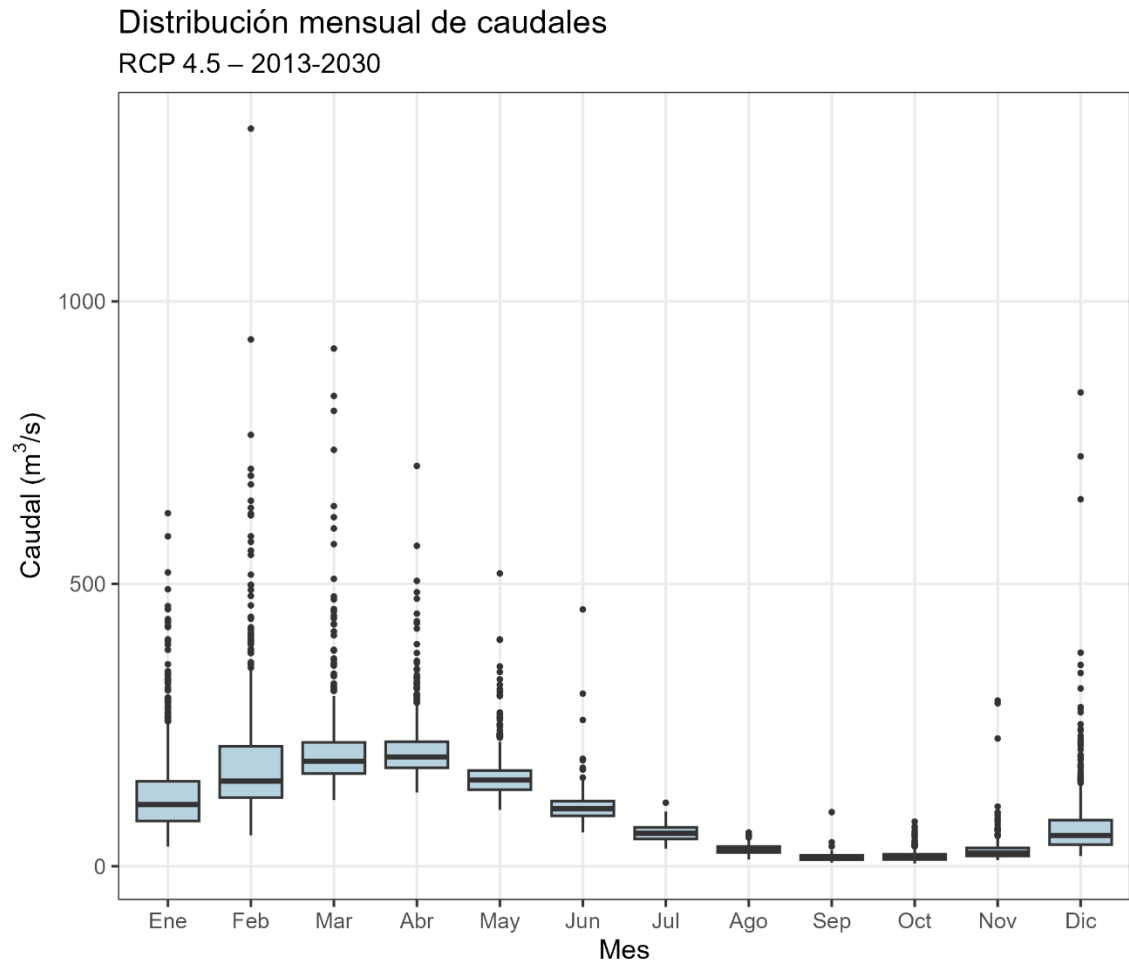


Figura 9 Distribución mensual de caudales – RCP 4.5 (2013 – 2030)

Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y discusión

El gráfico ilustra la distribución mensual de los caudales simulados bajo el escenario RCP 4.5 para el periodo comprendido entre 2013 y 2030, revelando una

estacionalidad claramente definida, en donde los mayores caudales se concentran en los primeros meses del año (enero–abril), coincidiendo con la temporada de lluvias en la cuenca del río Vinges, mientras que los valores más bajos se registran entre julio y octubre, correspondientes a la estación seca o de estiaje. Este patrón evidencia la fuerte dependencia del régimen fluvial respecto a la variabilidad climática estacional.

Asimismo, se destaca que durante los meses húmedos la amplitud de variación es considerable, como lo demuestran la presencia de valores extremos, mientras que en los meses secos los caudales tienden a reducirse de manera significativa, acercándose a niveles mínimos. Esta dinámica sugiere, por tanto, una notable vulnerabilidad del sistema frente a episodios de sequía temporal, subrayando la importancia de considerar estas fluctuaciones para la gestión hídrica y la planificación de recursos en la región.

Estos resultados concuerdan con hallazgos recientes que evidencian cómo el cambio climático acentúa los contrastes estacionales en cuencas tropicales. En particular, Ballesteros et al. (2020) señalan que los escenarios de forzamiento intermedio, como el RCP 4.5, tienden a incrementar la variabilidad de los caudales, mostrando una mayor dispersión durante los meses de lluvias y una reducción más marcada en la época seca.

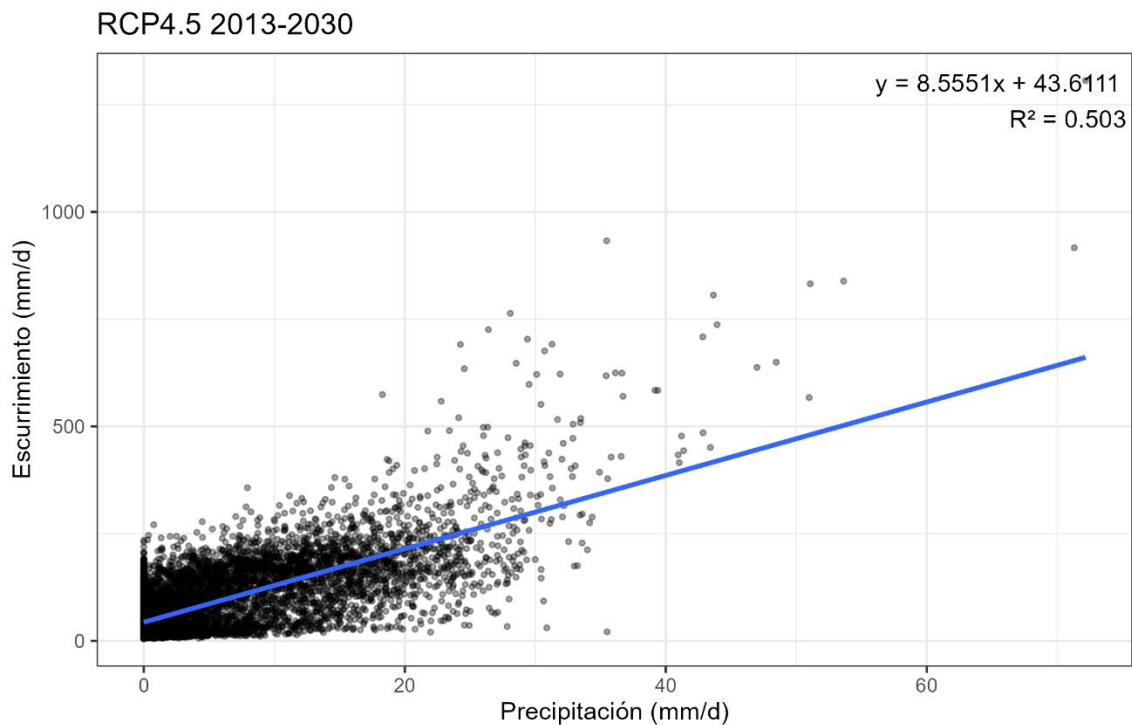


Figura 10 Precipitación vs escurrimiento – RCP 4.5 (2013 – 2030)

Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y discusión

La imagen presenta la relación entre la precipitación diaria y el escurrimiento en la cuenca del río Guayas bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5, cuyos puntos de datos indican que, a medida que aumenta la precipitación, también lo hace el escurrimiento, sin embargo, la dispersión de los puntos sugiere que esta relación no es completamente lineal, ya que existen otros factores que influyen en el escurrimiento. Según la ecuación de la línea de regresión, por cada aumento de 1 mm/día en la precipitación, el escurrimiento incrementa en promedio 8.55 mm/día. El valor de

$R^2=0.503$ muestra que alrededor del 50% de la variabilidad en el escurrimiento puede ser explicada por la cantidad de precipitación, pero esto deja claro que hay otros elementos, como la topografía o el uso del suelo, que también afectan los caudales.

Este análisis resulta fundamental para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Guayas, ya que proporciona información sobre cómo las lluvias pueden influir en los caudales, lo cual es crucial en el contexto de los cambios climáticos proyectados, de esta forma, permite anticipar posibles escenarios de inundaciones o sequías y facilita el diseño de estrategias de manejo del agua más efectivas. Además, este tipo de datos es esencial para mejorar los modelos hidrológicos, teniendo en cuenta no solo la cantidad de precipitación, sino también otros factores determinantes, como la vegetación, el tipo de suelo y la evaporación, que pueden influir significativamente en el comportamiento del escurrimiento.

El comportamiento identificado es consistente con lo señalado en investigaciones previas realizadas en cuencas tropicales. En este sentido, Hanlin et al. (2021) evidencian que, en modelos hidrológicos como el SWAT, la relación entre precipitación y escurrimiento mantiene una marcada respuesta lineal bajo escenarios de cambio climático, lo que incrementa la probabilidad de crecidas asociadas a eventos de precipitación intensa.

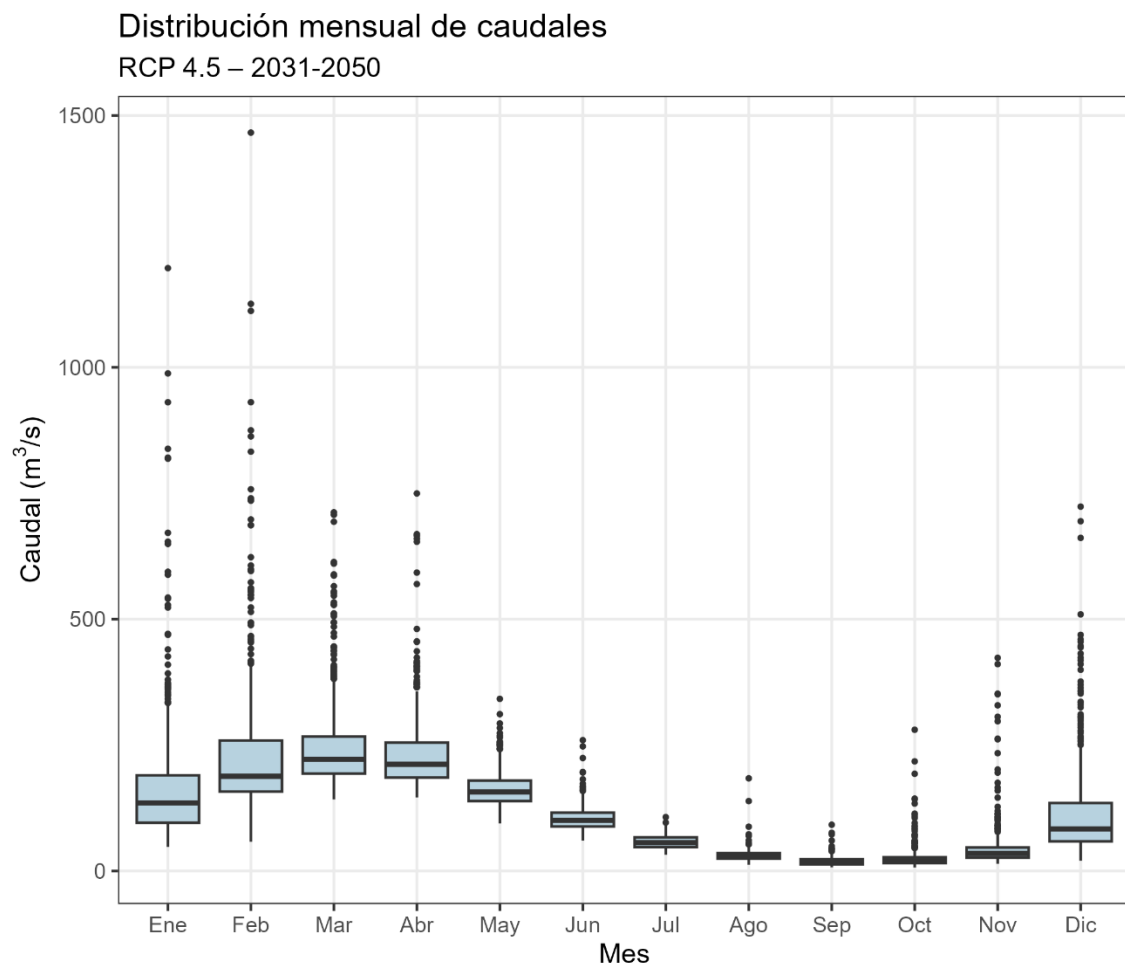


Figura 11 Distribución mensual de caudales – RCP 4.5 (2031 – 2050)

Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y discusión

El gráfico muestra la distribución mensual de los caudales proyectados para el horizonte 2031–2050 bajo el escenario RCP 4.5. En términos generales, se mantiene un comportamiento semejante al observado en el periodo anterior (2013–2030), con valores máximos concentrados entre enero y abril, coincidiendo con la temporada lluviosa, y

reducciones notorias entre julio y octubre, correspondientes al estiaje. No obstante, en este nuevo horizonte se distinguen medianas más elevadas y una mayor dispersión durante los meses húmedos, lo que sugiere un incremento en la magnitud y variabilidad de las crecidas.

Desde una perspectiva hidrológica, este comportamiento evidencia una intensificación de los extremos: por un lado, los picos de caudal se vuelven más frecuentes e intensos en la época de lluvias; por otro, los caudales mínimos permanecen bajos durante la estación seca. En conjunto, esta dinámica pone de manifiesto una vulnerabilidad dual de la cuenca, ya que se enfrenta simultáneamente a riesgos de inundación en los meses húmedos y de sequía en los meses secos.

Los resultados obtenidos coinciden con evidencias reportadas en estudios recientes, los cuales advierten una intensificación progresiva de la variabilidad hidrológica en escenarios de cambio climático. En particular, Zhiña et al. (2019) señalan que, en cuencas andinas y tropicales, las modificaciones en el régimen de precipitaciones tienden a concentrar mayores volúmenes de caudal durante la temporada lluviosa, al tiempo que profundizan la reducción crítica de los caudales en los periodos de estiaje.

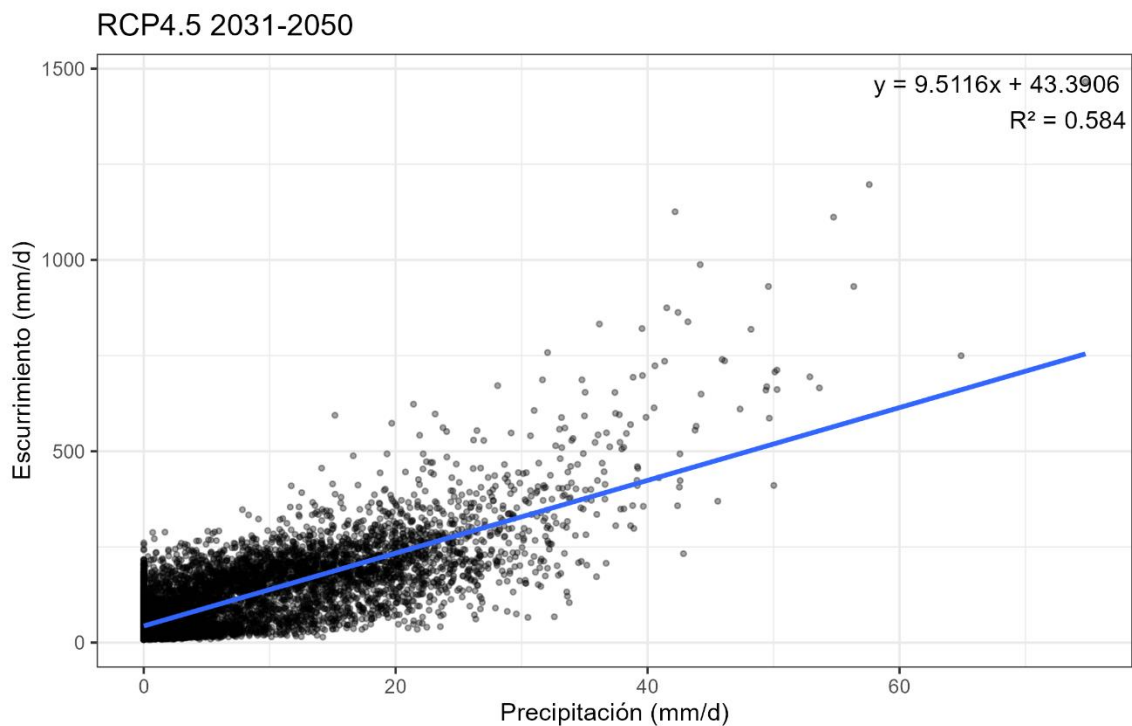


Figura 12 Precipitación vs escurrimiento – RCP 4.5 (2031 – 2050)

Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y discusión

El gráfico muestra cómo varía el escurrimiento en función de la precipitación bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5 para el periodo 2031-2050. Al observar la tendencia, se nota que a medida que la precipitación aumenta, también lo hace el escurrimiento, como lo refleja la línea de regresión. Esta relación es moderadamente fuerte, con un coeficiente de determinación de 0.584, lo que significa que poco más de la

mitad de la variabilidad del escurrimiento puede ser explicada por la precipitación, aunque sigue existiendo un margen de factores no capturados por la regresión.

Este análisis es fundamental para el modelo hidrológico de la cuenca del río Guayas, particularmente en la subcuenca del río Vines. Los datos obtenidos permiten entender cómo los caudales podrían comportarse frente a diferentes proyecciones climáticas, lo que resulta esencial para la gestión futura de los recursos hídricos. A partir de estos resultados, se pueden tomar decisiones más informadas sobre cómo enfrentar los desafíos de sequías e inundaciones, promoviendo una gestión eficiente y sostenible del agua en la región.

Estos hallazgos son consistentes con lo reportado por Li et al. (2023) en donde utilizaron el modelo SWAT para simular cómo el escurrimiento en la cuenca del río Yi Luo podría responder a escenarios de cambio climático en el futuro. Sus hallazgos señalaron que las fluctuaciones en las temperaturas máximas y mínimas tienen un impacto considerable en el escurrimiento, lo que resalta la necesidad de tener en cuenta estos factores al gestionar los recursos hídricos frente al cambio climático.

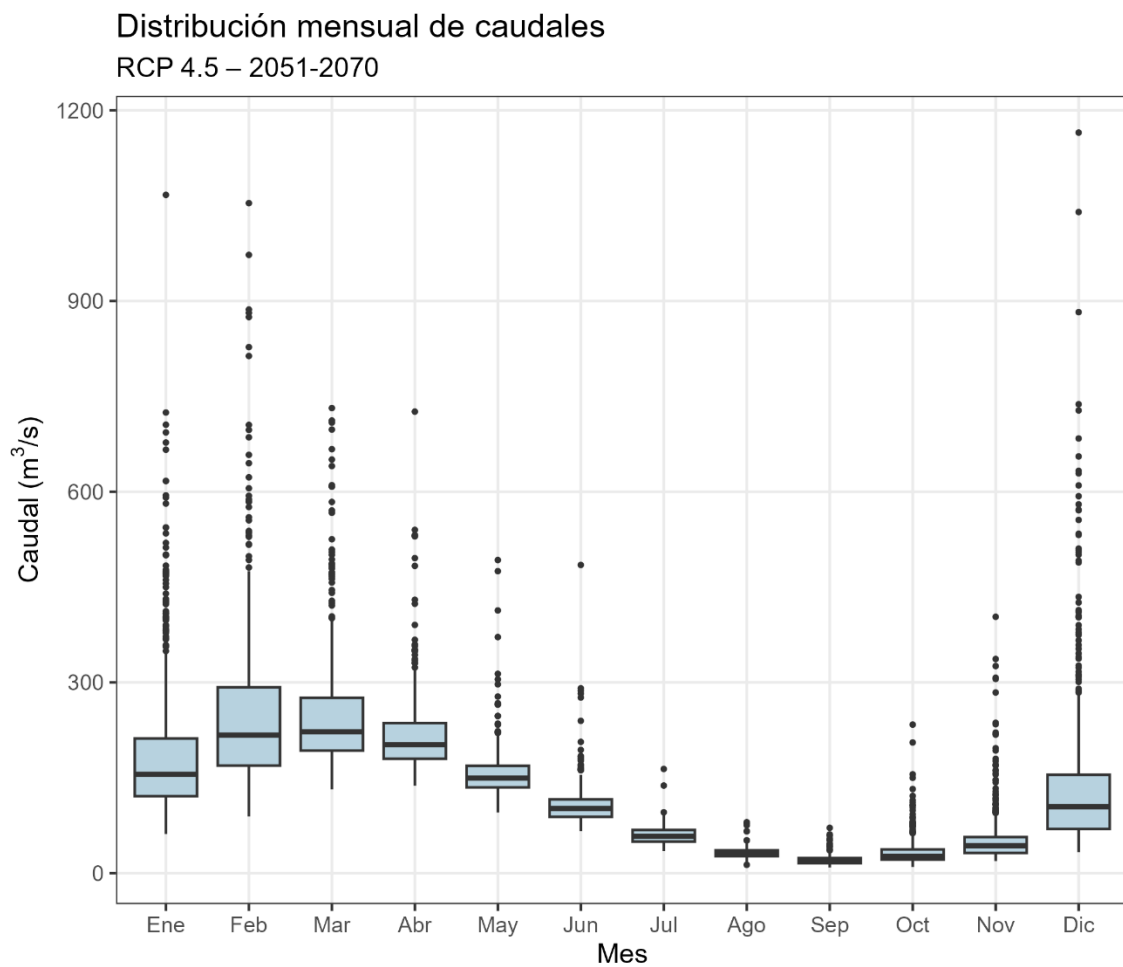


Figura 13 Distribución mensual de caudales – RCP 4.5 (2051 – 2070)

Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y discusión

El gráfico presenta la proyección de los caudales mensuales para el horizonte 2051–2070 bajo el escenario RCP 4.5, evidenciando una estacionalidad pronunciada. Se observa que los caudales más elevados se concentran entre enero y abril, superando los

valores registrados en periodos anteriores, mientras que entre julio y octubre los caudales mínimos tienden a acercarse a niveles casi nulos.

Desde un enfoque hidrológico, estos patrones reflejan una creciente sensibilidad de la subcuenca del río Vinces frente a la estacionalidad climática, caracterizada por crecidas más intensas y periodos secos más prolongados. La tendencia general muestra un incremento progresivo de la mediana y de los valores máximos durante la temporada lluviosa, acompañado de una reducción crítica en los estiajes, lo que evidencia una intensificación de los contrastes hidrológicos a medida que avanza el siglo.

Este hallazgo coincide con lo reportado en estudios recientes. En particular, Hanlin et al. (2021) señalaron que, incluso bajo escenarios intermedios como el RCP 4.5, las proyecciones en cuencas tropicales muestran un incremento sostenido en la magnitud de las crecidas, junto con una disminución más pronunciada de los caudales durante los periodos de estiaje.

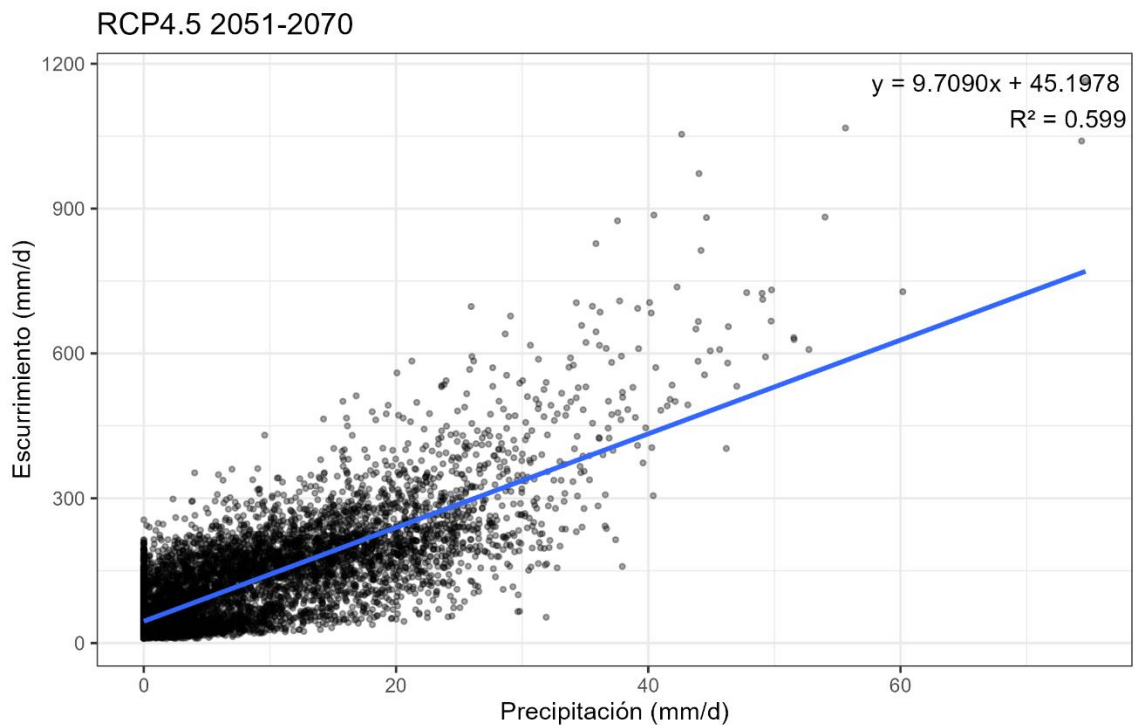


Figura 14 Precipitación vs escurrimiento – RCP 4.5 (2051 – 2070)

Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y discusión

El gráfico muestra la relación entre la cantidad de precipitación y el escurrimiento bajo el escenario climático RCP4.5 para el periodo de 2051 a 2070. En el eje horizontal se encuentra la precipitación diaria en milímetros por día, mientras que en el eje vertical se muestra el escurrimiento, también en milímetros por día. Los puntos dispersos reflejan que, en general, cuando la precipitación aumenta, también lo hace el escurrimiento, lo cual se ajusta a la tendencia mostrada por la línea de regresión lineal.

La ecuación de la línea es $y=9.7090x+45.1978$, lo que indica que, por cada milímetro adicional de precipitación diario, el escurrimiento crece aproximadamente en 9.71 mm/d. Además, el coeficiente de determinación (R^2) es de 0.599, lo que significa que alrededor del 60% de la variabilidad del escurrimiento se puede explicar a partir de las variaciones en la precipitación. Esto sugiere una relación moderadamente fuerte entre las dos variables, aunque también queda una porción significativa de variabilidad del escurrimiento que no se puede predecir solo con los datos de precipitación.

Este hallazgo concuerda con lo reportado por Liang y Liu (2020) en donde examinaron la conexión entre la precipitación y el escurrimiento en la zona monzónica oriental de China durante años de sequía. Los resultados mostraron que, en estos períodos, solo una fracción de la precipitación se transforma en escurrimiento debido a la alta evaporación y la baja infiltración en suelos secos.

4.4.2 Escenario RCP 8.5

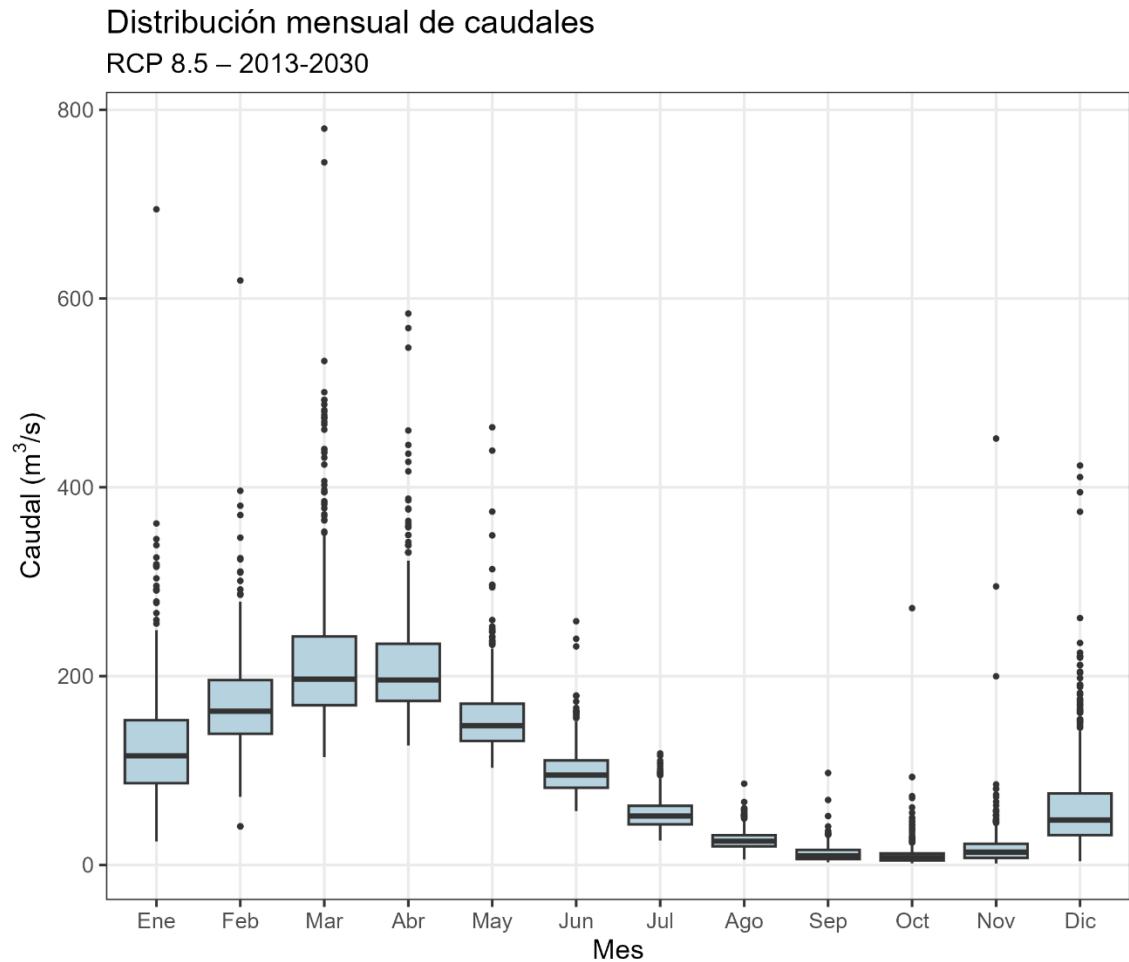


Figura 15 Distribución mensual de caudales – RCP 8.5 (2013 – 2030)

Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y discusión

El gráfico presenta la distribución mensual de los caudales bajo el escenario RCP 8.5 para el periodo 2013–2030, evidenciando un patrón estacional similar al observado en

el RCP 4.5, con los caudales más altos concentrados entre enero y abril y los valores mínimos registrados entre agosto y octubre. No obstante, en este escenario los caudales medianos durante la temporada lluviosa son ligeramente superiores y se aprecia una mayor dispersión de los datos, lo que refleja un incremento en la frecuencia de eventos extremos.

Desde una perspectiva hidrológica, esto indica que incluso en un horizonte cercano, el RCP 8.5 proyecta un régimen más variable, caracterizado por crecidas más intensas y periodos secos con caudales reducidos. La tendencia general apunta a una mayor amplitud entre los valores máximos y mínimos, sugiriendo una intensificación temprana de los contrastes hidrológicos.

Estos resultados son consistentes con estudios recientes que destacan la creciente sensibilidad de las cuencas tropicales frente a escenarios de forzamiento alto. En particular, Ballesteros et al. (2020) señalan que el escenario RCP 8.5 provoca una intensificación temprana de los extremos hidrológicos, evidenciada por caudales máximos más elevados y estiajes más pronunciados.

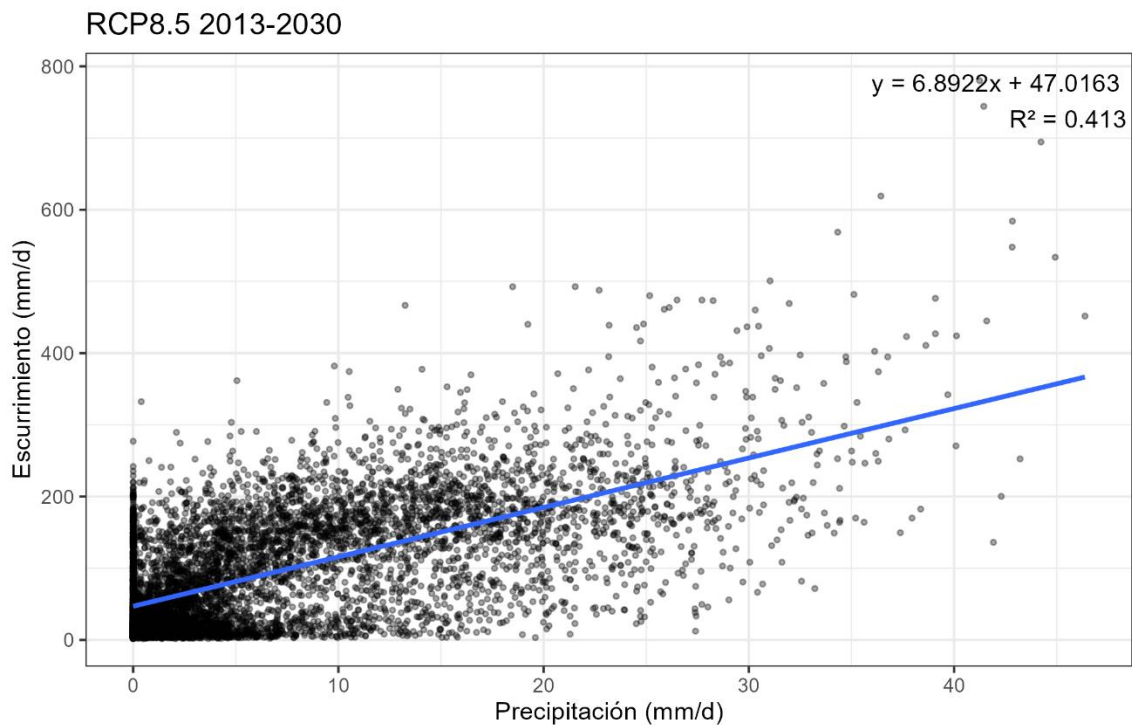


Figura 16 Precipitación vs escurrimiento – RCP 8.5 (2013 – 2030)

Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y discusión

Este gráfico de dispersión ilustra cómo la cantidad de precipitación (medida en milímetros por día) se relaciona con el escurrimiento (también en milímetros por día) bajo el escenario climático RCP8.5 para el período 2013-2030. A medida que aumenta la precipitación, también lo hace el escurrimiento, lo cual se refleja en la línea azul de tendencia. La ecuación de la recta, $y = 6.8922x + 47.0163$, sugiere que, por cada milímetro adicional de precipitación,

el escurrimiento crece en 6.8922 mm, y cuando no hay precipitación, el escurrimiento base es de aproximadamente 47 mm.

Sin embargo, el valor de $R^2=0.413$ indica que sólo el 41.3% de la variabilidad en el escurrimiento puede ser explicada por la cantidad de precipitación. Esto muestra que, aunque existe una tendencia clara de que un mayor volumen de lluvia genera más escurrimiento, hay otros factores que también influyen en los niveles de escurrimiento. La dispersión en los puntos del gráfico resalta que la relación no es completamente directa, sugiriendo que otros elementos podrían estar interviniendo en este comportamiento.

El patrón observado coincide con lo reportado en investigaciones recientes. En particular, Orkodjo y Kranjac (2022) en su estudio mostraron una notable reducción en el escurrimiento anual bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Esta disminución se atribuye al aumento de la temperatura y a la reducción de la precipitación tanto en las estaciones lluviosas como secas.

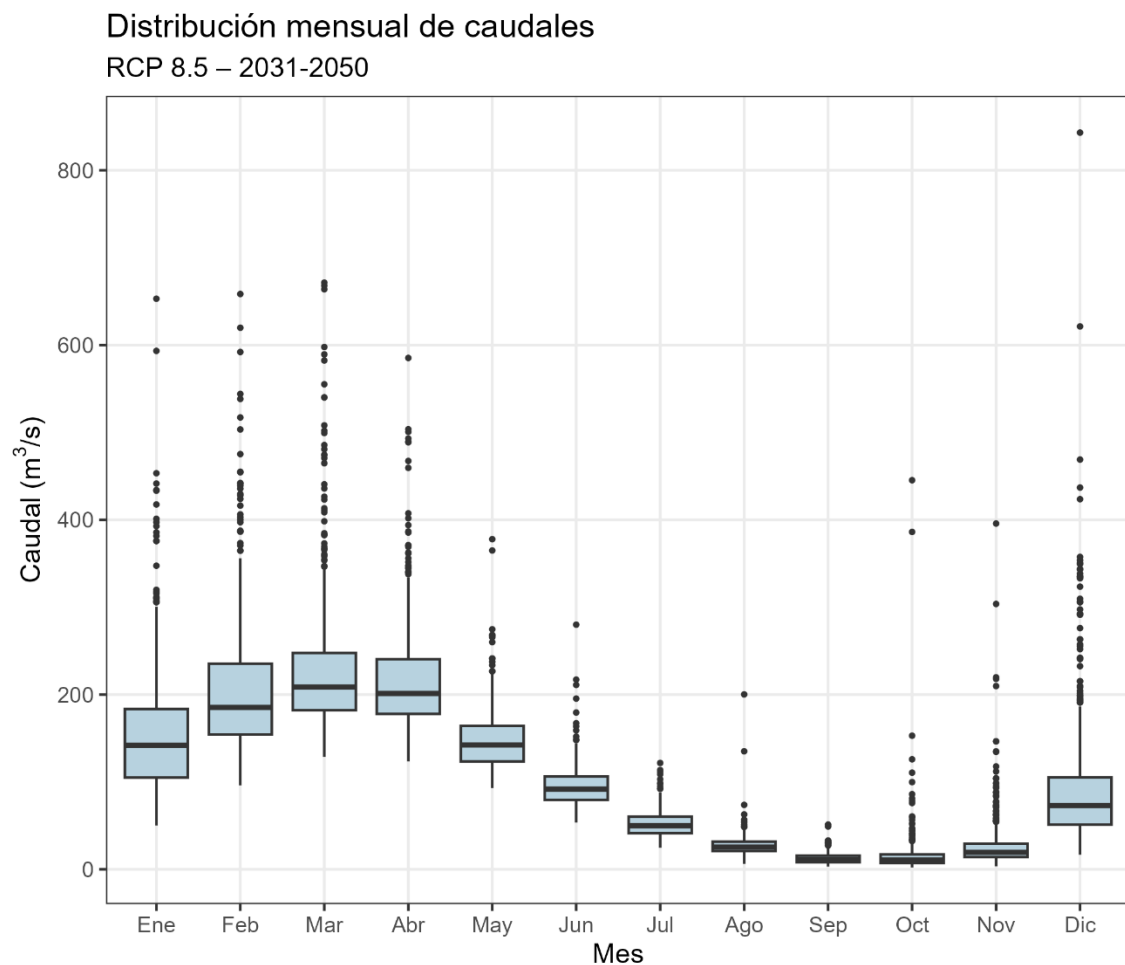


Figura 17 Distribución mensual de caudales – RCP 8.5 (2031 – 2050)

Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y discusión

El gráfico presenta la proyección de la distribución mensual de los caudales para el horizonte 2031–2050 bajo el escenario RCP 8.5. Se observa que los caudales más elevados se concentran entre enero y abril, mostrando medianas superiores y una mayor dispersión en comparación con el periodo 2013–2030. Durante los meses de estiaje (julio

a octubre), los caudales se mantienen bajos, llegando incluso a valores cercanos a cero en septiembre.

En el contexto hidrológico, este comportamiento evidencia una intensificación de los extremos: los caudales máximos aumentan en magnitud durante la temporada húmeda, mientras que en la estación seca la disminución de los caudales continúa siendo crítica. La tendencia general apunta a una mayor amplitud entre los valores mensuales, reflejando un incremento en la variabilidad y, por consiguiente, un riesgo más elevado de eventos hidrológicos extremos.

Este patrón coincide con lo reportado en estudios recientes. En particular, Ballesteros et al. (2020) señalan que, bajo el escenario RCP 8.5, las cuencas tropicales experimentan un aumento sostenido de la variabilidad mensual de los caudales, acompañado de una mayor concentración de lluvias durante la temporada húmeda.

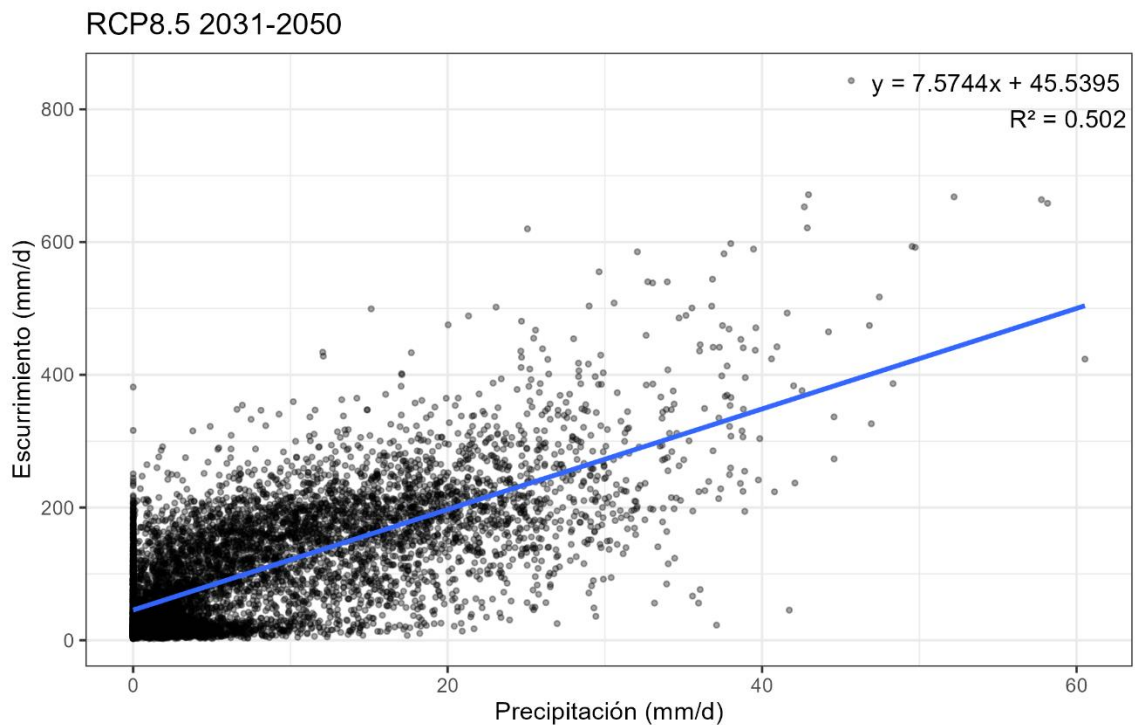


Figura 18 Precipitación vs escurrimiento – RCP 8.5 (2031 – 2050)

Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y discusión

Este gráfico ilustra cómo se relacionan la precipitación y el escurrimiento bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 para el período 2031-2050. Los puntos dispersos en el gráfico muestran datos que capturan distintas combinaciones de estas dos variables. Al trazar una línea de ajuste (en azul), podemos observar que hay una relación directa: cuando la precipitación aumenta, también lo hace el escurrimiento. La ecuación de esta línea de tendencia es $y = 7.5744x + 45.5395$, lo que indica que, en promedio, por cada milímetro adicional de lluvia, el escurrimiento incrementa en 7.57 mm/día.

El valor $R^2 = 0.502$ sugiere que, aproximadamente la mitad de las variaciones en el escurrimiento pueden ser explicadas por los cambios en la precipitación. Sin embargo, dado que R^2 no es un valor muy alto, esto nos da a entender que la relación entre ambas variables no es completamente fuerte. En otras palabras, aunque existe una conexión clara entre la cantidad de lluvia y el escurrimiento, hay otros factores que también influyen en el escurrimiento, como el tipo de suelo, la vegetación o incluso la infraestructura del área.

Este hallazgo coincide con los resultados de Fowler et al. (2022), quienes investigaron los impactos hidrológicos de la sequía prolongada conocida como la "Millennium Drought" en Australia. Su estudio reveló que la relación entre la precipitación y el escurrimiento se vio modificada por diversos factores, tales como la reducción en el almacenamiento de agua subterránea, los cambios en la recarga debido a la expansión de la zona no saturada y la disminución de la interacción entre los procesos de agua subterránea y superficial.

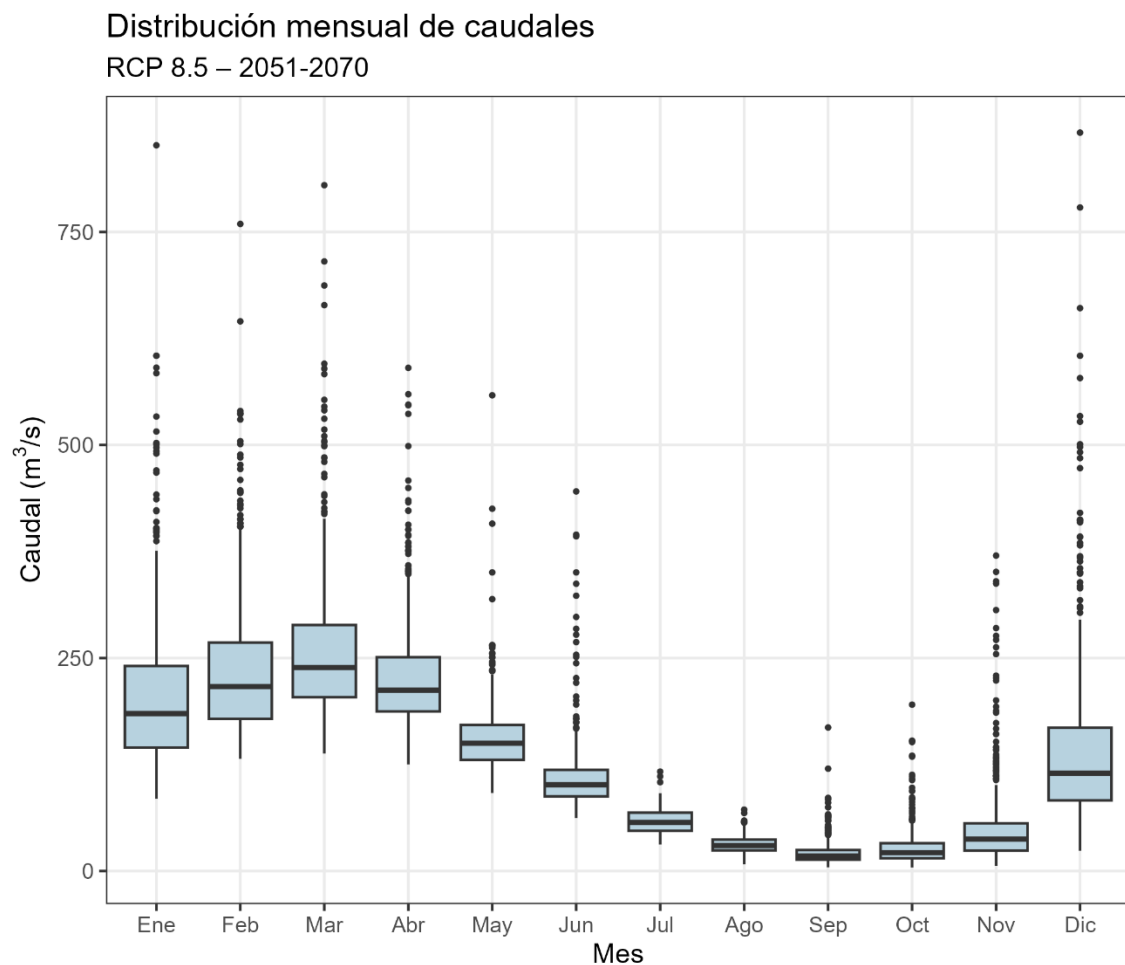


Figura 19 Distribución mensual de caudales – RCP 8.5 (2051 – 2070)

Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y discusión

El gráfico muestra la proyección de los caudales mensuales para el horizonte 2051–2070 bajo el escenario RCP 8.5 en donde se aprecia que los caudales más altos se concentran entre enero y abril, con medianas superiores y una mayor dispersión respecto a periodos anteriores, lo que refleja una intensificación progresiva de los eventos extremos.

Durante la temporada seca, comprendida entre julio y octubre, los caudales disminuyen a valores mínimos muy bajos y presentan escasa variabilidad.

En el ámbito hidrológico, este comportamiento evidencia un régimen cada vez más contrastante, caracterizado por crecidas más intensas y frecuentes en la estación lluviosa, y sequías más prolongadas y severas en la época seca. La tendencia general indica un ensanchamiento de la brecha entre los caudales máximos y mínimos, poniendo de manifiesto una creciente vulnerabilidad hidrológica hacia finales de siglo bajo un escenario de altas emisiones.

Estos resultados son consistentes con la literatura científica reciente. En particular, el IPCC (2021) advierte que los escenarios de altas emisiones, como el RCP 8.5, tienden a intensificar los extremos hidrológicos, aumentando la frecuencia de eventos de inundación y sequías en las regiones tropicales.

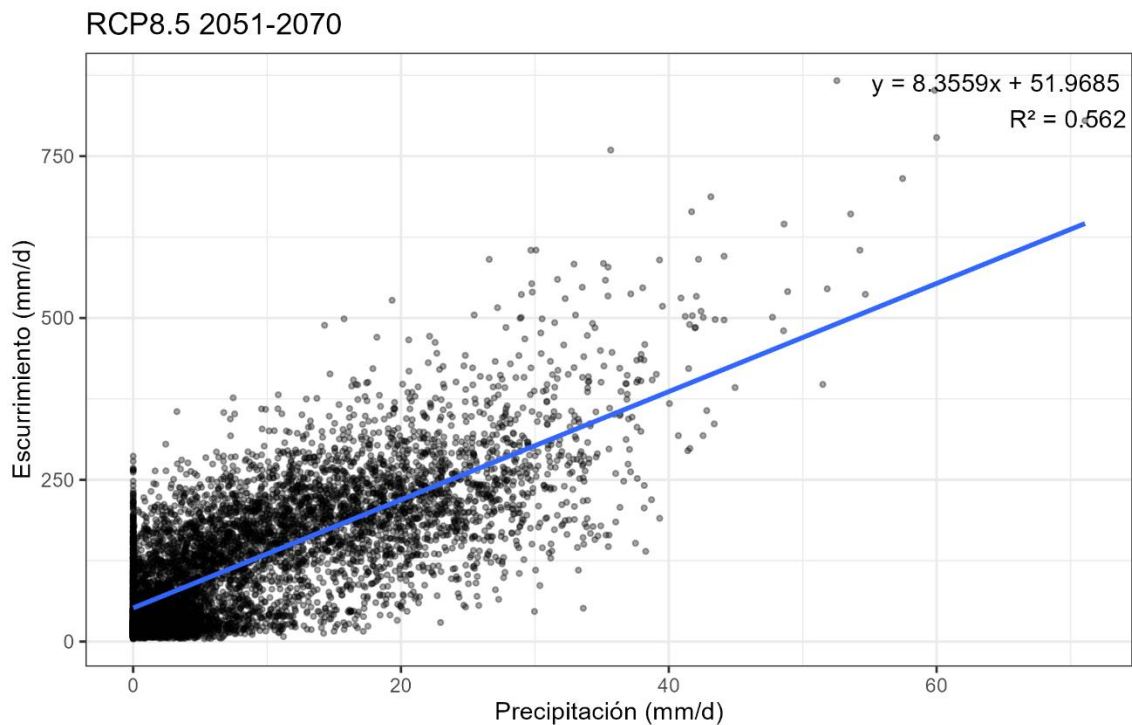


Figura 20 Precipitación vs escurrimiento – RCP 8.5 (2051 – 2070)

Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y discusión

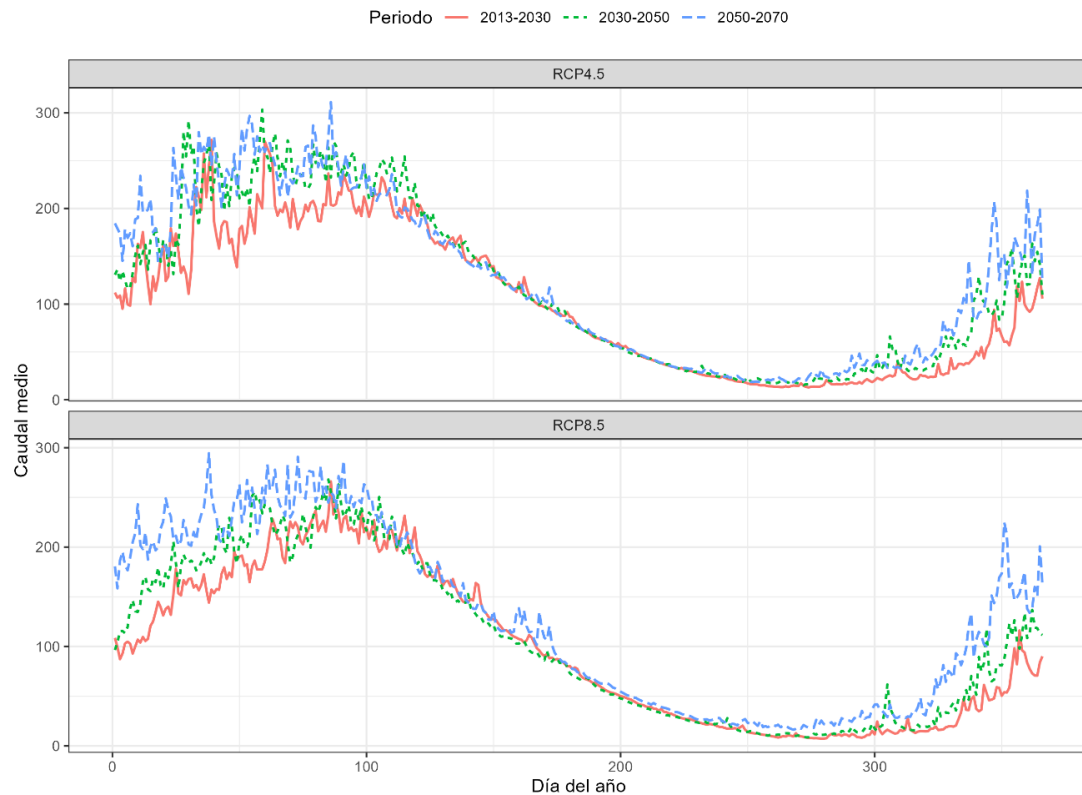
El gráfico muestra cómo se relacionan la precipitación y el escurrimiento de agua en un futuro bajo el escenario climático RCP8.5 para el período 2051-2070. Se observa que a medida que la cantidad de lluvia aumenta, también lo hace el escurrimiento. La línea de regresión indica que, por cada milímetro extra de lluvia por día, el escurrimiento aumenta alrededor de 8.36 mm. Aunque la línea empieza en un valor cercano a 52 mm de escurrimiento cuando no hay precipitación, lo que muestra que incluso en días sin lluvia puede haber algo de escurrimiento debido a otros factores.

El valor $R^2 = 0.662$ explica un 66.2% de la variabilidad en el escurrimiento a partir de la cantidad de lluvia. Sin embargo, eso significa que aún hay un 33.8% de variabilidad que no se explica solo con la precipitación, lo que sugiere que otros factores también juegan un papel importante en el escurrimiento. Aunque la tendencia general es clara, hay una variabilidad considerable, lo que hace que la situación sea algo compleja de predecir con exactitud.

Este comportamiento concuerda con estudio realizado por Ilbay et al. (2021) en Ecuador, se observó que la cantidad de precipitación aumentará aproximadamente un 6%, lo que provocará un aumento del 10% en el escurrimiento durante los períodos de lluvia. Sin embargo, en los períodos secos, se prevé una reducción significativa del escurrimiento. Este hallazgo es similar a lo que se muestra en el gráfico proporcionado, que también refleja una relación positiva entre la precipitación y el escurrimiento, aunque con una notable variabilidad, lo que sugiere que otros factores también están influyendo en estos resultados.

4.4.3 Escenarios comparativos RCP 4.5 y RCP 8.5

Figura 21 Hidrograma diario por periodo



Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y Discusión

El hidrograma de la Figura 21, indica para ambos escenarios que la media de los caudales mantiene una estacionalidad anual definida, coincidiendo con valores altos para la época lluviosa cuyo ascenso inicia en el mes de noviembre y se extiende hasta el primer semestre del año, además de mostrar un incremento en la producción de caudal en el rango de años de 2030 – 2050 y 2050 – 2070. Para el escenario RCP 8.5 presenta valores más

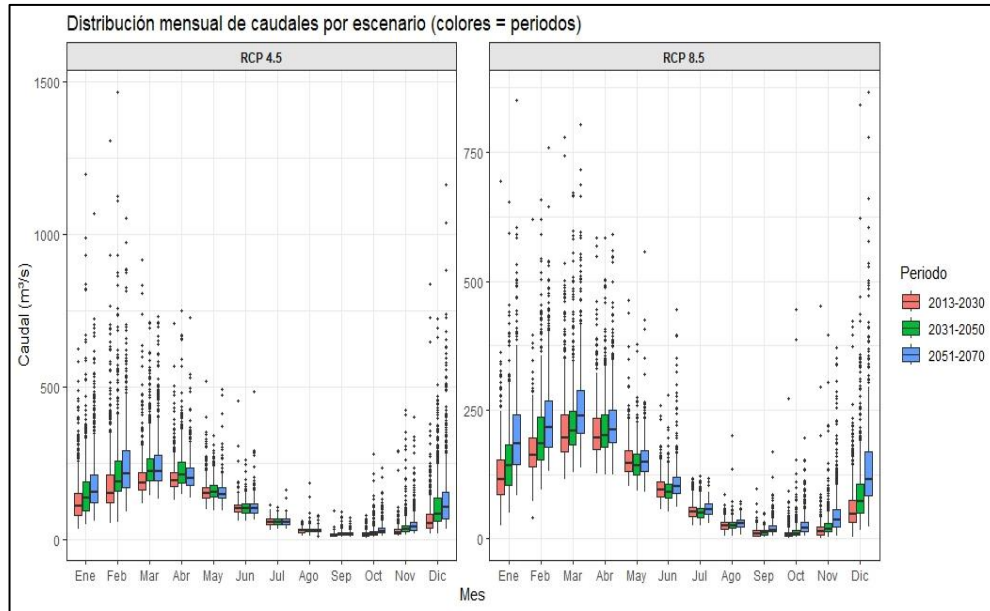
elevados en comparación con el periodo inicial, en otras palabras, a mayor forzamiento climático hay mayor producción de caudal.

Estos datos son parte de la evidencia física de que los escenarios de cambio climático intensifican los valores atípicos en los caudales tanto para la época de lluvia y la época seca, otros estudios evidencian que bajo escenarios de altas emisiones como lo es del RCP 8.5 los caudales presentan un aumento significativo debido a la evapotranspiración y el deshielo de glaciares (Pu et al., 2017), de igual manera (Dos Santos et al., 2016) refiere que la alteración en los patrones de precipitación y temperatura que presentan los escenarios de cambio climático vienen acompañados de una mayor variabilidad interanual, lo que implica que haya mayor riesgo de inundaciones y sequías.

Por otro lado (Abbaspour et al., 2017) manifiesta que inducir a los modelos hidrológicos dentro de su configuración a simular caudales bajo diferentes escenarios climáticos, es parte de las estrategias para la gestión integrada de cuencas hidrográficas.

El modelo SWAT opera en diferentes etapas, esto quiere decir que a una cuenca la divide en unidades de respuesta hidrológica tomando en consideración la homogeneidad de las características biofísicas, meteorológicas e hidrológicas, además tiene un mejor rendimiento a nivel de cuenca hidrográfica (Arnold & Fohrer, 2005). SWAT permite simular numerosos procesos hidrológicos, dentro de los principales la erosión del suelo, el transporte de sedimentos, análisis de calidad y cantidad de agua, cambios de clima y uso de tierra, además de estudios para gestión de cuencas hidrográficas (Leta et al., 2016).

Figura 22 Caja de bigotes escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5



Fuente: Procesamiento de datos R studio

Análisis y Discusión

En la Figura 22, nos representa la estacionalidad bien definida para las simulaciones de los caudales para ambos escenarios RCP, donde los meses de enero a abril tienen valores máximos y para los meses de julio a octubre, valores mínimos, esto coincide directamente con la estacionalidad de la época seca y la época lluviosa, para el escenario RCP 4.5 el caudal presenta aumento gradual, en cambio para el escenario RCP 8.5, para la época de lluvia presenta valores atípicos, lo que se asocia a la presencia de eventos extremos, notablemente se puede esclarecer la diferencia entre los caudales simulados para ambos escenarios.

Los resultados de estudios previos han contrastado que los escenarios de cambio climático consolidan la estacionalidad de caudales, además de intensificar su volumen en época de lluvia y disminuyéndoles en la época seca más aun en escenarios RCP de altas concentraciones, para (Dos Santos et al., 2016) dentro de su investigación de una cuenca bajo escenarios de cambio climático encontró, las lluvias se intensifican en época húmeda y viceversa en época seca, incrementando el riesgo de inundaciones y sequías.

Por otro lado (Pu et al., 2017)apunta en su estudio sobre cuencas tropicales hallo que bajo escenarios de cambio climático de altas concentraciones como es el RCP 8.5 la producción de caudales se duplicaba al doble, para el escenario RCP 4.5 el aumento de caudales es manejable por lo que la incorporación de medidas para reducir el riesgo frente al cambio climático puede irse aplicando de manera progresiva, mientras que para el escenario rcp 8.5, las medidas deben ser más robustas para su implementación.

4.5 Plan Modelo para la Gestión integrada de la cuenca del Río Guayas

Es imprescindible rediseñar las instituciones a fin de fortalecer la gobernanza de los recursos naturales cita, este enfoque también conocido como nuevo institucionalismo, enfatiza el trabajo de los problemas ambientales desde tres modelos:

- a) **Acción colectiva** que se basa en las elecciones racionales.
- b) **Práctica social** se centra en las practicas humanas, culturas, tradiciones, hábitos, creencias, etc.
- c) **Acción del conocimiento** donde prevalece el liderazgo y los sistemas de gobernanza, entendiendo a los problemas desde su raíz, desarrollo y consecuencias como parte de experiencias de aprendizajes.

Dentro del área de afluencia de la cuenca del Río Guayas es importante manifestar que se encuentran las provincias de Santo Domingo de los Tsáchilas, Bolívar, Cotopaxi, Chimborazo, Guayas, Los Ríos, Manabí y en una mínima parte la provincia de Tungurahua, Cañar y Santa Elena, cada provincia con su capital correspondiente, siendo así 10 provincias y 70 cantones respectivamente.

En el país y en la cuenca del Río Guayas existe una organización territorial donde las instituciones responden a solucionar problemas locales y, por otra parte, a tratados internacionales, cada institución abarca temas específicos relacionados con la gestión del recurso hídrico frente al cambio climático. Con el mapeo de actores claves para la generación de un modelo de gestión integrado para la cuenca del Río Guayas frente al cambio climático, toma en consideración la institución, misión, visión, políticas, presupuesto y toma de decisiones.

Para el mapeo de actores se procede a realizar una visualización de las plataformas gubernamentales, leyes, reglamentos, instrumentos de gestión y administración territorial con la finalidad de abarcar en su mayoría aquellos que formarían parte del modelo de gestión, siendo los siguientes:

Tabla 6 Cuadro de actores institucionales

No.	Actor	Función	Acción territorial	Instrumento de gestión
1	MAATE		Declaraciones y manejo	Permisos
		Conservar el	de áreas protegidas,	ambientales
		patrimonio	además de coordinar la	Estudios
		natural y la	restauración de	ambientales
		calidad ambiental	ecosistemas con	Planes de manejo
2	INAMHI	a nivel nacional	soluciones basadas en	Ordenanzas y
			naturaleza	resoluciones
		Proporcional	Proporcionar de datos	Boletines
		información	meteorológicos e	Convenios
		meteorológica e	hidrológicos y emitir	Repositorio
		hidrológica a	pronósticos	nacional
		nivel nacional		

3	SNGR	Promover la prevención, la reducción de riesgos y gestión de respuesta ante emergencias	Elaboración de mapas de riesgo, promover la prevención y liderar el fortalecimiento de la capacidad de respuesta	Planes de gestión de riesgos Simulacros
		Asignación presupuestaria y planificación nacional	Habilitación de financiamiento, dar seguimiento a la ejecución y evaluar resultados	Convenios de financiamiento
5	GAD`S provinciales	Planificación y ordenamiento territorial entre cantones	Coordinación interjurisdiccional para la gestión a nivel de subcuenca	PDyOT Planes de conservación Programas de restauración Convenios por subcuencas

		Planificación del		
6	GAD`s cantonales	uso de suelo y asentamientos humanos (sector urbano y rural)	Regular el uso de suelo urbano y rural	Planes para la gestión del uso y ocupación del suelo
7	GAD`s parroquiales	Organización comunal y juntas de agua	Monitoreo participativo para la conservación de franjas de protección y fuentes de agua	Reglamentos Comités locales Convenios
8	Empresas Municipales	Administración para la dotación de servicio de agua potable, alcantarillado y saneamiento	Mantener en buen funcionamiento los sistemas de captación, tratamiento y distribución del agua para el consumo humano	Planes maestros para la dotación de servicio de calidad
9	Juntas de agua	Administración de la dotación de agua para consumo y riego	Implementación de buenas prácticas ambientales para concientizar el consumo del agua	Estatutos Reglamentos Actas Convenios

				Producción más
10	Sector Agroindustrial	Producción de bienes para el consumo humano	Mejoramiento de la producción a través de tecnología más eficiente y menos contaminante	limpia Certificaciones ambientales Licencias y permisos
11	Autoridades Portuarias	Administración y gestión de los estuarios	Manejo de sedimentos	Mesas portuarias para la operación de dragados
12	Academia	Generación de nuevos conocimientos	Asistencia técnica con insumos académicos para el mejoramiento de problemas puntuales	Convenios Investigaciones I+D+I Repositorios
13	ONG`s	Participación local y fortalecimiento de la conversación	Asistencia voluntaria para la ejecución de actividades encaminadas en la recuperación y conservación de ecosistemas	Planes, programas y proyectos. Convenios y acuerdos

Fuente: Elaboración propia

Con los actores identificados se procede a ponderar según la siguiente tabla:

Tabla 7 Criterios de ponderación para los actores institucionales

Nivel de influencia y toma de decisiones	
Criterio	Ponderación
Normativa nacional y rectoría	9 - 10
Capacidad técnica y de regulación	7 – 8
Administración local o sectorial	5 – 6
Generación de conocimiento	1 - 4
Disposición de recursos	
Criterio	Ponderación
Recursos estatales y cooperación internacional	9 - 10
Infraestructura y sistemas	7 – 8
Recursos estatales y sujetos a transferencias	5 – 6
Recursos limitados	1 - 4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8 Resultados de ponderación para los actores institucionales

No.	Actor	Alcance	Ponderación	
			Recursos disponibles	Influencia y toma de decisiones
1	MAATE	Nacional	8	9

2	INAMHI	Nacional	6	7
3	SNGR	Nacional	7	7
4	MEF	Nacional	9	8
5	GAD`S provinciales	Provincial	4	6
6	GAD`s cantonales	Cantoniales	5	5
7	GAD`s parroquiales	Parroquial	2	3
8	Empresas Municipales	Cantoniales	5	5
9	Juntas de agua	Local	3	5
10	Sector Agroindustrial	Privado	7	6
11	Autoridades Portuarias	Sectorial	6	4
12	Academia	Nacional	6	4
13	ONG`s	Nacional	4	4

Fuente: Elaboración propia

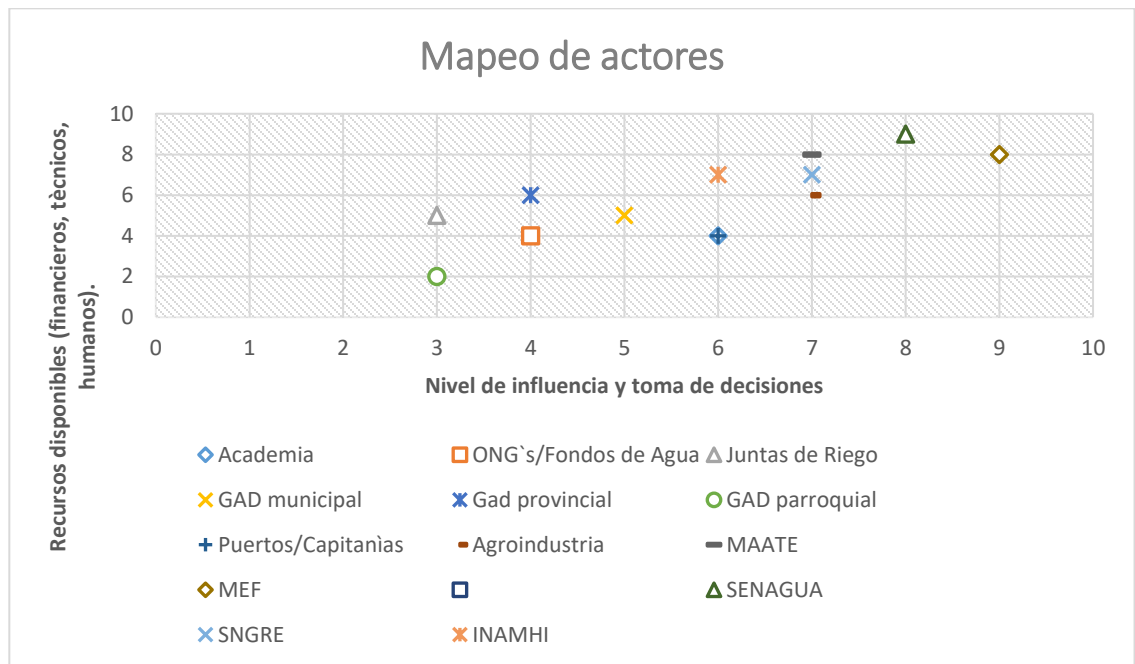


Figura 23 Mapa de actores

Fuente: Elaboración propia

En la figura 23 se muestra las instituciones ponderadas, siendo el Ministerio del Agua, Ambiente y Transición Ecológica el que lidera por ser el rector en temas ambientales a nivel nacional y el Ministerio de Finanzas de igual forma por ser quien asigna las alícuotas presupuestarias a los distintas instituciones y niveles de gobierno, razón por la cual el que debe liderar el plan modelo para la gestión integrada de la Cuenca del Río Guayas frente al Cambio Climático es el MAATE, esto a través de la creación del comité de la Cuenca del Río Guayas, donde cada institución se posiciona acorde a sus funciones, recursos disponibles y capacidad de decisión, para lo cual establecemos 4

niveles de gestión; Nivel 1: Estratégico – Político, Nivel 2: Técnico – Coordinador, Nivel 3: Operativo – Territorial, Nivel 4: Mesas temáticas transversales y Nivel 5: Comunitario.

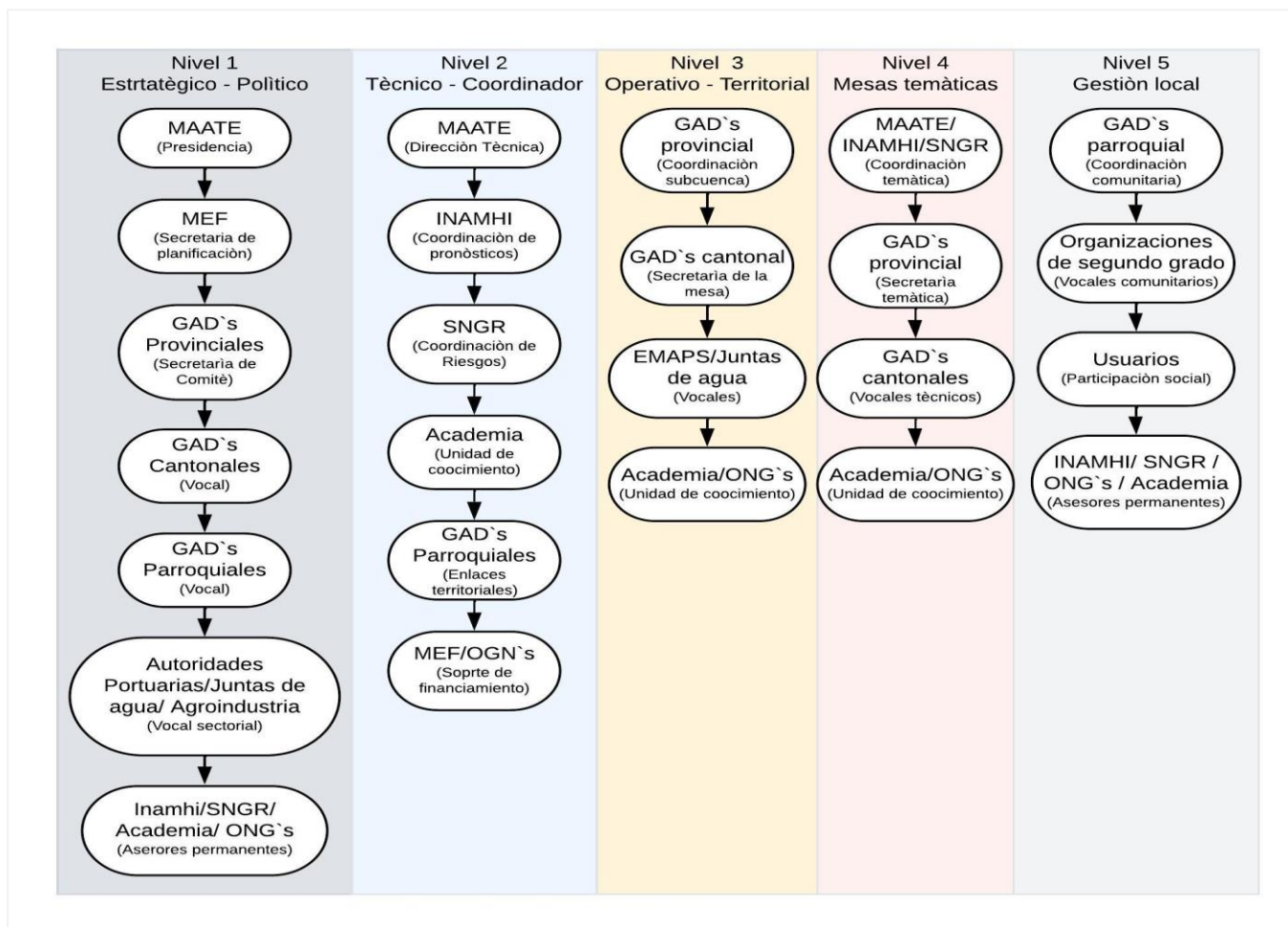


Figura 24 Niveles de gesti6n

Fuente: Elaboraci6n propia

Nivel 1: Estratégico Político

Este nivel se caracteriza porque define las reglas del plan para la gestión integrada de la cuenca del Río Guayas frente al Cambio Climático, su función es diseñar, discutir y aprobar los lineamientos vinculados con las normativas vigentes, además de priorizar las inversiones. Su papel es imprescindible ya que permite alinear en modo cascada las competencias de cada una de las instituciones y niveles de gobierno involucradas sin que haya duplicidad de funciones. Garantiza la gobernanza multinivel ya que su accionar sigue un modelo de gestión basado en acuerdos, metas e indicadores, lo que obliga al cumplimiento en el trabajo en territorio de acuerdo a cada una de las jurisdicciones a nivel de subcuenca.

Tabla 9 Actores institucionales Nivel 1 – Plan modelo

Cargo en el comité	Institución	Función
Presidencia	MAATE	Lidera, convoca y dirige sesiones
Secretaría de planificación	MEF	Asignación presupuestaria objetiva
Secretaría de Comité	GAD`s provinciales	Ordenamiento a nivel de subcuenca
Vocal cantonal	GAD`s cantonales	Regularización del uso de suelo urbano y rural

Vocal parroquial	GAD`s parroquiales	Organización comunitaria
Vocal sectorial	Autoridades portuarias/ Sociedad civil/ Juntas de agua/ Agroindustria	Programación de obras y monitoreo participativo
Asesores permanentes	INAMHI/ SNGR/ Academia y ONG`s	Proporcionar instrumentos normativos basados en gestión de datos

Fuente: Elaboración propia

Nivel 2: Técnico – Coordinador

Configura la metodología de acción, la administración y manejo de datos, a través de modelamientos convierte en evidencia para la toma de decisiones, su importancia prevalece en garantizar la calidad técnica y transparencia de los resultados, mediante la articulación con el MAATE, INAMHI, SNGR, GAD`s y EMAPS. Define lineamientos para la operación en presas, embalses, drenajes, etc. Planifica el levantamiento de datos, calibración de modelos y validación de escenarios climáticos, diseña guías, fichas e instrumentos normativos que contienen medidas, responsables, plazos y fuentes financieras.

Tabla 10 Actores institucionales Nivel 2 – Plan modelo

Cargo en el comité	Institución	Función
Dirección técnica y de calidad	MAATE	Coordinación del plan
Coordinación de pronósticos	INAMHI	Elaboración de pronósticos
Coordinación de riesgos	SNGR	Elaboración de planes de riesgo
Unidad de conocimiento	Academia	Generación de modelos bajo escenarios
Enlaces territoriales	GAD`S provinciales/Cantoniales/Parroquiales y EMPAPS	Elaboración de reportes y validación territorial
Soporte para financiamiento	MEF/ ONG`s	Priorización objetiva de inversiones financieras

Fuente: Elaboración propia

Nivel 3: Operativo – Territorial

Las decisiones tomadas son materializadas en obras y acciones para cada uno de los sectores, en este caso la cuenca se divide en baja, media y alta, su función es monitorear

y supervisar las medidas adoptadas, ya que conecta el diseño técnico basado en la generación de conocimiento por parte de la academia, donde cada acción se enfoca en las realidades locales (enlaza aquellos que comparten una misma subcuenca). Organiza bajo un cronograma definido, acciones y responsabilidades, elabora reportes técnicos donde indica la situación, realiza ajustes en caso de ser necesario.

Tabla 11 Actores institucionales Nivel 3 – Plan modelo

NIVEL 3		
Cargo en el comité	Institución	Función
Coordinación a nivel de subcuenca	GAD provincial	Coordinar la ejecución de obras
Secretaría de la mesa	GAD cantonal	Elaboración de actas y seguimiento de actividades
Vocales	EMAPS/ Juntas de agua	Control de la ejecución de actividades
	Autoridades, ONG`s,	Brindar asesoramiento sectorial y financiamiento
Invitados	academia	según posibilidades

Fuente: Elaboración propia

Nivel 4: Mesas técnicas transversales

Son importantes porque establecen categorías o ejes críticos para su accionar, su función es controlar y evaluar la gestión a nivel de subcuenca además de proporcionando fichas, protocolos, procedimientos para afirmar el trabajo con coherencia, además de reducir la incertidumbre con criterios técnicos aplicables. Aseguran el cumplimiento de las metas y el uso eficiente de los recursos, en territorio son quienes se responsabilizan de la inducción temática a los equipos de los GAD`s provinciales y cantonales, brindan acompañamiento, asistencia permanente y evalúan las lecciones aprendidas junto con el acompañamiento de instituciones como MAATE, INAMHI, SNGR, EMAPS, invitados permanentes como academia, sociedad civil.

Tabla 12 Actores institucionales Nivel 4 – Plan modelo

NIVEL 4		
Cargo en el comité	Institución	Función
Coordinación temática	MAATE/INAMHI/SNGR	Delimita los temas, elabora estándares y guías.
	Designado por los GAD`S	
Secretaría temática	provinciales	Elaboración de actas
	Técnicos designados por los	Aprendizaje de guías, fichas y aplicación de metodologías
Vocales técnicos	GAD`s cantonales	en territorio

	Sociedad civil, academia,	Participación continua y
Invitados permanentes	ONG`s	replicación de resultados

Fuente: Elaboración propia

Nivel 5: Comunitario

Su función es monitorear permanentemente el territorio, a través de acuerdos la organización comunitaria es clave, ya que es ella quien conoce de primera mano cual es la situación de cada una de las acciones ejecutadas en el territorio, también se centra en brindar charlas enfocadas en la prevención y conservación. Es clave ya que define el éxito de las acciones, evalúa periódicamente los resultados y de ser necesario modifican las medidas a fin de que se adapten a las prácticas y conocimientos locales, en la comunidad se adoptan riego por turnos, respetan las franjas de protección y humedales, se colocan medidores para racionar el consumo de agua doméstica, su participación es indispensable ya que se fortalece la resiliencia comunitaria.

Tabla 13 Actores institucionales Nivel 5 – Plan modelo

Cargo en el comité	Institución	Función
Coordinación comunitaria	GAD Parroquial	Lidera la generación de acuerdos, reuniones, convenios a nivel comunitario
Vocales comunitarias	Organizaciones de segundo grado	Monitoreo permanente en campo y reporte de novedades

Participación social	Usuarios	Participación permanente y elección de comisiones
Asesores permanentes	INAMHI/ SNGR/ Academia y ONG`s	Evaluar y asesorar el impacto de las acciones en territorio

Fuente: Elaboración propia

Con el plan modelo para la gestión integrada de la cuenca del Río Guayas frente al Cambio climático hay que comprender las características biofísicas de la misma, tal es el caso que la cuenca posee sus dos afluentes principales, el Daule y Babahoyo que convergen en la forma de V frente a la ciudad de Guayaquil, por su forma triangular tipo abanico la cuenca es exorreica, que quiere decir que drena el agua a través del Golfo de Guayaquil al océano Pacífico. Es importante recalcar que la cuenca para las estrategias se ha dividido en tres secciones, la primera que corresponde a la cuenca baja – sector costa, la segunda cuenca media que corresponde a las estribaciones occidentales de la cordillera de los Andes y el tercer sector la cuenca alta, que corresponde al sector de la sierra y páramo, como se muestra a continuación:

Cuenca Baja – Sector Costa

Tabla 14 Medida No. 1 – Reducción de inundaciones y sequias

Medida No. 1 Reducción de Inundaciones y sequias	
Objetivo:	Incrementar la retención e infiltración para reducir crecidas y daños por inundaciones
Meta:	Para el 2028 se incorporan 100 has de parques inundables en las riberas de los ríos y lagunas de laminación Niveles máximos por evento
Indicadores	mm3 de retención
Claves de Rendimiento:	Activación de Sistemas de Alerta Temprana (Eearly Warning System, siglas en ingles EXC) Montos por daños evitados \$USD
Articulación multinivel:	Prefectura/ Municipios/ EMAPS/ MAATE/ INAMHI/ SNGR y barrios/usuarios Diagnóstico Hidrológico local y cartografía del uso de suelo Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles (pavimento permeable, zanjias, bioceldas, lagunas, parques)
Metodología:	Ordenanzas para implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles en a nivel del cantón Planes pilotos demostrativos (selección de barrios y evaluaciones post eventos)

Escalamiento a nivel cantonal a través de proyectos y contrataciones públicas
Búsqueda de financiamiento para áreas verdes
Monitoreo y reportes anuales

Fuente: Elaboración propia

Análisis

La infraestructura verde permite a las zonas urbanas amortiguar los impactos de sequías e inundaciones, sirve para retener agua y no generar estrés al río, su incorporación es a través de ordenanzas, las cuales deben exigir dentro del territorio una cantidad de metros cuadrados (m²) destinados a esta acción, además de responder de manera asertiva al índice de salud municipal, el cual se basa en la cantidad de vegetación por metro cuadrado por habitante.

Parte de los resultados de incrementar infraestructura verde es el mejoramiento de la habitabilidad y los servicios ecosistémicos, existe bibliografía que manifiesta que la infraestructura verde funciona mejor cuando se tiene sistemas urbanos de drenajes sostenibles además de incorporar vegetación permanente (Martín Muñoz et al., 2024).

Tabla 15 Medida No. 2 – Calidad de agua y reúso

Medida No. 2 Calidad de agua y su reúso	
Objetivo:	Establecer normas para reusar el agua de los caudales tratados
Meta:	Para el año 2027 se moderniza el 20% de las plantas de tratamiento de agua residual y se rehúsa el 20%

Indicadores	Índice de BOD y DBO; TSS/SST; N-P
Claves de	% de caudal reusado
Rendimiento:	Presencia de malos olores
Articulación multinivel:	Prefectura/ Municipios/ EMAPS/ MAATE/ INAMHI/ SNGR y barrios/usuarios
	Elaborar un diagnóstico de las PTAR, cantidades, funcionalidad y redes de recolección
	Diseño de humedales de pulimiento y redes para el reúso (riego/ jardines/parques)
Metodología:	Evaluación de la recarga gestionada de acuíferos
	Contratos por concepto de venta de agua tratada
	Incorporación de nueva tecnología para la gestión de lodos y energía
	Campañas publicitarias sobre los riesgos y beneficios

Fuente: Elaboración propia

Análisis

Esta medida integra tratamiento avanzado, humedales y esquemas de reúso para reducir la descarga de contaminantes, ampliar la disponibilidad de agua y disminuir la intrusión salina. Los beneficios incluyen menor carga orgánica, ahorro de agua potable y estabilidad en la oferta hídrica. Casos en América Latina demuestran que, con control sanitario, tarifas claras y alianzas público-privadas, el modelo es técnica y financieramente viable (Dingemans et al., 2020).

Tabla 16 Medida No. 3: Gestión de sedimentos e intrusión salina

Elemento	Descripción
Objetivo	Conservar los calados de navegación y limitar la intrusión salina mediante una gestión integral de sedimentos y la implementación de diques verdes de manglar.
Meta	Contar, en un plazo de 3 a 5 años, con un plan de manejo de sedimentos adoptado, la construcción de uno o dos diques verdes de manglar y la realización de batimetrías y monitoreos de salinidad cada semestre.
Indicadores Clave de Desempeño	Concentración de sólidos suspendidos totales (TSS), calado mínimo en metros, días con salinidad por encima del umbral y kilómetros de ribera restaurada.
Articulación multinivel	Autoridad del Agua y Autoridad Portuaria como entes rectores; Consejo de Cuenca, MAATE, prefecturas, municipios y usuarios locales como actores de coordinación y consulta. -Modelación morfodinámica del estuario y batimetría de referencia.
Metodología	Establecimiento de umbrales para dragado adaptativo y sitios de disposición controlada. Restauración de manglares y construcción de diques verdes en áreas vulnerables. Monitoreo semestral de salinidad y TSS.

Acuerdos entre autoridades portuarias y de cuenca para transparentar datos.

Obtención de licencias ambientales e inclusión de pescadores en la planificación.

Auditoría externa del plan de sedimentos.

Fuente: Elaboración propia

Análisis

La estrategia busca equilibrar el transporte de sedimentos, garantizar la navegabilidad y proteger las tomas de agua dulce. Al combinar dragado adaptativo, disposición controlada y restauración de manglares, se reducen la intrusión salina y los riesgos de erosión costera. Estudios como (Carrión-Mero et al., 2021) evidencian que la integración de manglares disminuye la energía de las olas y la altura de marejadas, fortaleciendo la resiliencia del estuario.

Cuenca Media – Estribaciones de la Cordillera

Tabla 17 Medida 4: Control de erosión

Elemento	Descripción
Objetivo	Reducir la erosión en laderas y disminuir la cantidad de sedimentos que llegan a los cauces, asegurando la estabilidad de los ríos y la calidad del agua.
Meta	Lograr, en un horizonte de 3 a 5 años, la protección de al menos 500 km de franjas ribereñas de 30 a 50 m de ancho, y cubrir

	30.000 hectáreas con terrazas, barreras vegetativas y reforestación en las riberas.
Indicadores Clave de Desempeño	Toneladas de sedimento por hectárea y año, concentración de sólidos suspendidos (TSS) durante estiaje y avenidas, kilómetros de ribera estabilizada e índices de condición ribereña.
Articulación multinivel	Prefecturas y municipios responsables; MAATE como ente normativo; agroindustria y usuarios del recurso hídrico; comunidades locales como participantes activos.
	Priorización de microcuencas considerando erosividad, pendientes y conectividad hídrica.
Metodología	Delimitación y acuerdos sobre franjas riparias, incluyendo cercas vivas y regulación de uso del suelo.
	Implementación de prácticas de control en laderas: terrazas, barreras vegetativas y sistemas agroforestales.
	Incentivos y programas de pago por servicios ambientales ribereños, junto con asistencia técnica.
	Monitoreo de TSS y geomorfología, con mantenimiento anual.
	Emisión de ordenanzas para prevenir retrocesos de franjas y establecer servidumbres ecológicas.

Evaluación costo-beneficio y co-beneficios en biodiversidad y ecosistemas.

Fuente: Elaboración propia

Análisis

La combinación de franjas ribereñas protegidas y manejo sostenible de laderas permite disminuir significativamente la erosión y la carga de sedimentos hacia los ríos. Integrar estas medidas en planes de desarrollo territorial y subcuencas, con acuerdos prediales y reforestación, asegura estabilidad de cauces y suelos más productivos. La evidencia en zonas tropicales demuestra que la efectividad aumenta cuando se combinan franjas adecuadas con manejo de laderas y apoyo técnico local (Pereira et al., 2021).

Tabla 18 Medida 5: Riego eficiente y retención

Elemento	Descripción
Objetivo	Incrementar la eficiencia hídrica en riego y mejorar la resiliencia agrícola frente a estiajes mediante sistemas tecnificados y recarga gestionada de acuíferos (MAR).
Meta	Para 3 a 5 años, tecnificar al menos 15.000 hectáreas de cultivo, instalar telemetría en 10 canales principales, desarrollar pilotos de MAR en abanicos aluviales y recargar $\geq 1 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Indicadores Clave de Desempeño	Rendimiento hídrico en kg/m ³ , porcentaje de pérdidas por conducción, volumen recargado anualmente y Tasa Interna de Retorno (TIR) de inversiones.
Articulación multinivel	Juntas de riego como responsables; Autoridad del Agua supervisora; prefecturas y MAATE como colaboradores; usuarios agrícolas como participantes.
	Auditoría de eficiencia en líneas principales y parcelas, complementada con telemetría.
Metodología	Elaboración de un plan de tecnificación que incluya riego por goteo, aspersión y sectorización de cultivos.
	Evaluación de sitios para MAR considerando geología, calidad del agua y barreras sanitarias.
	Implementación de créditos verdes y capacitación para operación y mantenimiento.
	Ejecución de pilotos de MAR con seguimiento piezométrico.
	Escalamiento de los sistemas mediante tarifas basadas en desempeño hídrico.
	Monitoreo, reporte y verificación anual de la productividad hídrica.

Fuente: Elaboración propia

Análisis

La tecnificación combinada con almacenamiento temporal y recarga de acuíferos contribuye a reducir pérdidas de agua, aumentar la eficiencia y garantizar disponibilidad durante estiajes. La integración de telemetría y control sanitario en MAR, junto con capacitación y tarifas por desempeño, asegura la sostenibilidad técnica y financiera del sistema. Experiencias en América Latina demuestran que el éxito depende de la gobernanza de juntas de riego y del acompañamiento constante a los usuarios (Reznik et al., 2022).

Tabla 19 Medida 6: Gestión de crecidas y sequías con EWS por impacto

Elemento	Descripción
Objetivo	Disminuir los daños provocados por inundaciones y sequías mediante pronósticos orientados a impactos, establecimiento de umbrales de alerta y comunicación efectiva a la población.
Meta	Alcanzar una cobertura del 80 % de la población expuesta con sistemas de alerta temprana (EWS), realizar al menos dos simulacros por año en cada cantón y asegurar un tiempo de anticipación de alerta (lead time) mínimo de 6 horas.
Indicadores Clave de Desempeño	Horas de anticipación en alertas, porcentaje de población efectivamente alertada y estimación de pérdidas económicas evitadas (USD).

Elemento	Descripción
Articulación multinivel	SNGRE e INAMHI como responsables; COE y Consejo de Cuenca en apoyo; municipios y EMAPS como colaboradores; comunidades y barrios como receptores.
Metodología	Co-diseño de umbrales de impacto con sectores clave como salud, vialidad y riego.
	Integración de datos pluviométricos, hidrológicos y de vulnerabilidad en tableros de decisión.
	Protocolos de aviso mediante mensajería sectorial y canales redundantes.
	Ejecución de simulacros y evaluación posterior a eventos
	Revisión y ajuste anual de umbrales y protocolos.
	Convenios interinstitucionales para garantizar datos abiertos.
	Medición de efectividad basada en vidas salvadas y daños evitados

Fuente: Elaboración propia

Análisis

Este enfoque traduce los pronósticos meteorológicos e hidrológicos en alertas de impacto concreto para la toma de decisiones. La integración de datos, simulacros periódicos y protocolos claros permite reducir tiempos de respuesta y pérdidas materiales. Experiencias de la WMO muestran que la efectividad aumenta con datos abiertos, roles

institucionales definidos y evaluación postevento, mejorando la resiliencia comunitaria (Hammood et al., 2021).

Cuenca Alta – Páramo

Tabla 20 Medida 7: Conservación y restauración

Elemento	Descripción
Objetivo	Proteger la regulación hídrica de cabeceras y páramos, manteniendo el caudal base y capturando carbono mediante prácticas sostenibles de conservación y restauración.
Meta	En un plazo de 3 a 5 años, cubrir al menos 40.000 hectáreas con contratos de PSA, cerrar 500 km de zanjás y restaurar 20.000 hectáreas de ecosistemas degradados.
Indicadores Clave de Desempeño	Caudal base (Qbase), porcentaje de cobertura vegetal nativa, índice de condición de humedales y toneladas de CO ₂ equivalente capturadas por año.
Articulación multinivel	MAATE, prefecturas y comunidades locales como responsables; Consejo de Cuenca como articulador; Fondo de Agua y ONGs como colaboradores; usuarios como interesados e involucrados. Identificación de áreas críticas y acuerdos con comunidades locales. Diseño de contratos de PSA con enfoque hídrico y de carbono, estableciendo reglas claras de uso.

Elemento	Descripción
Metodología	Cierre de zanjias, revegetación nativa y manejo sostenible de ganado. Monitoreo simple de caudal base y carbono (MRV), con empleo local verde. Creación de fondo fiduciario con reglas de gobernanza. Actividades de educación ambiental y resolución de conflictos. Escalamiento mediante corredores ecológicos interconectados

Fuente: Elaboración propia

Análisis

Los pagos por resultados combinados con acciones de restauración y manejo ganadero permiten mantener el caudal base, capturar carbono y conservar biodiversidad. La experiencia andina (FONAG/FORAGUA) demuestra que la estabilidad financiera y la participación comunitaria son esenciales, generando beneficios que superan la inversión inicial y promoviendo la resiliencia hídrica (Hurtado-Naranjo, 2023).

Tabla 21 Medida 8: Caudales ecológicos (Qecol) y acuerdos de uso

Elemento	Descripción
Objetivo	Establecer y garantizar caudales ecológicos en cabeceras, ajustando otorgamientos de agua para mantener funciones ecológicas y prevenir conflictos.
Meta	Alcanzar el 100 % de los tramos con Qecol definido, mantener una red de monitoreo activa y asegurar que al menos el 80 % de los acuerdos de uso estén formalizados.
Indicadores Clave de Desempeño	Porcentaje de cumplimiento de Qecol, número de conflictos resueltos, continuidad del flujo (D-Q).
Articulación multinivel	Autoridad del Agua como responsable y articuladora; GADs y MAATE como colaboradores; juntas y usuarios como interesados activos. Campañas hidrológicas y ecohidrológicas para determinar curvas de caudal ecológico por tramo.
Metodología	Resolución de otorgamientos y establecimiento de reglas de operación. Implementación gradual con compensaciones y medidas de eficiencia en demanda. Monitoreo continuo y revisión anual. Mediación y mecanismos de resolución de conflictos.

Fuente: Elaboración propia

Análisis

La definición de caudales mínimos y la regulación gradual de otorgamientos protegen ecosistemas y reducen disputas entre usuarios. La incorporación de monitoreo continuo y mediación mejora la adherencia a las normas y asegura seguridad hídrica durante periodos críticos. Buenas prácticas internacionales demuestran que los análisis escalonados y la participación local reducen costos y fortalecen el cumplimiento (Encalada, 2010b).

Tabla 22 Medida 9: Gobernanza financiera (fondos de agua)

Elemento	Descripción
Objetivo	Garantizar flujos financieros estables que sostengan programas de PSA y restauración a escala de paisaje, asegurando continuidad y eficiencia en la gestión de cuencas altas.
Meta	Movilizar entre USD 3 y 5 millones anuales, mantener al menos 90 acuerdos vigentes y proteger 60.000 hectáreas hacia 2030.
Indicadores Clave de Desempeño	US\$ asignados a PSA por año, hectáreas bajo contrato y porcentaje de continuidad contractual.
Articulación multinivel	Fondo de Agua y MAATE responsables; MEF y Consejo como articuladores; GADs y ONGs como colaboradores; comunidades y usuarios como interesados activos. Diseño de fideicomiso y portafolio de inversión priorizando cuencas altas.

Elemento	Descripción
Metodología	Establecimiento de acuerdos con empresas, gobierno local y otros aportantes.
	Creación de esquema de gobernanza y MRV de resultados hídricos y de carbono.
	Desarrollo de cartera de proyectos: PSA, restauración, educación y monitoreo.
	Transparencia y rendición de cuentas anual.
	Estrategia de escalamiento regional.

Fuente: Elaboración propia

Análisis

Los fondos fiduciarios permiten canalizar recursos hacia conservación y restauración, asegurando la continuidad de los programas a largo plazo. La experiencia de FONAG y otros fondos en América Latina muestra retornos positivos en cobertura de hectáreas protegidas y mejoras en la cantidad y calidad de agua cuando se aplican gobernanza multiactor, portafolio diversificado y rendición de cuentas transparente (Uscanga Morales & Perevochtchikova, 2020)

Tabla 23 Medida **10**: Integración cuenca estuario (operación coordinada de presas, compuertas, drenajes)

Elemento	Descripción
Objetivo	Optimizar la operación de infraestructuras hidráulicas (presas, compuertas y drenajes) para reducir picos de crecida y controlar la intrusión salina en zonas de transición cuenca–estuario.
Meta	Adoptar manuales de operación, cumplir con ≥ 90 % de las metas anuales y realizar auditorías independientes periódicas.
Indicadores Clave de Desempeño	Cumplimiento de curvas objetivo, reducción de picos aguas abajo, número de días con salinidad por encima del umbral.
Articulación multinivel	Autoridad del Agua responsable; Consejo de Cuenca articulador; Autoridad Portuaria, MAATE, prefecturas y municipios como colaboradores; usuarios como interesados. Establecer mesa operativa permanente (agua, puerto y GAD) con reglas de datos abiertos.
Metodología	Modelación integrada estuario–río considerando múltiples eventos. Definición de curvas objetivo, umbrales de dragado y plan de contingencia. Auditoría anual independiente y revisión adaptativa.

Elemento	Descripción
	Comunicación pública de resultados
Fuente: Elaboración propia	

Análisis

La coordinación operativa permite armonizar objetivos de seguridad, riego, navegación y conservación ambiental. La modelación integrada y auditorías periódicas aseguran que los picos se controlen y la intrusión salina se minimice. Estudios en el estuario del Guayas muestran que la gestión adaptativa de sedimentos y la operación conjunta de infraestructura son clave para la estabilidad de calados y la calidad del agua (Muñoz Marcillo & Vera Zhunaula, 2025).

Tabla 24 Medida 11: Red de datos y EWS integrado (datos abiertos)

Elemento	Descripción
Objetivo	Asegurar la disponibilidad, oportunidad y accesibilidad de datos para la toma de decisiones y la activación de alertas tempranas por impacto.
Meta	Mantener ≥ 95 % de las estaciones operativas, contar con un repositorio único y generar tableros de información por subcuenca.
Indicadores Clave de Desempeño	Porcentaje de disponibilidad de estaciones, tiempo de publicación de datos y número de descargas del repositorio.

Elemento	Descripción
Articulación multinivel	INAMHI y SNGRE responsables; Consejo de Cuenca articulador; Autoridad del Agua, GAD's y academia como colaboradores; público como usuario final.
	Inventario y rehabilitación de estaciones con QA/QC y redundancias.
Metodología	Creación de repositorio único con API pública y gobernanza de datos.
	Diseño de EWS por impacto, incluyendo matrices sectoriales, umbrales y mensajería.
	Ejecución de simulacros, evaluación postevento y mejora continua.
	Financiamiento de operación y mantenimiento de largo plazo

Fuente: Elaboración propia

Análisis

La arquitectura de datos, estandarización y apertura mediante APIs permite decisiones oportunas y coordinación entre sectores. La rehabilitación de estaciones, la integración de protocolos COE y los simulacros garantizan confiabilidad, trazabilidad y aprendizaje continuo. Guías de la WMO evidencian que la gobernanza de datos, métricas

de efectividad y financiamiento sostenido incrementan la eficiencia de los sistemas de alerta (Lechón Sánchez, 2023).

5 CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

- El modelo hidrológico SWAT fue desarrollado con las métricas de R^2 , NSE y Pbias, que según los valores arrojados y fundamentados en la misma bibliografía SWAT, el modelo es aceptable, estos valores fueron posibles a través del respectivo calibrado y validado. El modelo permitió la simulación de caudales bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 para los rangos de años de 2013 al 2030, del 2031 al 2050 y del 2051 al 2070, datos que fueron procesados en R studio donde se obtuvo gráficas con su respectivo análisis para facilitar la comprensión del lector.
- Se identificó que la simulación de caudales para el escenario de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 presenta una estacionalidad marcada que coincide con la época seca y de lluvia, esto implica que la variabilidad interanual está influenciada por los patrones de precipitación y temperatura, aunque ambas presentando un ligero incremento en la producción de caudales, el escenario RCP 8.5 tiene mayor presencia de valores atípicos que alcanzan su pico entre el mes de enero, febrero y abril, lo que significa

eventos extremos, debido al aumento de evapotranspiración y el deshielo de los cuerpos de agua congelados.

- Las acciones desarrolladas para la gestión del agua y la resiliencia ante inundaciones, sequías y deterioro de la calidad hídrica muestran un enfoque integral y coordinado, lo cual se efectuó una combinación de soluciones basadas en infraestructura verde, tratamiento y reúso de agua, control de sedimentos y erosión, riego eficiente, sistemas de alerta temprana y conservación de ecosistemas que permitieron contribuir en la disminución de los riesgos, y protegiendo los servicios ambientales. Por tanto, la regulación de caudales ecológicos, los fondos de agua y la operación conjunta de presas y drenajes permiten fortalecer la sostenibilidad y la eficiencia de largo plazo, además, la integración de información y monitoreo continuo permiten tomar decisiones más rápidas y fundamentadas.

5.2 Recomendaciones

- Los modelos digitales de elevación son indispensables para la delimitación de las subcuencas y las redes de drenaje, a su vez las unidades de respuesta hidrológica también dependen de este insumo, por lo que contar con modelos digitales de elevación a menor escala, mejora la precisión del enrutamiento de caudales, es imprescindible que cada pixel del modelo de

elevación tenga información, ya que los vacíos pueden afectar en definir las unidades de respuesta hidrológica.

- Si bien el uso de suelo y cobertura vegetal son archivos certificados por el MAG, la homologación de la data para la lectura SWAT debe hacerse con la asistencia de profesionales en la rama de agricultura, agroforestales, ambientales, con la finalidad de que la homologación sea objetiva.
- La información climatológica e hidrológica debe pasar por procesos de análisis y calificación, ya que esto evita errores en los procesos más avanzados del desarrollo del modelo, esto se refleja en un ahorro de tiempo.
- Una lectura extensiva y asistencia de académicos en el área, ya que el desconocimiento de algunas métricas con sus respectivos valores puede llevar a cometer errores graves.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Armenta Porras, G. E., & Villa Cedeño, J. L. (2016). *Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático*. Quito - Ecuador.
- Ballesteros Cánovas., Tasaduq Koul., Ahmad Bashir., Jose Maria Bodoque del Pozo., Simon Allen., Sebastien Guillet, Irfan Rashid, Shabeer H. Alamgir, Mutayib Shah, M. Sultan Bhat, Akhtar Alam, Markus Stoffel,. (2020). Los recientes riesgos de inundaciones en Cachemira se ponen en contexto con registros históricos y de anillos de árboles de un milenio de duración. *Ciencia del medio ambiente total*, 722. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137875>
- Basso y Cammarano. (2023). Advanced hydrological assessment with SWAT+ under climate change. *Science of The Total Environment*, 161614. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161614>
- Bates, B. Z. (2008). *El cambio climático y el agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC*. Ginebra: IPCC.
- Cabezas, F. (2015). Tesis doctoral. *Análisis estructural de Modelos Hidrológicos y de Sistemas de Recursos Hídricos en Zonas Semiáridas, Murcia*. Murcia, España.
- CEPAL. (2018). *Proceso regional de las Américas: Foro mundial del agua 2018*. BID.

- Chacón. (2021). *Estimación de la vulnerabilidad ambiental en la cuenca hidrográfica del Guayas mediante Sistemas de Información Geográfica*. Obtenido de <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/CHACON%20CRUZ%20YESICA.pdf>
- Chacón, C. (2021). *ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL GUAYAS, MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*. Obtenido de <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/CHACON%20CRUZ%20YESICA.pdf>
- CIAT. (5 de Mayo de 2019). *Soil and Water Assessment Tool*. Obtenido de SWAT: <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- ENDESA. (2018). *Guía de buenas prácticas para la gestión de CO2 en la empresa*. Ginebra: IPCC.
- Fowler, K., Hughes, J., Trotter, L., Neal, B., Cartwright, I. & Nathan, R. (2022). Explaining changes in rainfall–runoff relationships during and after Australia's Millennium Drought: A community perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(9), 6073–6120. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-26-6073-2022>
- Galván, G. (2011). Trabajo de grado presentado como requerimiento parcial para obtener el título de Doctor. *Modelización hidrológica del río Odiel: aplicación al estudio de la contaminación por drenaje ácido de minas*. Huelva, Huelva, México: Universidad de Huelva.

- Gassman et al. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211–1250. doi:<https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Mocache. (2020). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Cantón Mocache 2020*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/289611457/15022013-163123-plan-de-Desarrollo-y-Ordenamiento-Territorial-Del-Canton-Mocache-Definitivo>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Vinces. (2020). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Cantón Vinces 2020*. Obtenido de <https://www.vinces.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/Plan-de-Desarrollo-y-Ordenamiento-Territorial-2020.pdf>
- Gómez, C. &. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5-20.
- Hanlin Yin., Xiuwei Zhang., Fandu Wang., Yanning Zhang., Runliang Xia y Jin Jin,. (2021). Modelado de precipitación-escurrimiento mediante un modelo de secuencia a secuencia de vectores multietapas basado en LSTM. *Revista de Hidrología*, 598. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126378>
- Hanlin Yin., Xiuwei Zhang., Fandu Wang., Yanning Zhang., Runliang Xia. y Jin Jin. (2021). Modelado de precipitación-escurrimiento mediante un modelo de secuencia

- a secuencia de vectores multiestado basado en LSTM. *Revista de Hidrología*, 598.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126378>
- Hurtado. (2012). *Fondo de agua para la Cuenca del Guayas*. Obtenido de <https://www.proyectolafuente.org/wp-content/uploads/2021/11/Propuesta-de-un-fondo-de-agua-para-la-cuenca-del-ri%CC%81o-Guayas-1.pdf>
- Hurtado, J. &. (2015). Aplicación del modelo hidrológico SWAT(SOIL&WATER ASSESSMENT TOOL) para el análisis del caudal de escorrentía superficial de la cuenca hidrográfica del río las Juntas. *GEOESPACIAL*, 106-122.
- Ilbay, M., Ilbay, F., Zubieta, R., García-Mora, M. y Chasi, P. (2021). Impacts of climate change on the precipitation and streamflow regimes in equatorial regions: Guayas River Basin. *Water*, 13(21). doi:<https://doi.org/10.3390/w13213138>
- IPCC. (2021). *IPCC Sixth Assessment Report*. Obtenido de Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Climate Change 2021: The Physical Science Basis
- Jácome. (2023). “*Análisis espacio - temporal del comportamiento de los sedimentos en la cuenca baja del Río Guayas*”. Obtenido de <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/JACOME%20PALACIOS%20PAOLA%20GABRIELA.pdf>
- Jodar, A. R. (2018). Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrográfica en régimen natural (SE, España) usando SWAT. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 240-253.

- Juan Antonio Ballesteros-Cánovas, Tasaduq Koul, Ahmad Bashir, Jose Maria Bodoque del Pozo, Simon Allen y Sebastien Guillet,. (2020). Los recientes riesgos de inundaciones en Cachemira se ponen en contexto con registros históricos y de anillos de árboles de un milenio de duración. *Ciencias del medio ambiente total*, 722. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137875>
- Li, J., Zhang, X. & Wang, D. (2023). Research on the future climate change and runoff in the Yi Luo River basin using the SWAT model. *Science of the Total Environment*, 858. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159567>
- Liang, K.& Liu, C. (2020). Simulating the change of precipitation-runoff relationship during drought years in the eastern monsoon region of China. *Science of The Total Environment*, 723. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138172>
- MAE. (2017). *Tercera Comunicación Nacional del Ecuador a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Dirección Nacional de Mitigación al Cambio Climático y Dirección Nacional de Adaptación al Cambio Climático.
- Morales, Y. (2016). Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Forestal. En Y. Morales, *Modelación del efecto del cambio de uso del suelo en la cuenca del río Cuello, bajo escenario de Cambio Climático, a través de la aplicación del modelo hidrológico SWAT(Soil and Water Assessment Tool)* (págs. 21 - 111). Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

- Muñoz et al. (2020). Uso agrícola del suelo y demanda de agua para riego en la cuenca del río Vinces (Ecuador) durante el período 1990–2014. *Investigaciones Geográficas*, 59, 91–104. doi:<https://doi.org/10.5354/0719-5370.2020.56958>
- Neitsch, S. A. (2005). Soil and Water Assessment Too. *Theorical documentation.*, 191 - 193.
- ONU-AGUA. (2019). *Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el cambio climático y el agua*. SWEDEN: UNWATER.
- Orkodjo, T. y Kranjac, B. (2022). Impact of climate change on future precipitation amounts, seasonal distribution, and streamflow in the Omo-Gibe basin, Ethiopia. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1), 1-15. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-021-16791-2>
- Overton, D. (1966). Muskingum flood routing of upland streamflow. *Journall of Hydrology.*, 185 - 200.
- Salazar. (2000). *Estudio económico- ambiental del sistema de cultivo del mango en la región de la Sub cuenca del río Daule*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3506/2/T-20008.pdf>
- SENAGUA. (2017). *Secretaria del agua, Empresa pública del agua, Agencia de regulación y control del agua*. Quito: DIGI.
- SWAT. (28 de Agosto de 2024). *Soil and Water Assessment Tool*. Obtenido de Soil and Water Assessment Tool: <https://swat.tamu.edu/software/arcswat/>

SWAT. (8 de Octubre de 2021). *Soil and Water Assessment Tools*. Obtenido de Soil and Water Assessment Tools: <https://swat.tamu.edu/media/69419/Appendix-A.pdf>

Tapia. (2012). Obtenido de https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/23364/Cap%C3%ADtulo_3_-_Caracterizaci%C3%B3n_de_la_cuenca_del_R%C3%ADo_Guayas.pdf

Tapia, C. (Marzo de 2012). Tesis de maestría en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas; Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de la Plata. *Modelización hidrológica de un área experimental en la cuenca del río Guayas en la producción de caudales y sedimentos*. La Plata, Argentina.

Tapia, J. (2012). *Modelización hidrológica de un área experimental en la cuenca del Río Guayas en la producción de caudales y sedimentos*. Argentina: Universidad de la Plata.

Universidad Nacional del Sur. (2022). Obtenido de <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/>

Universidad Politécnica de Cartagena. (2021). *Impacto del cambio climático en la seguridad alimentaria de climas tropicales. Aplicación a la demarcación hidrográfica de manabí - ecuador*. Obtenido de <https://portalinvestigacion.upct.es/documentos/618218b6cee94b5c72aff39a>

USGS. (29 de Mayo de 2020). *Science for a changing world*. Obtenido de Water Science School: The Water Cycle: <https://www.usgs.gov/special-topic/water-science->

school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-

science_center_objects=0#qt-science_center_objects

Villacrés, C. (2015). Tesis de grado previa a la obtención del título de ingeniero agrónomo, de la Universidad Central del Ecuador. En C. Villacrés, *Modelamiento de la microcuenca del río del Alumbre con la utilización del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool - SWAT, Bolívar* (págs. 32 - 141). Quito : Universidad Central del Ecuador.

Yeste et al. (2024). Projected hydrologic changes over the north of the Iberian Peninsula using a Euro-CORDEX multi-model ensemble. *Hydrology Research*, 55(1), 1–19.
doi:<https://doi.org/10.2166/nh.2024.123>

Zhiña, D., Mora, D. E., & Celleri, R. (2019). Climate change influences of temporal and spatial drought variation in the Andean high mountain basin. *Water*, 11(4), 726.
doi:<https://doi.org/10.3390/w11040726>

ANEXOS

Anexo 2 Homologación del uso de suelo para lectura SWAT

Codigo SWAT	Descripción	Uso de suelo y cobertura vegetal
AGRC	Cultivos pequeños	Achotillo, Ajonjolí, arveja, cacao, chocho, frutilla, guanábana, haba, jengibre, macadamia, malanga, maní, mora, naranjilla, pepinillo, pepino dulce, soya, tomate de árbol, tomate riñón, yuca y zapallo.
AGRL	Cultivos genéricos	Mosaico agropecuario, condimentos entre otros
AGRR	Cultivos en fila	Matorral húmedo medianamente alterado, matorral húmedo muy alterado, matorral seco medianamente alterado, matorral seco muy alterado y matorral seco poco alterado.
ALFA	Alfalfa	Pastizal alfalfa
BANA	Banano	Plantaciones de banano
BARR	Suelo estéril	Afloramientos rocosos, área en proceso de erosión, área erosionada, bancos de arena y barbechos.
COCO	Coco	Plantaciones de coco
COFF	Café	Plantaciones de café
CORN	Maíz	Plantaciones de maíz
CRRT	Zanahoria	Plantaciones de zanahoria
DWHT	Trigo duro	Trigo y cereal

EUCA	Eucalipto	Plantaciones de eucalipto
		Bosque húmedo, bosque húmedo medianamente alterado, bosque húmedo muy alterado, bosque húmedo poco alterado, bosque nativo, bosque seco
FRSE	Bosque siempre verde	medianamente alterado, bosque seco muy alterado, bosque seco poco alterado, cedro, ciruelo, mandarina, maracuyá, pachaco, pitahaya, samán, terminalia y zapote.
		Vegetación arbustiva húmeda, vegetación arbustiva seca, vegetación herbácea, vegetación herbácea de altura, vegetación herbácea de humedal, vegetación herbácea de humedal medianamente alterada, vegetación herbácea de humedal muy alterada, vegetación herbácea húmeda, vegetación herbácea húmeda muy alterada, vegetación herbácea seca, vegetación herbácea medianamente alterada y vegetación herbácea seca muy alterada,
FRST	Bosque mixto	
HMEL	Melón	Plantaciones de melón
LENT	Lenteja	Plantaciones de lenteja
LIMA	Frijoles	Plantaciones de frijoles
OATS	Avena	Plantaciones de avena
OILP	Aceite de palma	Palma africana y palmito
ORAN	Naranja	Plantaciones de naranja

PAPA	Papaya	Plantaciones de papaya
PAST	Pastos	Pastos para forraje
PINE	Pino	Plantaciones de pino
PINP	Piña	Plantaciones de piña
RICE	Arroz	Plantaciones de arroz
RNGE	Pasto	Pastos cultivados, pastos con presencia de árboles, pastos con presencia de maíz y vicia.
RUBR	Árbol de goma	Plantaciones de árbol de goma
SUGC	Caña de azúcar	Plantaciones de caña de azúcar
SWHT	Trigo de primavera	Plantaciones de trigo
TOBC	Tabaco	Plantaciones de tabaco
URBN	Sitios urbanizados	Áreas de asentamientos urbanos
WATR	Cuerpos de agua	Áreas ocupadas por cuerpos de agua
WMEL	Sandía	Plantaciones de sandía

Fuente: Model Swat Data Base (SWAT., 2021)

Anexo 2 Homologación del tipo de suelo para lectura SWAT

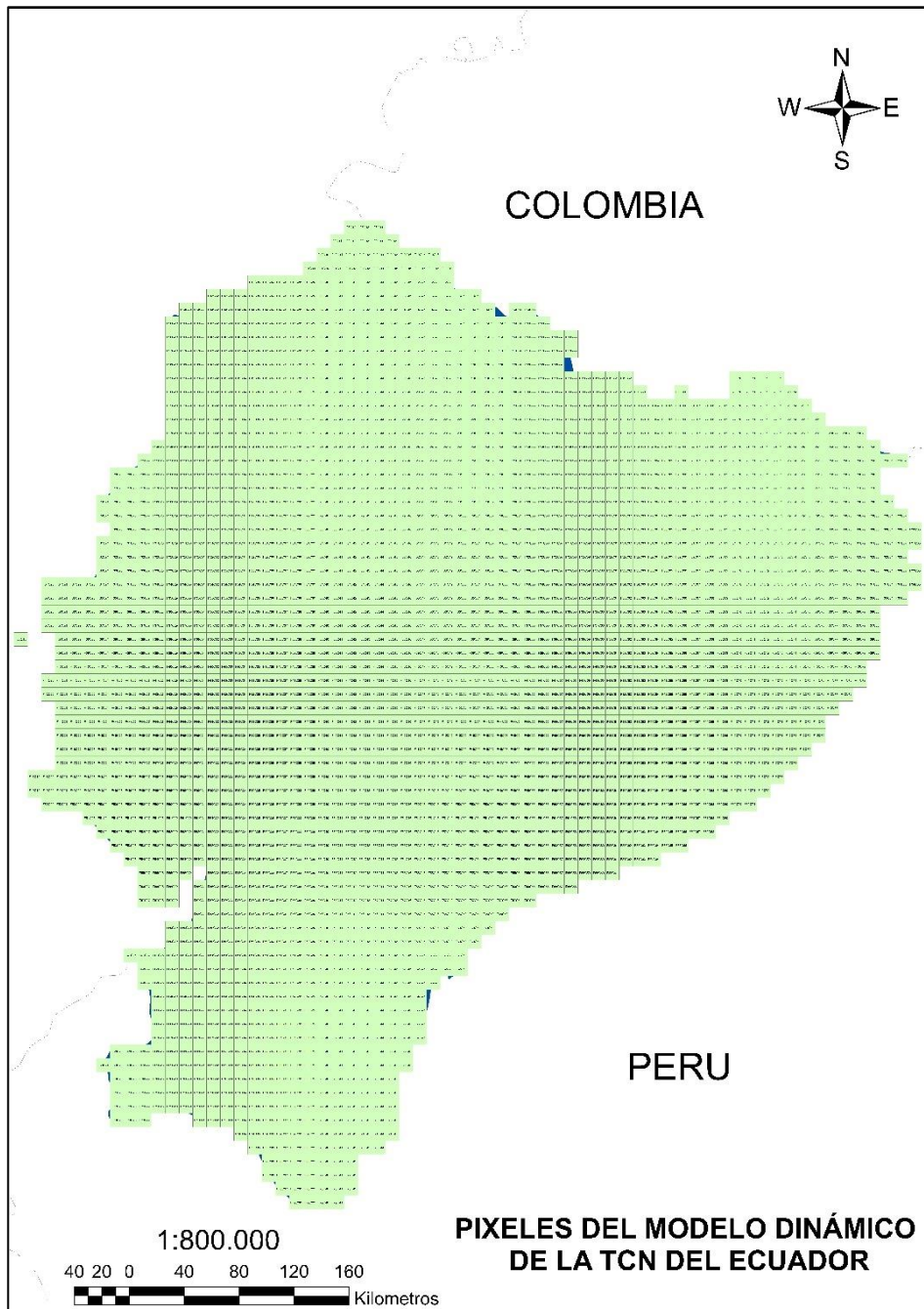
Tipo de suelo FAO	Lectura SWAT	Ponderación
Umbric leptosols	Lpu	16196
Haplic Phaeozems	Phh	16197
Vetric Andosols	Anz	16198
Umbric Andosols	Anu	16200
Umbric Andosols	Anub	16206
Vertic Luvisols	Lvf	16210
Haplic Andosols	Anh	16211
Eutric Cambisols	Cme	16212
Vertic luvisols	Lvv	16213
Eutric Fluvisols	Fle	16214
Haplic Luvisols	Lvh	16216
Luvis Phaeozems	Phl	16217
Vertic Luvisols	Lvfb	16218
Thionic Fluvisols	Flt	16219

Fuente: Model Swat Data Base (SWAT., 2021)

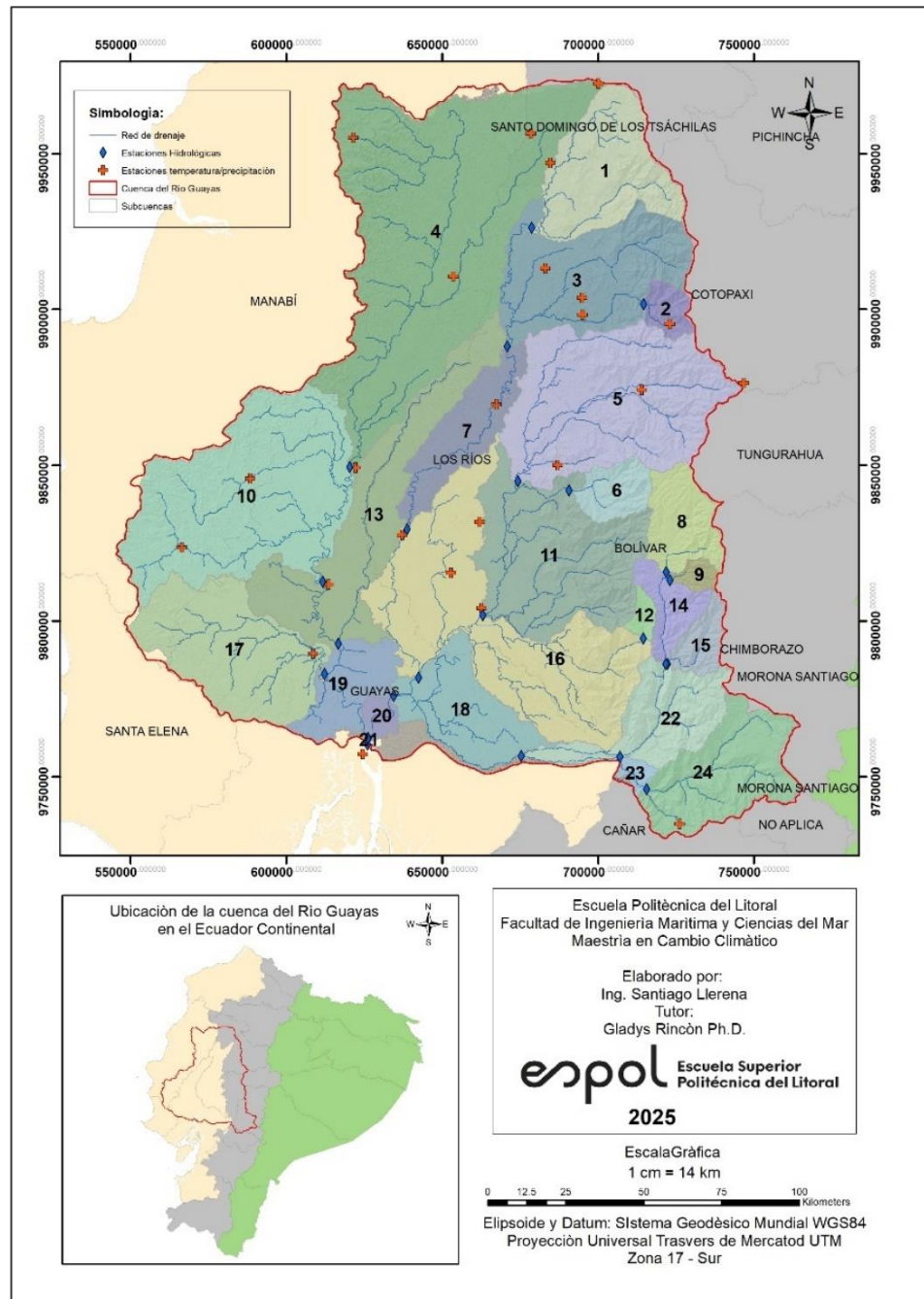
Anexo 2 Ficha técnica para la extracción de escenarios de cambio

		Fecha (dd/mm/aaa)	20	05
DATOS GENERALES				
Elaborado por		Equipo técnico Subsecretaría de Cambio Climático		
Dirección		Dirección Nacional de Adaptación al Cambio Climático		
CONTENIDO DEL INFORME				
Tema		Proyecciones Climáticas Nacionales – Downscaling Dinámico		
Antecedentes		Dentro de los compromisos que tiene el país ante la Convención Marco de las Naciones sobre cambio climático (CMUNCC), es generar información que permita reducir las brechas de conocimiento, ante esta necesidad el país ha realizado un gran esfuerzo para desarrollar proyecciones climáticas de acuerdo con los escenarios del AR5. Esta información se la presentó como producto de la Tercera Comunicación Nacional (TCN) donde se logra la reducción de escala de los modelos climáticos globales a un tamaño de celdas de 10 X 10 km), en la que contiene las series meteorológicas históricas y proyectados.		
Temporalidad		1985 – 2070.		
Escala		Información extraída de pixeles de 10 Km ²		
Parámetros meteorológicos		• Precipitación. • Temperatura máxima. • Temperatura media. • Temperatura mínima.		
Manejo de la información.		La presente base de datos consta de dos carpetas: 1. Información cartográfica. 2. Información climática escenarios futuros e históricos. En la carpeta de “Información cartográfica” podrá encontrar un archivo <i>shapefile</i> de los pixeles de 10 Km² de los cuales se extrajeron los datos de los parámetros meteorológicos: precipitación, temperatura máxima, temperatura media y temperatura mínima para el periodo 1985 – 2070. <i>Grafico 1. Mapa de pixeles con su codificación</i>  El mapa muestra la forma del Ecuador continental, dividido en una cuadrícula de pixeles de 10x10 km, coloreados en verde. Se indican los países vecinos: COLOMBIA al norte y PERU al este. Hay una escala de 1:800,000 y una brújula. El texto "PIXELES DEL MODELO DINÁMICO DE LA TCN DEL ECUADOR" está en la parte inferior derecha del mapa. En la carpeta de “Información climática escenarios futuros e históricos” podrá encontrar archivos de Excel que contienen la información climática correspondiente a los parámetros meteorológicos ya descritos. La codificación de los Excel corresponde a la ubicación de los pixeles con respecto al Ecuador continental.		

Anexo 3 Malla del Ecuador

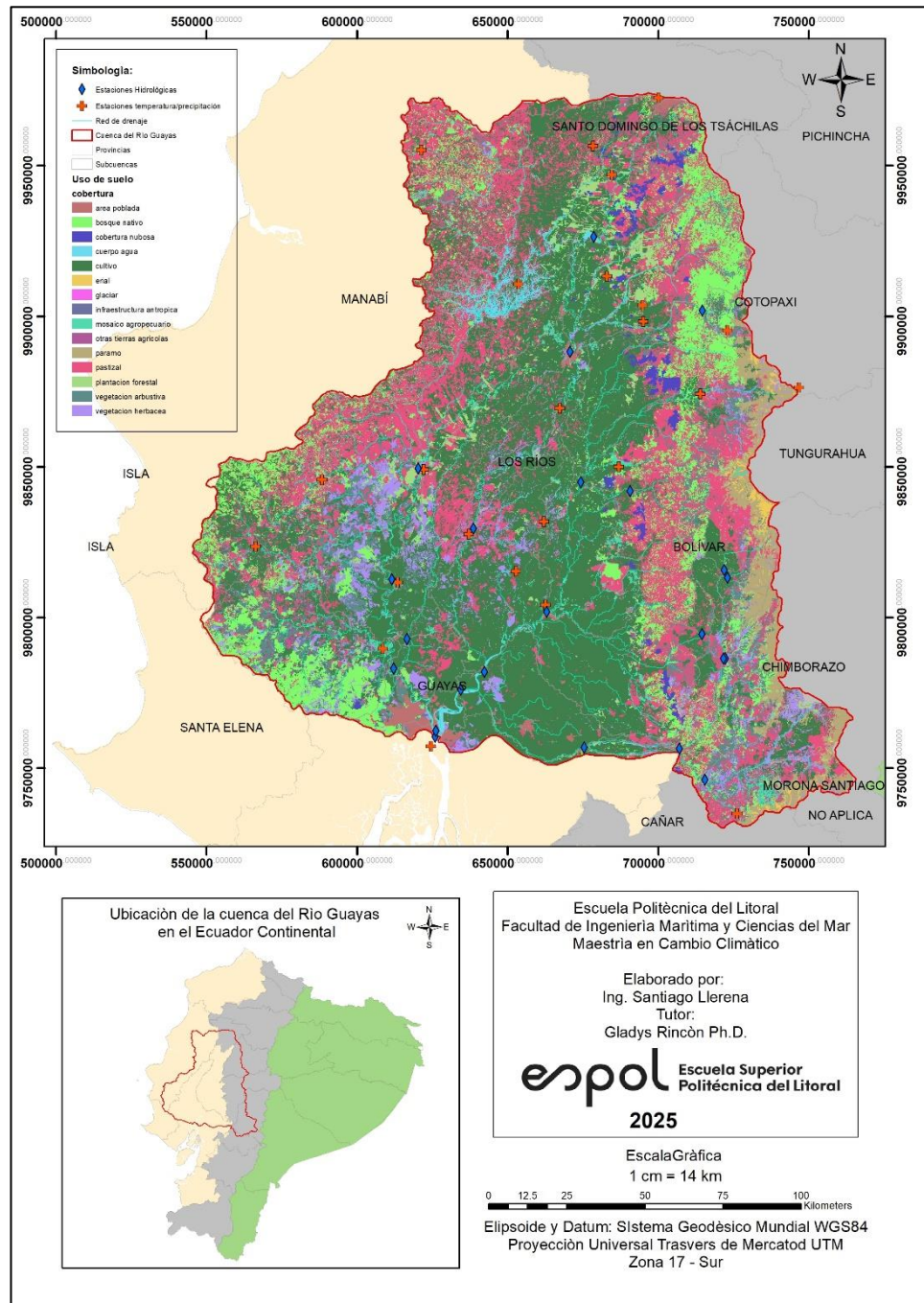


MAPA 1 Subcuencas modelo hidrológico SWAT



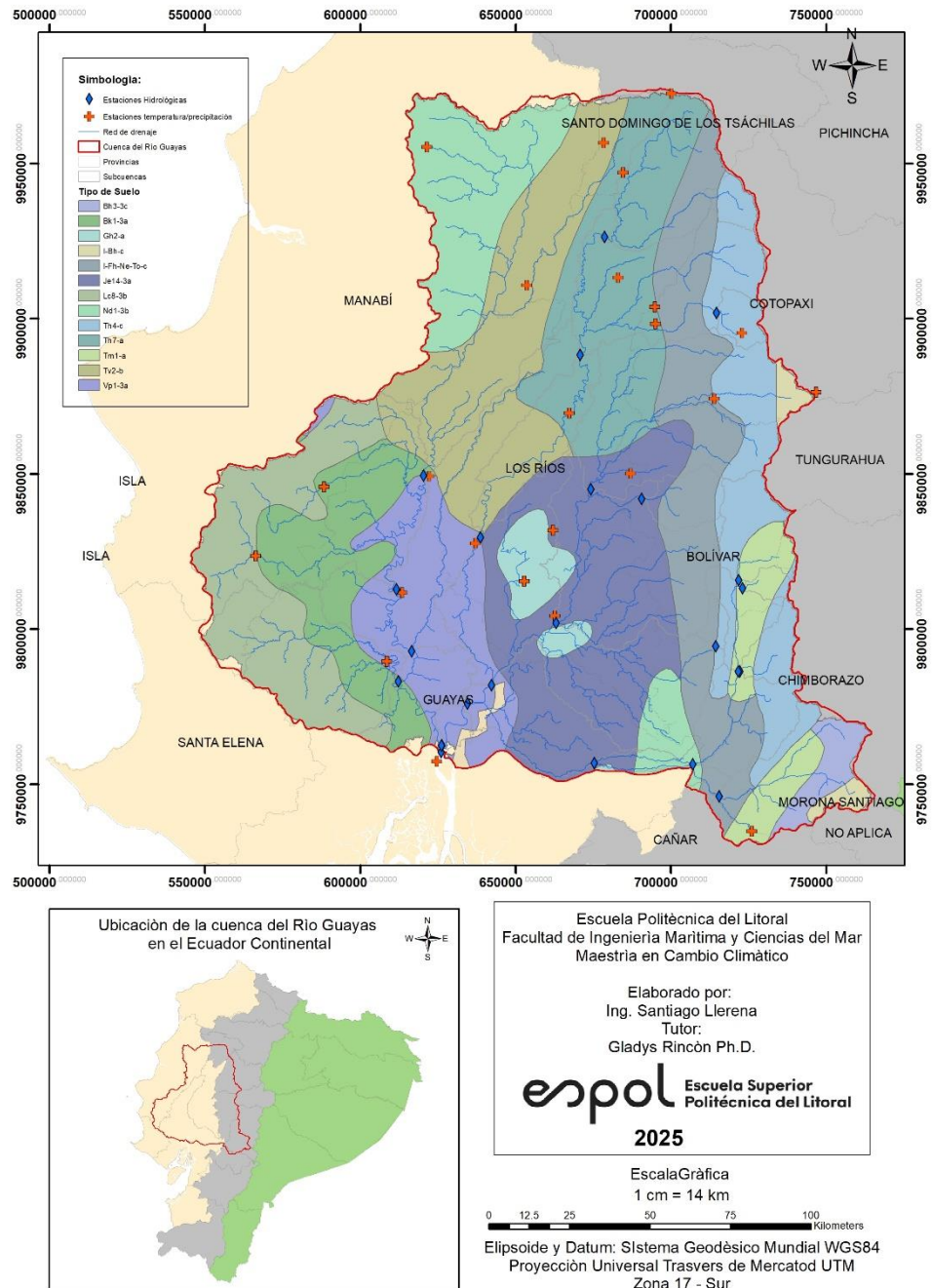
Fuente: Elaboración propia

MAPA 2 Uso de suelo y cobertura vegetal



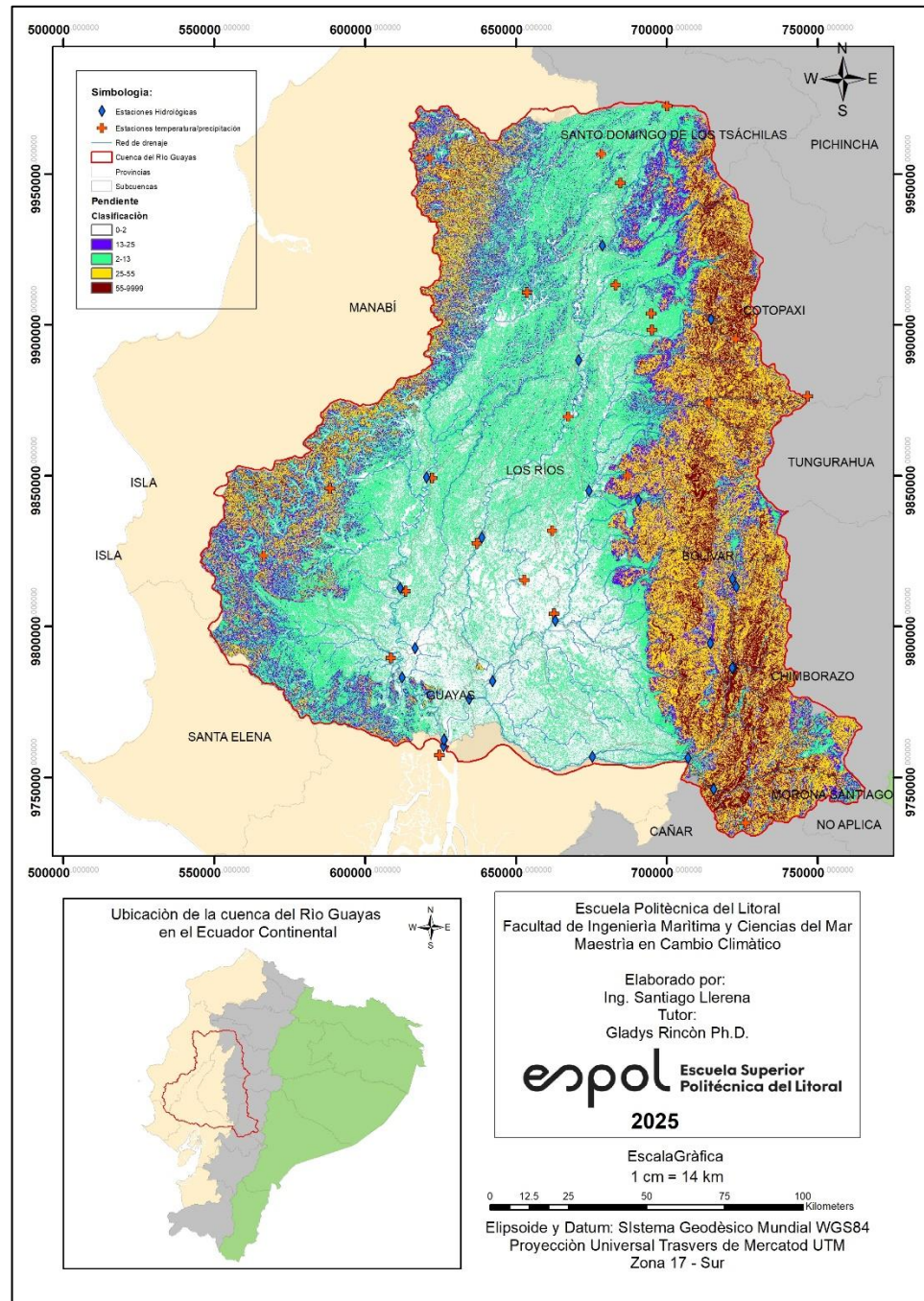
Fuente: Elaboración propia

MAPA 3 Tipo de suelo



Fuente: Elaboración propia

MAPA 4 Clasificación de pendientes



Fuente: Elaboración propia