



Doi: <https://doi.org/10.70577/asce.v5i2.930>

Recibido: 2026-03-27

Aceptado: 2026-04-15

Publicado: 2026-06-16

Caracterización hidrológica y modelación de escenarios de cambio climático en la microcuenca del río Puela, provincia de Chimborazo

Hydrological characterization and modeling of climate change scenarios in the Puela river micro-basin, Chimborazo province

Autor(s)

Nelson Estuardo Patiño Vaca ¹

Maestría en Hidráulica

NEPATINO@pucesm.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0006-3492-7092>

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Manabí – Ecuador

Luis Eduardo Pineda Ordóñez ²

Maestría en Hidráulica

lpineda@pucesm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4089-5094>

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Manabí – Ecuador

Jesús Enrique Chavarría Párraga ³

Maestría en Hidráulica

jechavarría@pucesm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-8868-394X>

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Manabí – Ecuador

Jimmy Leandro Reyes Zambrano ⁴

Maestría en Hidráulica

jlreyesz@pucesm.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0002-0962-519X>

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Manabí – Ecuador

Como Citar

Patiño Vaca. N. E. &, Pineda Ordóñez. L. E. &, Chavarría Párraga. J. E. &, Reyes Zambrano. J. L. (2026) Caracterización hidrológica y modelación de escenarios de cambio climático en la microcuenca del río Puela, provincia de Chimborazo ASCE MAGAZINE 5(2) 3250-3276 <https://doi.org/10.70577/asce.v5i2.930>



Resumen

Los recursos hídricos en la región andina enfrentan desafíos crecientes debido a la presión antrópica y las alteraciones en el uso del suelo. En este contexto, el presente estudio se enfocó en la caracterización hidrológica y la proyección de escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y 8.5) para la microcuenca del río Puela, ubicada en la subcuenca del río Chambo (Chimborazo, Ecuador). Mediante el modelo Hydro-BID y tras integrar registros del INAMHI con la base analítica AHD y proyecciones de la plataforma S-PRACC, se logró una simulación geoespacial detallada, apoyada en herramientas como QGIS. El proceso metodológico abarcó desde la parametrización técnica hasta la validación del modelo, permitiendo proyectar caudales para los horizontes 2011-2040 y 2041-2070. Los hallazgos revelan un desempeño aceptable del modelo, con un coeficiente NSE de 0.54 y una correlación r de 0.68, logrando representar un caudal promedio anual de $11.44 \text{ m}^3/\text{s}$. Es notable que las proyecciones sugieren un incremento hídrico progresivo, especialmente crítico bajo el escenario RCP 8.5 (período 2041-2070), donde los caudales en épocas secas podrían aumentar hasta en un 22.3%, con variaciones anuales entre el 10% y el 32%.

Palabras clave: Simulación, Caudales, Cambio climático.



Abstract

Water resources across the Andean región are under mounting pressure from both population growth and shifting land-use patterns. Addressing these challenges, this study characterizes the hydrology and projects future climate changes impacts (RCP 4.5 and 8.5) within the Puela River micro-basin, located in the Chambo River sub-basin (Chimborazo, Ecuador). By implementing the Hydro-BID model and integrating INAMHI records with de AHD Analytical base and S-PRACC platform projections, we developed and detailed geospatial simulation utilizing QGIS tools. The methodology spanned from technical parameterization to model validation, enabling streamflow projections for the 2011-2040 and 2041-2070 horizons. Results indicate an acceptable model performance, evidenced by an NSE of 0.54 and a correlation coefficient (r) of 0.68, with a mean annual flow of 11.44 m³/s. Notably, the projections suggest a progressive increase in water availability; this trend is most pronounced under the RCP 8.5 scenario for 2041-2070, where dry-season flows could rise by up to 22.3%, with annual fluctuations ranging between 10% and 32%.

Keywords: Simulation, Streamflow, Climate Change.

Introducción

La disponibilidad de agua dulce a nivel global enfrenta una presión creciente asociada al aumento sostenido de la población y al acelerado desarrollo socioeconómico (Wang & Yan, 2017). Este escenario ha intensificado el estrés hídrico, provocando impactos significativos sobre el clima, particularmente a través de alteraciones en la humedad del suelo y en los procesos de evapotranspiración (Dirmeyer, 2011). Asimismo, los cambios en el uso del suelo en las zonas altas de las cuencas hidrográficas influyen de manera directa en el escurrimiento superficial y en la calidad del agua que se transporta hacia las áreas bajas. En conjunto estos procesos físicos y químicos interactúan dentro del sistema hidrológico de una cuenca, condicionando su dinámica y funcionamiento integral (Freeman et al., 2007).

Ecuador, al estar ubicado en la cordillera de los Andes, experimenta un efecto de apantallamiento orográfico que influye en su régimen de precipitaciones, con acumulaciones anuales que superan los 1,600 mm, especialmente en la región amazónica. Esta condición, junto con su diversidad geográfica organizada en las regiones Costa, Sierra, Oriente e Insular, favorece el desarrollo de una extensa red hidrográfica, caracterizada por ríos representativos en las vertientes del Pacífico y del Amazonas (Campos et al., 2016)

Para mejorar la gestión del recurso hídrico en América Latina y el Caribe, el Banco Interamericano de Desarrollo impulsó la plataforma de simulación Hydro-BID, que permite estimar la disponibilidad hídrica bajo distintos escenarios como cambio climático, crecimiento poblacional y cambios en el uso del suelo (Banco Interamericano de Desarrollo, 2023)

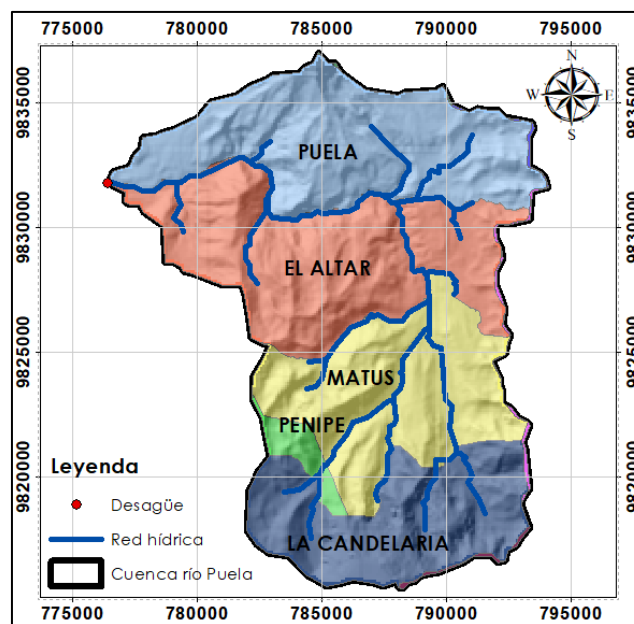
La microcuenca del río Puela está conformada por ecosistemas altoandinos como páramo, bosque nativo y vegetación arbustiva, en un territorio donde predominan actividades agrícolas y ganaderas (GAD Penipe, 2023). El impacto de lluvias extremas en junio de 2024 (La Prensa, 2024) subrayó la fragilidad de la infraestructura actual y la falta de planes de contingencia sólidos. Esta realidad impulsa el presente estudio, el cual busca caracterizar hidrológicamente la microcuenca del río Puela (subcuenca del río Chambo). Mediante la implementación de Hydro-BID, se integrarán variables de precipitación, temperatura y caudal no solo para definir el balance hídrico actual, sino para anticipar cómo el cambio climático alterará estos escenarios en el futuro.

Material y métodos

Localización

La microcuenca del río Puela ocupa gran parte del territorio del cantón Penipe, provincia de Chimborazo. Forma parte de la cuenca 2876 del río Pastaza y cuenta con el código Pfafstetter de nivel 6: 499683, correspondiente a la demarcación Hidrográfica del Pastaza (UICN, 2009)

Figura 1. Localización de la cuenca del río Puela



Fuente: Autores

El río Puela, que drena las aguas provenientes de las estribaciones del volcán Tungurahua, asociado al nevado El Altar, se forma por la confluencia de los ríos Naranjal y Tiacos. Su cauce de aproximadamente 9 m de ancho, presenta aguas cristalinas y torrentosas, con caudales que aumentan entre 15 a 20 m³/s durante la temporada de lluvias. La microcuenca se sitúa entre 2300 y 3300 msnm., con temperaturas de 13 a 15 °C y precipitación anual de 500 a 1000 mm. (GAD Penipe, n.d.)

Metodología.

Par este estudio se utilizó un enfoque exploratorio y descriptivo, que permitió inicialmente comprender mejor el tema y luego describir sus principales características. Se desarrolló en tres fases metodológicas, la primera correspondió a la delimitación y caracterización de la

microcuenca. La segunda fase comprendió la selección de las estaciones climatológicas, así como la recopilación, depuración y complementación de registros de temperatura y precipitación. Finalmente, la tercera estuvo orientada a la estructuración y parametrización, calibración y validación de datos y la simulación de caudales futuros bajo distintos escenarios de cambio climático.

Delimitación de la microcuenca y determinación de subcuencas subdrenantes.

Esta fase inicia con la georreferenciación de la estación hidrométrica y posteriormente a partir de la información de la Base de datos de hidrología analítica para América latina y el Caribe (AHD) que funciona como una plataforma regional de aguas superficiales que incorpora 193,000 cuencas y segmentos fluviales (Rineer et al., 2014), se delimita la cuenca, permitiendo determinar el número de subcuencas drenantes (catchments) y asignar el código COMID de la unidad hidrológica, el cual constituye el identificador único de cada segmento de río y su respectiva subcuenca. Dicho código se utiliza para definir la subcuenca que será utilizada en la modelación hidrológica mediante Hydro-BID (Florián Hernández, 2023).

Una vez identificadas las subcuencas drenantes de la microcuenca, con la base de datos AHD se determinan los centroides de cada una de las subcuencas, información que luego es utilizada para la interpolación de datos climáticos.

Preparación de datos.

El modelo Hydro-BID utiliza como información de entrada series diarias de precipitación y temperatura media de la cuenca. Estas series se obtienen a partir de los registros observados en estaciones meteorológicas específicas (Arbuet et al., 2021). En la zona de estudio se dispone de información hidrometeorológica proveniente del Instituto de Meteorología e Hidrología (INAMHI). La selección de las estaciones se realizó teniendo en cuenta su ubicación geográfica, la duración de los registros, así como la cantidad y calidad de la información recopilada. Se identificaron siete estaciones climatológicas y una estación hidrométrica, las mismas que se detallan en las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Estaciones climatológicas

Código	Nombre	Latitud S	Longitud W	Elevación (msnm)	Período Precipitación	Período Temperatura
M1036	Riobamba	-1.6508333	-78.6852139	2850	2006 - 2014	2006 - 2014
M0258	Querochaca	-1.3671111	-78.6055000	2865	2006 - 2014	2006 - 2014
M0408	Guano	-1.6091667	-78.6352778	2620	2006 - 2014	-
M0380	Huambaló	-1.3907222	-78.5309333	2880	2006 - 2014	-
M0376	Pilahuín	-1.3045278	-78.2328056	3314	2006 - 2014	-
M0041	Sangay	-1.6908333	-77.9586111	880	2006 - 2014	-
M0029	Baños	-1.3913889	-78.5283333	1695	2006 - 2014	2006 - 2014

Fuente: (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2017)

Tabla 2. Estaciones hidrológicas

Código	Nombre	Latitud S	Longitud W	Elevación (msnm)	Período de registro
H0788	Puela A.J. Chambo	-1.512222	-78.474723	2475	2006 - 2014

Fuente: (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2015)

Relleno de datos.

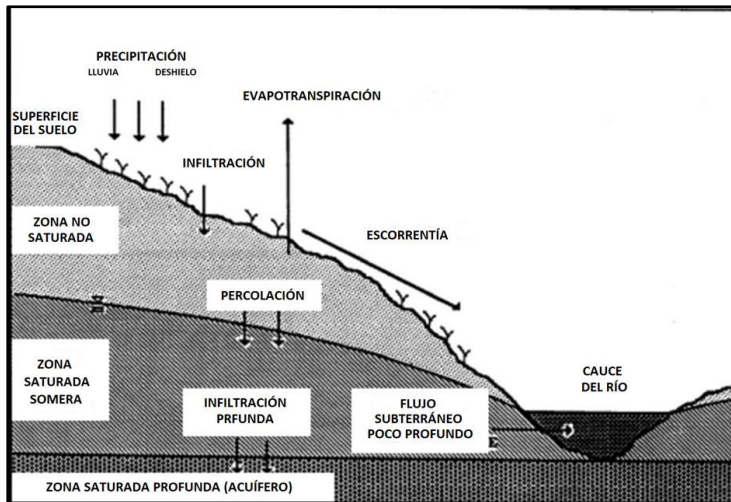
La escasez de datos en estaciones meteorológicas dificulta los estudios hidrológicos, por lo que se utilizan estimaciones a partir de estaciones cercanas con información más completa. Para el relleno se utilizó el método de ponderación por el inverso del cuadrado de la distancia, también conocido como el U.S. National Weather Service, y uno de los más empleados en estudios hidrológicos y geográficos (Ramírez-Cruz et al., 2015). Este enfoque se seleccionó sobre alternativas como la regresión lineal, porque permite considerar explícitamente la influencia espacial, el peso asignado a la variable climática de una estación para estimar el valor en otro punto disminuye a medida que aumenta la distancia respecto a las estaciones vecinas (Gallegos et al., 2016).

Estructuración de la base de datos.

Hydro-BID utiliza un modelo lluvia-escorrentía basado en el Generalized Watershed Loading Function (GWLf) (Haith et al., 1992), asociado al proceso de Lag-routing, conocido como método de retardo-enrutamiento, el cual permite generar caudales diarios y estimar la

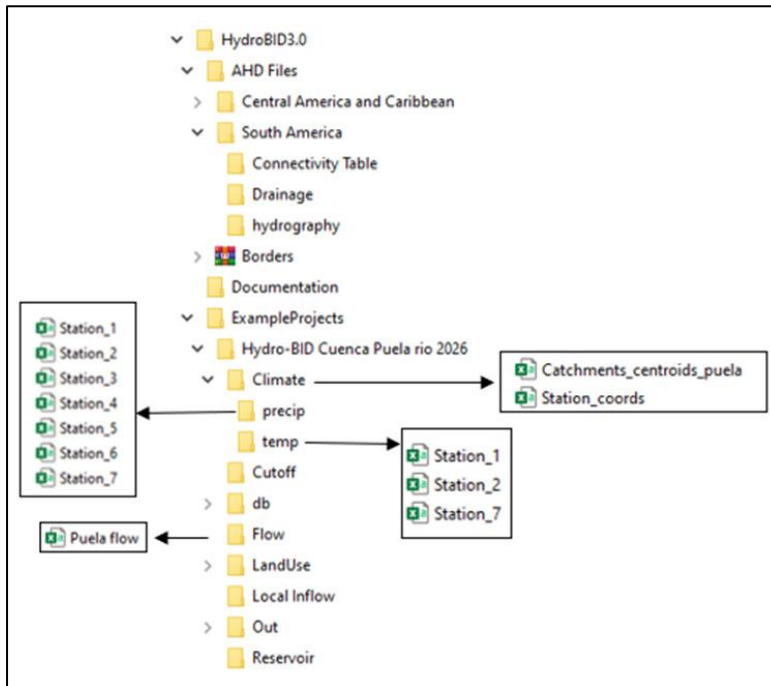
escorrentía considerando procesos como evapotranspiración, infiltración, percolación y almacenamiento del agua en el suelo, logrando en última instancia un balance hídrico en cero (Moreda et al., 2014).

Figura 2. Esquema del modelo lluvia-escorrentía GWLF



Fuente: Adaptado de (Haith et al., 1992)

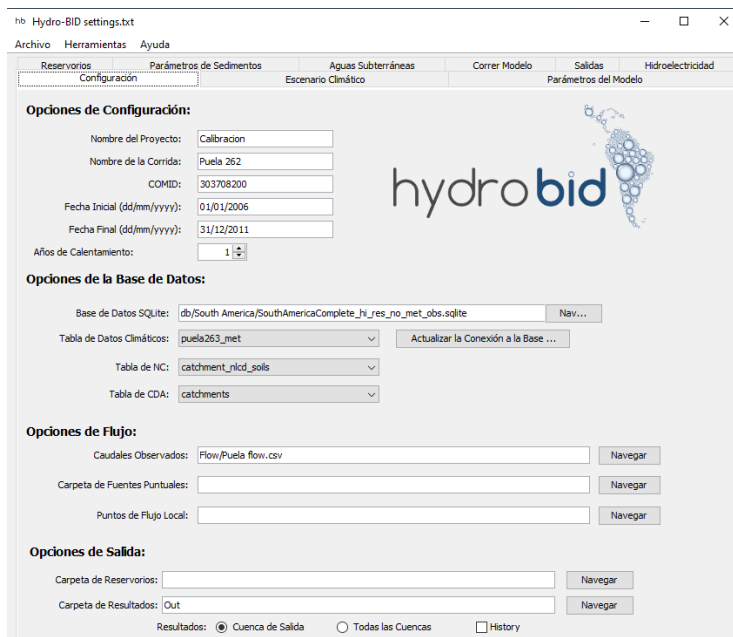
Con los datos de centroides, estaciones y las series de temperatura, precipitación y caudales se organiza la base de datos del modelo en subcarpetas secuenciales, incluyendo la base de datos analítica para su uso en SQLite durante la simulación (Patiño, 2021)

Figura 3. Estructura de la base de datos

Fuente: Autores

Interpolación de datos climáticos.

Luego se interpolan los datos climáticos para cada subcuenca utilizando la herramienta Date interpolating Tool de Hydro-BID, la cual aplica un método de interpolación por distancia inversa (IDW), que integra la información de los centroides, ubicación de las estaciones meteorológicas y datos de temperatura y precipitación, generando así la nueva base de datos climática Puela_met (Leverly et al., 2020). El modelo Hydro-BID utiliza la información climática interpolada para generar los caudales diarios de cada una subcuenca, ingresando en la interfaz los datos de la cuenca, fechas, bases climáticas y de caudales.

Figura 4. Interfaz de inicio Setup, Hydro-BID

Hydro-BID settings.txt

Archivo Herramientas Ayuda

Reservorios Parámetros de Sedimentos Aguas Subterráneas Correr Modelo Salidas Hidroelectricidad

Configuración Escenario Climático Parámetros del Modelo

Opciones de Configuración:

Nombre del Proyecto: Calibracion

Nombre de la Corrida: Puela 262

COMID: 303708200

Fecha Inicial (dd/mm/yyyy): 01/01/2006

Fecha Final (dd/mm/yyyy): 31/12/2011

Años de Calentamiento: 1

Opciones de la Base de Datos:

Base de Datos SQLite: db/South America/SouthAmericaComplete_hi_res_no_met_obs.sqlite Nav...

Tabla de Datos Climáticos: puela263_met Actualizar la Conexión a la Base ...

Tabla de NC: catchment_nlcd_soils

Tabla de CDA: catchments

Opciones de Flujo:

Caudales Observados: Flow/Puela flow.csv Navegar

Carpeta de Fuentes Puntuales: Navegar

Puntos de Flujo Local: Navegar

Opciones de Salida:

Carpeta de Reservorios: Navegar

Carpeta de Resultados: Out Navegar

Resultados: Cuenca de Salida Todas las Cuenas History

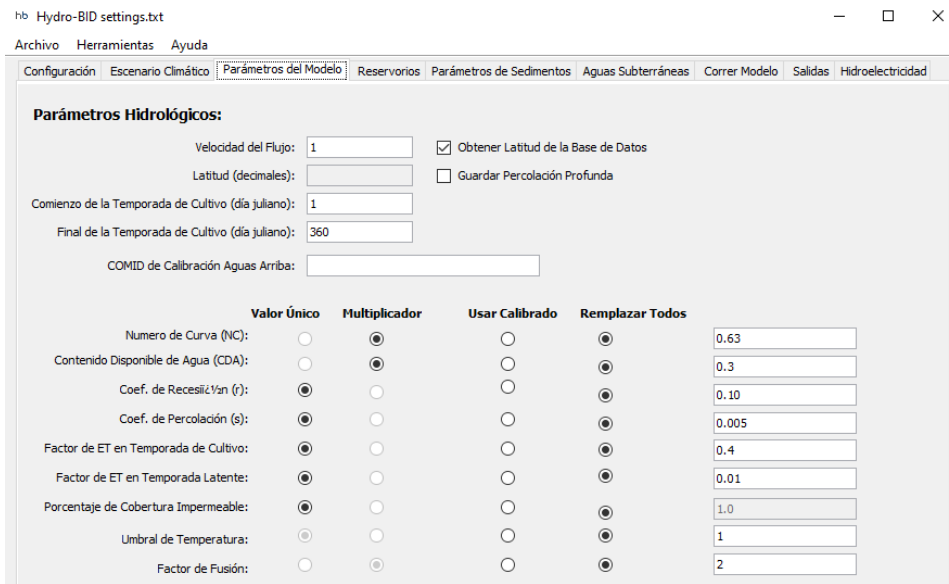
Fuente: Autores

Parametrización del modelo.

El modelo Hydro-BID requiere la definición de parámetros hidrológicos, hidráulicos y de suelo para su correcta aplicación. Algunos de estos parámetros se asignan por defecto a partir de valores predefinidos en la biblioteca interna del modelo, basada en estudios hidrológicos previos y características generales de suelos y cuencas. Otros parámetros en cambio deben ajustarse según las características de la zona de estudio (Levery et al., 2020). Entre estos se incluye la velocidad media del flujo, asociada al tiempo de recorrido del agua en la cuenca, para lo cual se adopta un valor por defecto de 0.5 m/s, susceptible de ser ajustada (Moreda et al., 2014). Asimismo, la latitud es determinada automáticamente por el modelo a partir del centroide de las subcuencas, y para el área de estudio la temporada de cultivo se definió entre los días julianos 290 y 150, en concordancia con el período lluvioso de la región andina (octubre a mayo).

El primer paso consistió en definir los valores de referencia para el modelo. Esto incluyó desde variables hidrológicas como el número de curva y el agua disponible, hasta factores térmicos como el umbral de temperatura y el factor de fusión, pasando por los coeficientes de recesión y percolación. Todos estos elementos se configuraron a través de la interfaz que se muestra en la figura 5.

Figura 5. Interfaz de parametrización del modelo



Fuente: Autores

Calibración del modelo

Una vez definidos los parámetros, se ejecutó la corrida inicial del modelo Hydro-BID con los caudales de la estación H788 Puela AJ Chambo. Los resultados preliminares fueron sometidos a un proceso de calibración manual, ajustando los parámetros hidrológicos e hidráulicos del modelo hasta reproducir aceptablemente los caudales históricos, reduciendo errores e incertidumbres y mejorando la representación de los procesos hidrológicos (Oñate-Valdivieso et al., 2016). La descripción de los parámetros calibrados se detalla en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros utilizados para la calibración de Hydro-BID

Parámetro	Descripción	Rango sugerido
Número de Curva (NC)	Describe como responde el suelo frente al agua en la cuenca., ya sea favoreciendo la escorrentía o la infiltración.	0.80 – 1.00
Contenido Disponible de Agua (CDA)	Representa el agua que el suelo puede almacenar y disponer para las plantas, influyendo en la infiltración hacia el agua subterránea; puede ingresarse como valor directo o multiplicador de la AHD.	0.20 – 1.20
Coefficiente de recesión (r)	Representa la contribución de agua subterráneas someras al caudal superficial después de un evento de lluvia.	0.001 – 0.75

Coefficiente de percolación (s)	de Representa el intercambio entre aguas subterráneas someras y profundas, considerando como una salida del modelo	0.005 – 0.10
Factor ET en temporada de cultivo	Representa al factor de evapotranspiración de las plantas durante la etapa de cultivo	0.50 – 1.50
Factor ET en temporada latente.	Corresponde al factor de evapotranspiración durante el período de latencia.	0.50 – 1.50
Porcentaje de cobertura impermeable	Porcentaje estimado de la superficie impermeable de la cuenca. (fijo)	1.00

Fuente: (Nalesso & Emanuel, 2018)

Hydro-BID evalúa la eficiencia de la simulación mediante parámetros estadísticos que permiten comprobar la correcta calibración del modelo: En la tabla 4 se muestran estos parámetros con sus rangos recomendados.

Tabla 4. Rangos de parámetros estadísticos para calibración del modelo.

Parámetro estadístico de desempeño	Valor recomendado
Error global de volumen (OVE)	Entre – 30% a 30%
Número de correlación (r-)	Cercano a 1
Correlación del modelo (Rmod)	Cercano a 1
Índice de Nash – Sutcliffe (NSE)	Mayor a 0.50

Fuente: (Moreda et al., 2016)

Modelación de caudales futuros a partir de escenarios de cambio climático

El módulo de cambio climático de Hydro-BID permite evaluar cómo las variaciones proyectadas de temperatura y precipitación, asociadas al cambio climático, afectan los flujos diarios de la cuenca. Para la construcción de escenarios climáticos, se utilizaron las proyecciones climáticas oficiales de la plataforma S-PRACC del Ministerio del Ambiente de Ecuador, elaboradas a partir de modelos de circulación global del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados – Fase 5 (CMIP5) y tomando como referencia los escenarios de emisiones de Rutas de Concentración Representativas (RCP) (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2016). Estos escenarios representan los rangos más relevantes para el estudio, ya que en el período 2041 – 2060 se espera que el calentamiento global alcance o

supere los dos grados centígrados, afectando significativamente las variables hidrológicas de interés (IPCC, 2021).

Estas proyecciones con una resolución espacial de 10 km x 10 km y proporcionan series diarias de precipitación y temperatura para el período histórico (1981 – 2005) y para los períodos futuros 2011 – 2040 y 2041 - 2070; para el análisis se seleccionó la celda climática más cercana al punto de interés (-1.5122; -78.4778), que sirvió como referencia para la elaboración de los escenarios hidrológicos. Para adaptarlos al modelo hidrológico Hydro-BID, se compararon las climatologías futuras con la climatología histórica, generando factores de ajuste mensuales:

Para la precipitación, se calculó un factor mensual multiplicativo comparando los valores futuros con los históricos:

$$F_{Pm} = \frac{P_{futura,m}}{P_{hist,m}}$$

Para la temperatura media se calculó la anomalía mensual como la diferencia entre los valores proyectados y los registrados históricamente:

$$\Delta Tm = T_{futur,m} - T_{hist,m}$$

Preparación de escenarios para Hydro-BID

Las Rutas de Concentración Representativas (RCP) son escenarios que consideran la evolución en el tiempo de las emisiones y concentraciones de distintos gases de efecto invernadero, junto con aerosoles y otros compuestos químicos activos, además de los cambios en el uso y la cobertura del suelo (Moss et al., 2010). En este estudio se consideran los escenarios RCP4.5 que plantea una reducción moderada de emisiones y RCP8.5, que representa un escenario de altas emisiones sin control, ambos con diferentes niveles de forzamiento radiactivo hacia el año 2100 (Van Vuuren et al., 2011)

Para las simulaciones se construyeron cuatro escenarios climáticos, combinando las rutas de concentración y los períodos futuros. Cada escenario incluye 12 multiplicadores mensuales de precipitación y 12 ajustes mensuales de temperatura media. Los escenarios son los siguientes:

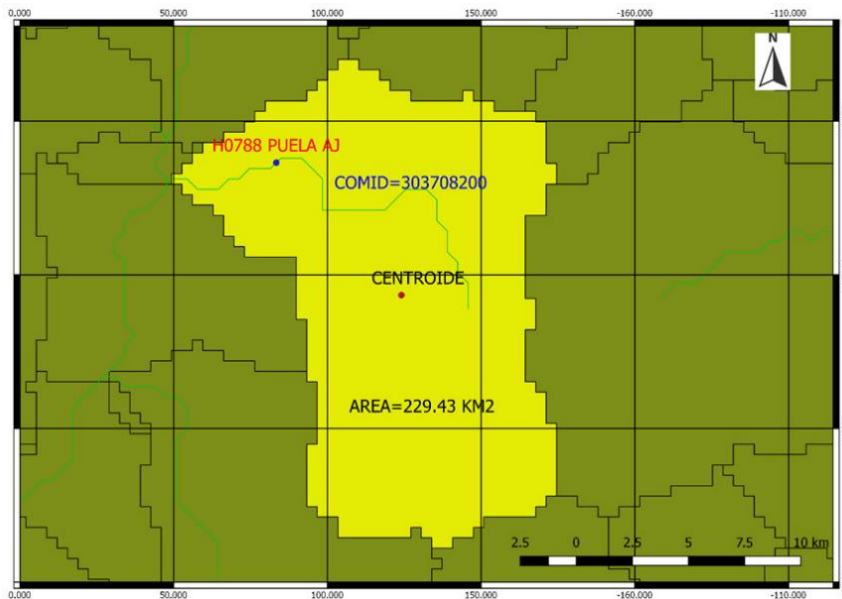
- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1.- RCP 4.5 – 2011 – 2040 | 2.- RCP 4.5 – 2041 – 2070 |
| 3.- RCP 8.5 – 2011 – 2040 | 4.- RCP 8.5 – 2041 – 2070 |

Resultados

Delimitación y caracterización de la cuenca

Para la cuenca del río Puela, la base geográfica AHD identifica una única subcuenca drenante, con una superficie total de 229.43 km², asociada al COMID 303708200.

Figura 6. Delimitación, área y código de identificación de la cuenca con la base AHD



Fuente: Autores

La cuenca y la red principal tienen la siguiente morfología (Tabla 5):

Tabla 5. Variables morfométricas de la cuenca

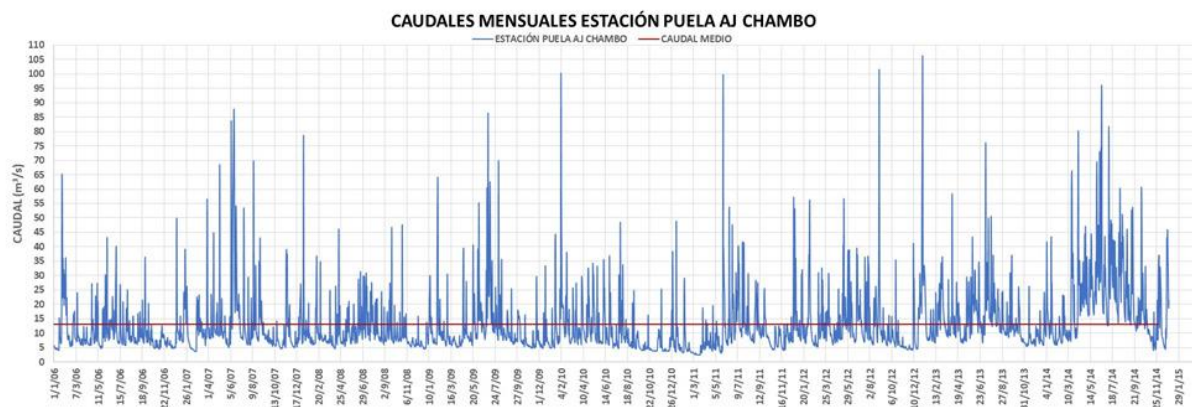
Parámetro	Características
Nombre de la cuenca	Río Puela
Área de drenaje	229.43 km ²
Perímetro	71.82 km
Longitud del cauce	22.03 km
Factor de forma	0.49
Índice de compacidad	1.29
Densidad de drenaje	0,34 km/km ²
Elevación media	3531 m
Pendiente media de la cuenca	12.6 %
Pendiente media del cauce	4.57%

Fuente: Autores

Los parámetros morfométricos describen una cuenca alargada y compacidad de oval redonda a oval oblonga, reflejada en el factor de forma de 0.49 y un índice de compacidad de 1.29, lo que indica tiempos de concentración relativamente largos y una respuesta hidrológica moderada ante eventos de precipitación. La baja densidad de drenaje (0.34 km/km^2), evidencia una red hídrica poco desarrollada, asociada a condiciones favorables de infiltración y menor generación de escorrentía superficial. La cuenca se localiza en un entorno de alta montaña, con una elevación media de 3531 msnm., y pendientes medias de 12.6 % en la cuenca y 4.57 % en el cauce principal, condiciones que favorecen una dinámica fluvial activa y una rápida evacuación de caudales durante los eventos hidrológicos intensos.

Información hidrometeorológica.

Figura 7. Caudales diarios, período 2006 - 2014



Fuente: Autores

Los caudales diarios registrados en la estación Puela AJ Chambo, durante el período 2006 – 2014, muestran una alta variabilidad, con caudales base relativamente estables entre 5 y 10 m^3/s , y picos de corta duración que alcanzan valores superiores a 100 m^3/s , como es el caso del presentado el 4 de enero de 2013 (105.13 m^3/s). Este comportamiento corresponde a un régimen hidrológico predominantemente pluvial, con una respuesta rápida de la cuenca ante eventos de lluvia intensa, favorecida por el relieve montañoso. El caudal medio es de 12.93 m^3/s .

Simulación, calibración y validación del modelo.

El modelo se calibró utilizando los datos del período 2006 – 2011, aprovechando la disponibilidad de una serie hidrológica continua que representara adecuadamente la variabilidad de la cuenca. Posteriormente la validación se llevó a cabo entre el 2012 y 2014, con el objeto de evaluar de manera independiente la precisión predictiva y la consistencia temporal del modelo.

Parámetros del modelo

En la tabla 6 se muestra los valores iniciales y finales después de la calibración del modelo.

Tabla 6. Parámetros del modelo

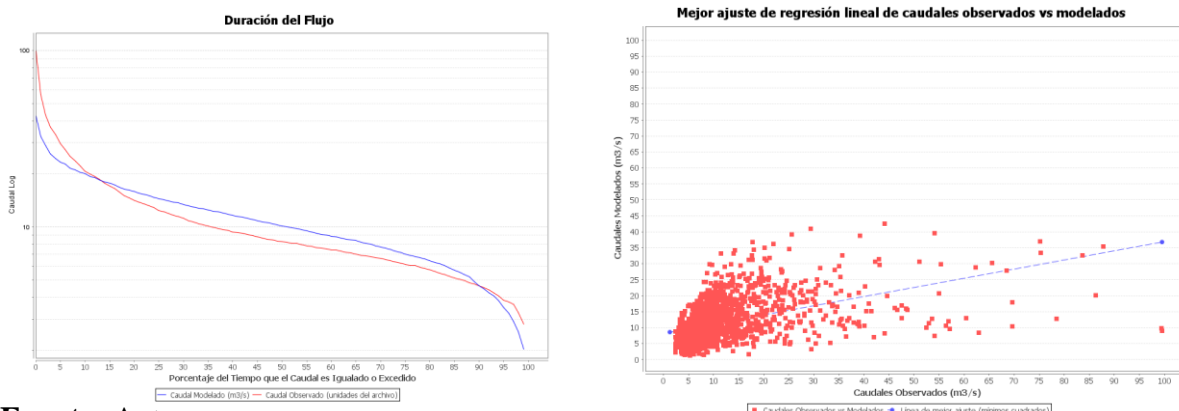
Parámetro del modelo	Valor inicial	Valor final
Número de curva NC	1	0.70
Contenido Disponible de Agua CDA	0.20	0.30
Coefficiente de recesión (r)	0.01	0.10
Coefficiente de percolación (s)	0.005	0.005
Factor ET en temporada de cultivo	1	0.90
Factor ET en temporada latente	1	0.01
Porcentaje de cobertura impermeable	1	1

Fuente: Autores

Los parámetros calibrados muestran un número de curva ($CN = 0.70$) y un contenido disponible de agua ($CDA = 0.30$) coherentes con una cuenca andina de alta infiltración y capacidad de almacenamiento moderado. Los coeficientes de recesión y percolación reflejan una baja contribución del flujo subterráneo, mientras que el factor de evapotranspiración en temporada de cultivo (0.90) es consistente con una mayor actividad vegetal.

Simulación de escenario actual

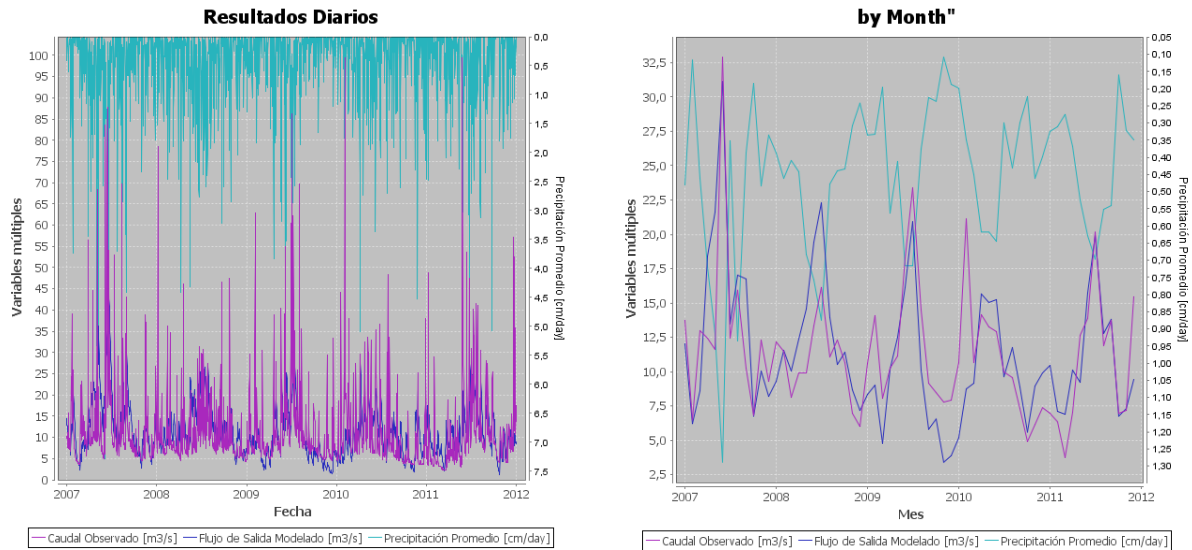
Figura 8. Curvas de duración del flujo y gráfico de dispersión e hidrogramas Hydro-BID



Fuente: Autores

La curva de duración de caudales indica un buen ajuste en los caudales medios, mientras que los eventos de mayor magnitud se subestiman ligeramente, y el flujo base se representa correctamente. El diagrama de dispersión muestra una relación lineal positiva ($r = 0.68$), con la mayoría de los puntos concentrados en caudales bajos y medios ($< 30 \text{ m}^3/\text{s}$), y mayor dispersión en los caudales altos ($> 50 \text{ m}^3/\text{s}$).

Figura 9. Hidrogramas y curvas de caudales diarios y mensuales Hydro-BID

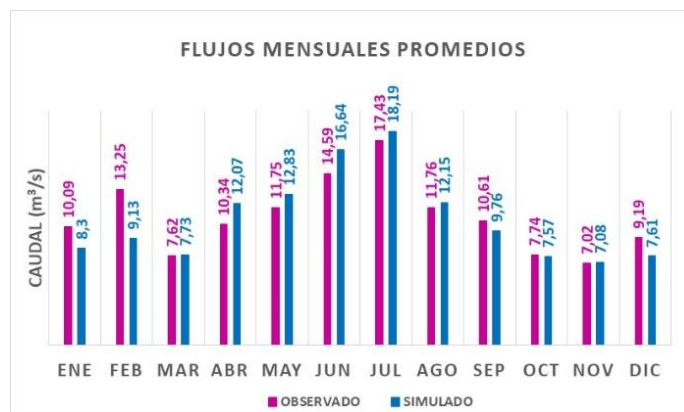


Fuente: Autores

Tanto el hidrograma diario como los promedios mensuales confirman que la estacionalidad, la sincronización de los eventos y el balance hídrico ($Ove = -1.27 \%$, $NSE = 0.54$, $r = 0.68$ y $Rmod = 0.66$) se representan de manera consistente.

Caudales mensuales y anuales generados por el modelo.

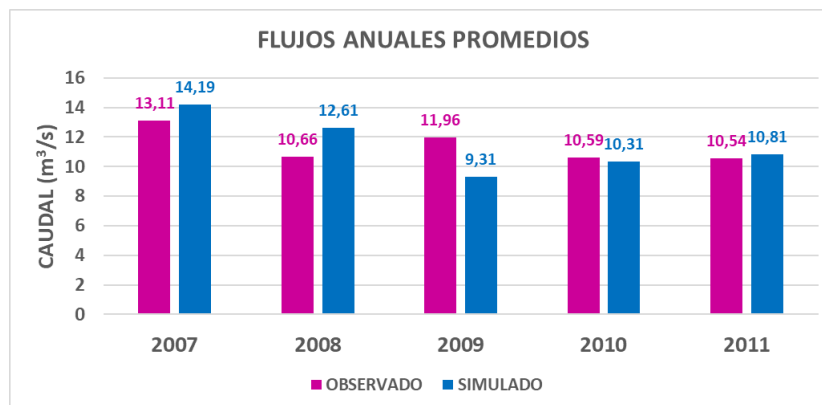
Figura 10. Flujos mensuales promedios generados con Hydro-BID



Fuente: Autores

A escala mensual, el modelo refleja de manera adecuada la estacionalidad del régimen hidrológico, con un buen ajuste en los caudales bajos a medios, como los observados en marzo y noviembre, y desviaciones más notables en los meses de mayor precipitación, como enero, y febrero, donde los picos tienden a subestimarse ligeramente.

Figura 11. Flujos anuales promedios generados con Hydro-BID



Fuente: Autores

A escala anual, el ajuste es más consistente, con diferencias entre valores observados y simulados que oscilan entre -22% y $+18\%$, destacándose el año 2010, donde la discrepancia fue inferior al 3%. En conjunto, estos resultados muestran que el modelo mantiene un balance hídrico confiable, aunque presenta ciertas limitaciones al reproducir eventos extremos.

Simulación de escenarios de cambio climático.

Anomalías y multiplicadores de precipitación.

En las simulaciones hidrológicas realizadas con Hydro-BID se incorporaron anomalías mensuales de temperatura (ΔT) y multiplicadores de precipitación (MUL P) obtenidos a partir de datos de la plataforma S-PRACC basados en modelos del CMIP5 bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Los resultados proyectan un aumento progresivo en ambos escenarios. Con incrementos cercanos a 1°C para 2011 – 2040 y un calentamiento más intenso hacia 2041 - 2070, particularmente en RCP 8.5 donde las anomalías superan los 2°C en varios meses.

Tabla 7. Anomalías de temperatura y multiplicadores de precipitación.

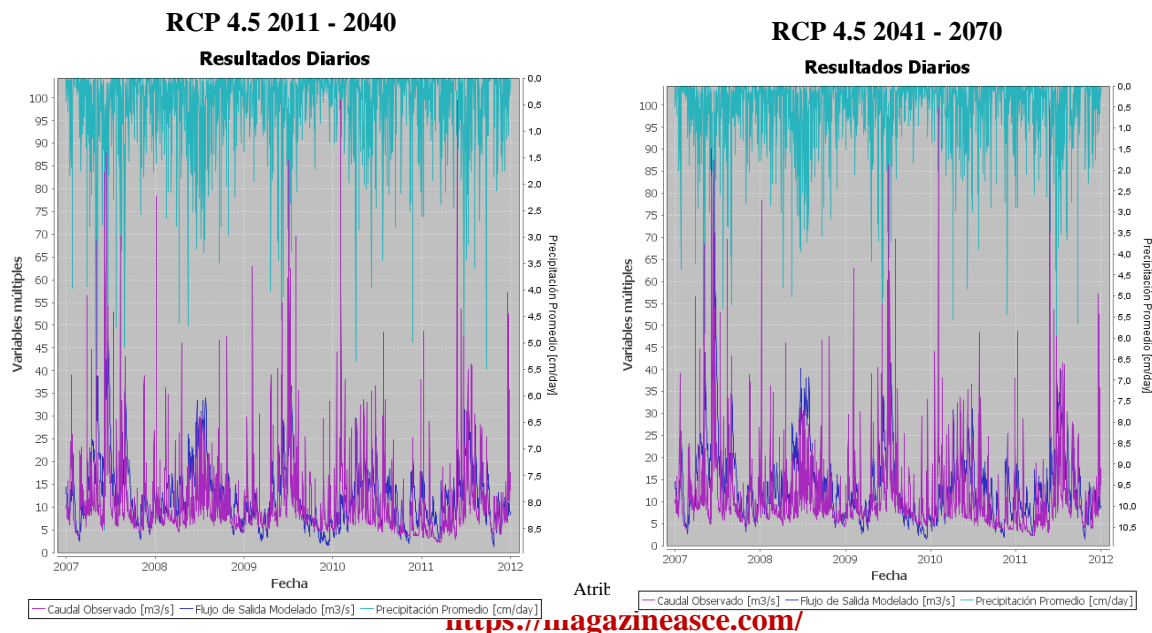
MES	RCP 4.5 2011 - 2040		RCP 4.5 2041 - 2070		RCP 8.5 2011 - 2040		RCP 8.5 2041 - 2070	
	ΔT (°C)	MUL P	ΔT (°C)	MUL P	ΔT (°C)	MUL P	ΔT (°C)	MUL P
ENE	0.82	1.06	3.85	1.17	0.92	1.11	2.21	1.30
FEB	0.92	1.07	1.72	1.16	0.99	1.13	2.22	1.17
MAR	0.87	1.14	1.64	1.23	0.98	1.17	2.25	1.30
ABR	0.89	1.05	1.78	1.09	1.02	1.13	2.29	1.19
MAY	0.91	1.08	1.81	1.16	1.04	1.05	2.36	1.22
JUN	0.86	1.17	1.89	1.43	1.03	1.23	2.52	1.43
JUL	1.01	1.27	1.99	1.43	1.07	1.20	2.56	1.62
AGO	0.90	1.15	1.81	1.18	1.09	1.13	2.44	1.26
SEP	0.81	1.08	1.76	1.11	1.00	1.04	2.40	1.35
OCT	0.80	1.04	1.66	1.11	0.93	1.04	2.33	1.23
NOV	0.73	1.10	1.56	1.20	0.83	1.02	2.22	1.21
DIC	0.73	1.25	1.54	1.57	0.84	1.23	2.17	1.75

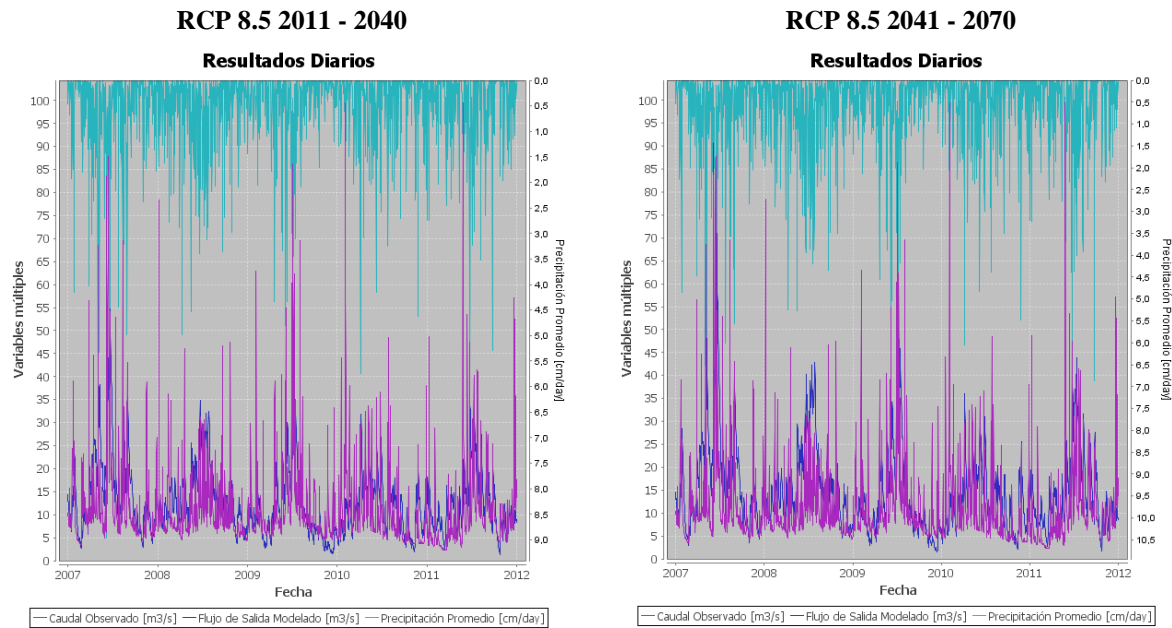
Fuente: Autores

Los multiplicadores mensuales de precipitación evidencian un aumento sostenido, que se vuelve más notorio en el período 2041 – 2070, especialmente bajo el escenario RCP 8.5. Los mayores incrementos se presentan hacia mediados y finales del año, alcanzando valores máximos de 1.57 en RCP 4.5 y 1.75 en RCP 8.5. Estos ajustes se incorporaron a las series históricas para simular de manera más realista la respuesta hidrológica de la cuenca ante escenarios de cambio climático.

Caudales diarios generados bajo escenarios de cambio climático.

Figura 12. Hidrogramas y caudales diarios de los 4 escenarios simulados

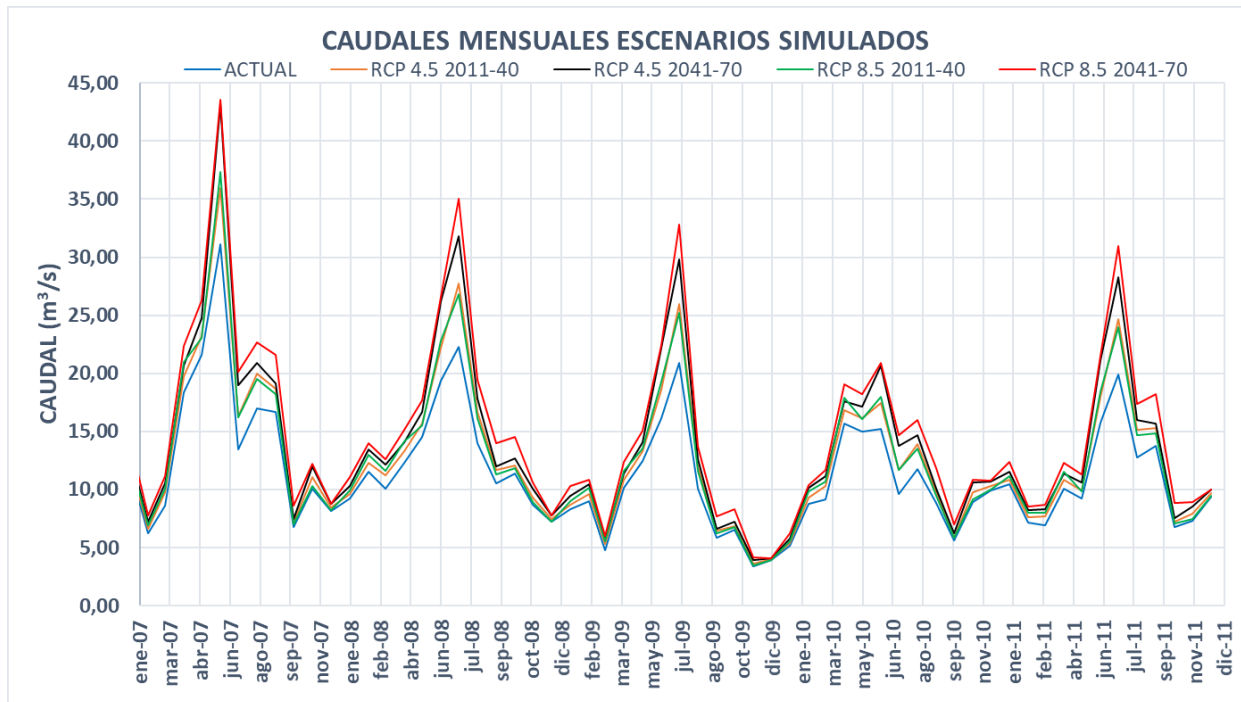




Fuente: Autores

Las simulaciones diarias bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5, para los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2100, revelan una respuesta dinámica y cambiante de la cuenca frente a las condiciones climáticas proyectadas. El flujo modelado sigue de manera consistente el comportamiento del caudal observado con picos que se relacionan directamente con episodios de lluvia intensa. Durante 2011 – 2040, los caudales máximos promedio alcanzaron hasta 85 m³/s en RCP 4.5 y 92 m³/s RCP 8.5, incrementándose en el período 2041 – 2070 a 95 m³/s y 110 m³/s, respectivamente. Esto indica una tendencia hacia un aumento en la variabilidad y la intensidad en los picos de caudal, especialmente marcada bajo el escenario de mayores emisiones RCP 8.5.

Caudales mensuales generados bajo escenarios de cambio climático.

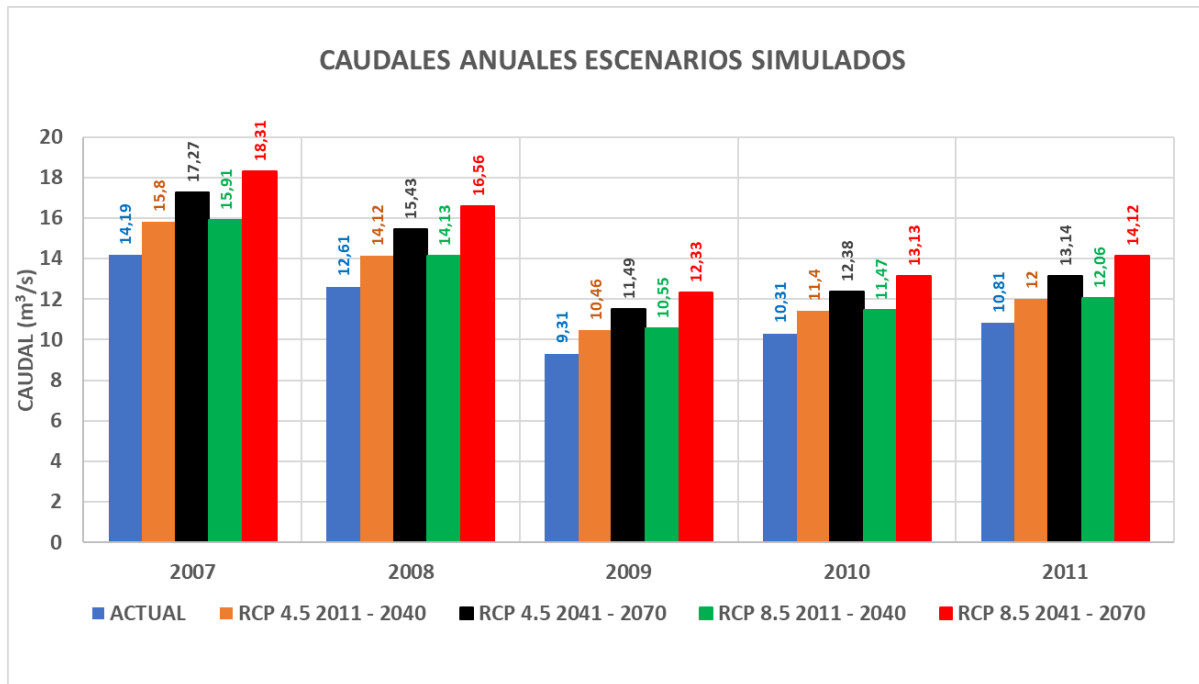
Figura 13. Caudales mensuales de los 4 escenarios simulados

Fuente: Autores

Las simulaciones evidencian un aumento constante en los caudales mensuales en todos los escenarios evaluados, con una intensificación progresiva hacia el horizonte 2041 – 2070 y mayor magnitud bajo RCP 8.5. A nivel mensual, el caudal más alto proyectado se registra en junio de 2007 bajo el escenario RCP 8.5 (2041 – 2070), alcanzando 43.57 m³/s, lo que implica un aumento del 40.1 % frente al valor actual (31.10 m³/s). Un comportamiento similar se observa en julio de 2008 y 2009, donde los incrementos también superan el 35% en este mismo escenario. Por otro lado, los meses de menor caudal, como noviembre de 2009 (3.41 m³/s), muestran incrementos más discretos en términos absolutos; sin embargo, en términos relativos pueden llegar hasta un 22.3 % bajo RCP 8.5 (2041 – 2070), lo que evidencia que incluso los períodos más secos experimentan aumentos significativos.

Caudales anuales generados bajo escenarios de cambio climático.

Figura 14. Caudales anuales de los 4 escenarios simulados



Fuente: Autores

A escala anual, los caudales medios aumentan entre 10 % y 32% según escenario y año. El máximo anual proyectado se registra en 2007 bajo RCP 8.5 (2041 – 2070), con 18.31 m³/s, equivalente a un incremento del 29 % respecto al valor actual (14.19 m³/s). El año más seco (2009) evidencia incrementos relativos superiores al 30% bajo escenarios de altas emisiones.

Discusión

Según la base analítica AHD, la microcuenca del río Puela abarca una superficie de 229.43 km², valor que muestra una alta concordancia (1.4% de diferencia) con el estimado por (Gunsha & Noboa, 2025) quienes utilizaron un Modelo Digital de Elevación (MDE) SRTM V3 de resolución de 30 m obteniendo un área de 232.6 km² en un estudio de balance hídrico de la subcuenca del río Chambo con el modelo SWAT. En cambio, la diferencia se aproxima al 8% si se compara con las áreas reportadas por (Quishpe, 2017) y (Andrade Valdospinos, 2019), quienes utilizaron un MDE SRT de 90 m y obtuvieron valores alrededor de 210 km². Estas variaciones reflejan la importancia de la resolución espacial al delimitar cuencas y confirman que la base AHD es herramienta confiable para definir con precisión tanto el área de la microcuenca como sus unidades de drenaje asociadas.

Durante la calibración del modelo se evidenció que el coeficiente de recesión fue el parámetro que más influyó en los resultados, especialmente en la representación de los caudales base. Al asignarle valores más bajos, los caudales mínimos simulados aumentaron, lo que permitió acercarse de mejor manera a las series modeladas a los datos observados y, en consecuencia, mejorar el ajuste global. Este comportamiento puede interpretarse físicamente en función de que el coeficiente de recesión controla la velocidad de liberación del agua almacenada en el sistema; en este sentido una disminución de este parámetro implica una descarga más lenta, asociada a una mayor capacidad de almacenamiento hídrico en la microcuenca. Lo anterior es coherente con lo señalado en investigaciones previas en cuencas andinas, como las desarrolladas por (Patiño, 2021) en el río Cebadas en Ecuador y por (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2021) en el río Katari en Bolivia utilizando Hydro-BID, donde también se identificó una alta sensibilidad del coeficiente de recesión y de la percolación, mientras que parámetros como el Número de Curva y el contenido de agua aprovechable para las plantas mostraron una influencia menor. En conjunto estos hallazgos resaltan la importancia de representar adecuadamente el almacenamiento y liberación de agua subterránea para simular el comportamiento hidrológico de la cuenca.

En relación con el caudal simulado bajo el escenario actual, el modelo Hydro-BID arrojó un valor promedio anual de $11.44 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual presenta una diferencia cercana al 2% respecto al estimado por (Andrade Valdospinos, 2019), quien obtuvo un caudal expresado en lámina de agua de $1751.93 \text{ mm/año} * \text{m}^2$ equivalente a $11.67 \text{ m}^3/\text{s}$ mediante la aplicación del modelo GR2M (Paturel et al., 1995) para el período 2007 – 2011. Esta ligera discrepancia, en primera instancia puede atribuirse a diferencias estructurales ya que GR2M es un modelo conceptual agregado que simula el balance hídrico de la cuenca mientras que Hydro-BID es semi-distribuido y representa procesos hidrológicos más detallados y la variabilidad espacial de la cuenca, y en la escala temporal, dado que GR2M es un modelo de resolución mensual, mientras que Hydro-BID opera a nivel diario; asimismo, influyen las variaciones en las superficies de análisis y en las métricas de desempeño alcanzadas durante la calibración. En este sentido Hydro-BID obtuvo un NSE de 0.54, valor que se encuentra dentro del rango de 0.50 a 0.65 propuesto por (Moriasi D. N. et al., 2007), lo que corresponde a un desempeño aceptable del modelo en términos de simulación hidrológica.

Conclusiones

La microcuenca del río Puela, con una superficie de 229.43 km² y elevación media de 3531 msnm., presenta una forma alargada (factor de forma = 0.49; índice de compacidad = 1.29), lo que determina tiempos de concentración relativamente largos y una respuesta hidrológica moderada. La baja densidad de drenaje (0.34 km/km²) favorece la infiltración, mientras que las pendientes medias (12.6 % en la cuenca y 4.57% en el cauce principal) generan una dinámica fluvial activa y una rápida evacuación de caudales en eventos intensos.

Tras la implementación del modelo en la microcuenca del río Puela, los resultados evidenciaron una capacidad predictiva aceptable. El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe alcanzó un valor de 0.54, mientras la correlación lineal y su variante modificada se situaron en 0.68 y 0.66, respectivamente. Un valor relevante es el error volumétrico global de -1.27 %, lo cual, a pesar de representar una sutil subestimación de los caudales, se mantiene significativamente por debajo del umbral crítico de 30%. Estos parámetros confirman que Hydro-BID logra replicar con fiabilidad la respuesta hidrológica frente a las particularidades de drenaje en este sistema andino.

La simulación alcanzó a replicar con éxito la estacionalidad característica del régimen hídrico en la zona. Esto se observa en los caudales mensuales, donde los valores mínimos, medios y máximos se situaron en 3.41, 11.44 y 31.10 m³/s, respectivamente; tales cifras denotan un ajuste preciso especialmente en los períodos de estiaje y caudales intermedios. Por otro lado, al analizar la escala anual, los caudales mostraron una estabilidad notable (oscilando entre 9.31 y 14.19 m³/s), lo cual ratifica que el balance hídrico del río Puela mantiene consistencia bajo las condiciones evaluadas.

Bajo escenarios de cambio climático, se proyecta un incremento del caudal medio anual. En el escenario RCP 4.5, los aumentos serían del 11% (2011-2040) y 17% (2041-2070), mientras que en el escenario más extremo RCP 8.5 alcanzarían el 15% y 21% respectivamente, con un caudal máximo anual de 18.31 m³/s. A nivel mensual, los incrementos más significativos superarían el 30 % en meses lluviosos como junio y julio bajo el escenario más extremo.

Los resultados indican que la microcuenca dispone de una mayor cantidad de agua tanto para riego como para consumo humano. Sin embargo, este incremento también puede implicar

ciertos riesgos, como la ocurrencia de eventos hidrológicos más intensos que podrían afectar la infraestructura y la forma en que se gestiona el recurso. Por esta razón sería conveniente efectuar un análisis adicional mediante modelación hidráulica, para evaluar las posibles consecuencias en el cauce y en las estructuras existentes.

Referencias bibliográficas

- Andrade Valdospinos, A. F. (2019). *Recarga potencial del acuífero de la subcuenca del río Chambo bajo una perspectiva de la hidrología física*. [Tesis de maestría]. Escuela Politécnica Nacional.
- Arbuet, A., Pusineri, G., Mazzón, R., Bianchi, H. H., Scioli, C., Paris, M., Corrales, J., & Nalesso, M. (2021). Implementación del modelo HydroBID en la Cuenca Los Padres-Santa Fe-Argentina. *Agua-LAC*, 13(1). <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-06>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2023). *HydroBID: Herramienta para el manejo y planificación del recurso hídrico en América Latina y el Caribe [Video]*. <http://youtu.be/vCd9gr8YGAc>
- Campos, A., Banda, R., Sinichenko, E.-K., & Gritsuk, I.-I. (2016). La Distribución per cápita del agua en el Ecuador. *Revista Científica Ciencias Naturales y Ambientales*, 10(1), 8. <https://doi.org/10.53591/cna.v10i1.248>
- Dirmeyer, P. A. (2011). A history and review of the Global Soil Wetness Project (GSWP). *Journal of Hydrometeorology*, 12, 729–749. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-10-05010.1>
- Florián Hernández, L. T. (2023). *Modelización hidrológica y simulación de escenarios de cambio climático en la cuenca del río Alto Cauca (Colombia) usando el programa HydroBID* [Tesis de maestría]. Universidad de Alcalá.
- Freeman, M. C., Pringle, C. M., & Jackson, C. R. (2007). Hydrologic Connectivity and the Contribution of Stream Headwaters to Ecological Integrity at Regional Scales1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 43, 5–14. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00002.x>
- GAD Penipe. (n.d.). *Puela*. <https://www.Penipe.Gob.Ec/Index.Php/Turismo/Puela>.
- GAD Penipe. (2023). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Penipe 2023-2027 (PDOT)*.
- Gallegos, J., Arteaga, R., Vázquez, M. A., & Juárez, J. (2016). Estimation of missing daily precipitation and maximum and minimum temperature records in San Luis Potosí. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 8, 3–16. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2015.11.008>
- Gunsha, J., & Noboa, M. (2025). *Estudio del balance hídrico en la subcuenca del río Chambo usando SWAT*. [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Chimborazo.
- Haith, D. A., Mandel, R., & Shyan Wu, R. (1992). *GWLF Generalized watershed loading functions versión 2.0 User's manual*. Cornell University.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2015). *Anuario Hidrológico 2013*.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2017). *Anuario Meteorológico 2013*.
- IPCC. (2021). *Cambio climático 2021: Bases físicas. Resumen para responsables de políticas*.

- La Prensa. (2024, June 22). *Inundaciones y erupciones han azotado por años a Palitahua*. <https://www.laprensa.com.ec/inundaciones-y-erupciones-han-azotado-por-anos-a-palitahua/>
- Leverly, A., Pascual, J., Sadres, M., & Rincón, P. (2020). *Escenarios de Cambio Climático en Colombia y Uruguay: Explorando el modelo hidrológico HydroBID*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2021). HydroBID - Herramienta de planificación del recurso hídrico. *Bolivia Agua y Medio Ambiente*. www.mmaya.gob.bodatos.siarh.gob.bo/biblioteca/
- Ministerio del Ambiente de Ecuador. (2016). *Generación de proyecciones climáticas para la tercera comunicación nacional de cambio climático de Ecuador bajo los escenarios de emisión RCP del reporte AR5 del IPCC*.
- Moreda, F., Coli Valdes Daussa, P., Lord, B., & Corrales, J. (2016). *Hydro-BID Case Study No. 4: Application of Hydro-BID in Bermejo River Basin to Quantify Sediment Loads, Argentina* (M. Nalesso, Ed.). <https://doi.org/10.18235/0001123>
- Moreda, F., Miralles-Wilhelm, F., & Muñoz, R. (2014). *Hydro-BID: Un sistema integrado para la simulación de impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos (Parte 2)*. Banco Interamericano de Desarrollo. <http://www.iadb.org>
- Moriasi D. N., Arnold J. G., Van Liew M. W., Bingner R. L., Harmel R. D., & Veith T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50, 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Nalesso, M., & Emanuel, S. (2018). *HydroBID Series: Technical Information (Vol. 4), Step-by-step guide*.
- Oñate-Valdivieso, F., Bosque-Sendra, J., Sastre-Merlin, A., & Ponce, V. M. (2016). Calibración, validación y evaluación de un modelo hidrológico concentrado en un área montañosa al sur del Ecuador. *Agrociencia*, 50(8), 945-963.
- Patiño, N. (2021). *Caracterización hidrológica y análisis de escenarios de cambio climático de la unidad Cebadas ubicada en la cuenca del río Chambo, (Ecuador) con el programa HydroBID*. [Tesis de maestría]. Universidad de Alcalá.
- Paturel, J. E., Servat, E., & Vassiliadis, A. (1995). Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data - case of the GR2M model. *Journal of Hydrology*, 168, 111-125. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02654-T](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02654-T)
- Quishpe, A. (2017). *Caracterización hidrometeorológica y estimación del balance hídrico de la cuenca del Río Chambo* [Tesis de grado]. Escuela Politécnica Nacional.
- Ramírez-Cruz, H., López Velasco, O., & Ibáñez-Castillo, L. A. (2015). Estimación mensual de intensidad de la lluvia en 30 minutos a partir de datos pluviométricos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 151-159. <https://www.researchgate.net/publication/279450618>
- Rineer, J., Bruhn, M., Miralles-Wilhelm, F., & Muñoz Castillo, R. (2014). *Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe*. <https://doi.org/10.18235/0009595>



- UICN. (2009). *Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Ecuador: Escala 1:250 000, nivel 5, metodología Pfafstetter*.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, *109*, 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Wang, Y., & Yan, X. (2017). Climate change induced by Southern Hemisphere desertification. *Physics and Chemistry of the Earth*, *102*, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.03.009>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.