

Hydrological-Hydraulic Modeling with climate change impact and influence of the Curve Number (CN) in the Ichu river basin, Huancavelica-Peru

Ivan Ayala Bizarro¹; Leonardo Castillo Navarro²; Jessica Zúñiga Mendoza³

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Lima - Perú, iayalab@uni.pe

²Universidad Nacional de Ingeniería, Lima- Perú, leonardocastillo@uni.edu.pe

³Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho - Perú, jessica.zuniga.m@uni.pe

Abstract – *The intensification of extreme hydrometeorological events driven by climate change poses a significant challenge for water resource management and flood control in vulnerable regions. This study assesses the combined impacts of climate change and soil abstraction characteristics on runoff processes in the experimental Ichu River basin, located in the central Andes of Peru, using distributed hydrologic-hydraulic models within the HEC-RAS platform and Curve Number (CN) parameters generated from high-resolution data (Sentinel-2 and SoilGrid). Results show that, under saturated soil conditions (CN III), climate change increases the peak discharge (Q_p) by 20.1% and the total runoff volume by 12.9%, whereas under less saturated soils (CN II), the relative increases are 28.7% and 22.6%, respectively, although with lower absolute values. Moreover, the temporal evaluation (2017–2023) revealed hydrological stability when climatic conditions remained consistent, suggesting that climatic factors prevail over land use changes under such scenarios. However, critical areas were identified where soil degradation due to urbanization and deforestation increases runoff risk, as well as regions where improvements linked to reforestation and sustainable management were observed, highlighting the effectiveness of these measures. This work emphasizes the importance of integrating distributed models, high-resolution geospatial data, and tools such as GPCN10 for automated CN calculation, providing a robust foundation for designing adaptive strategies to mitigate climate change impacts on watershed hydrology and promote sustainable water resource management.*

Keywords:

Climate change and runoff processes, Curve Number (CN), high-resolution geospatial data, Sustainable water management, distributed hydrologic modeling.

Modelamiento Hidrológico-Hidráulico con impacto del cambio climático e influencia del Número de Curva (CN) en la cuenca del río Ichu, Huancavelica-Perú

Resumen— La intensificación de eventos hidrometeorológicos extremos impulsados por el cambio climático representa un desafío significativo para la gestión de recursos hídricos y el control de inundaciones en regiones vulnerables. Este estudio evalúa los impactos combinados del cambio climático y las características del suelo-abstracción en los procesos de escorrentía en la cuenca experimental del río Ichu, ubicada en los Andes centrales del Perú, utilizando modelos hidrológico-hidráulicos distribuidos en la plataforma HEC-RAS y parámetros de Curva Número (CN) generados a partir de datos de alta resolución (Sentinel-2 y SoilGrid). Los resultados muestran que, en condiciones de suelo saturado (CN III), el cambio climático incrementa el caudal pico (Q_p) en un 20.1% y el volumen total de escorrentía en un 12.9%, mientras que en suelos menos saturados (CN II), los incrementos relativos son del 28.7% y 22.6%, respectivamente, aunque con valores absolutos más bajos. Además, la evaluación temporal (2017-2023) evidenció una estabilidad hidrológica cuando las condiciones climáticas permanecen consistentes, lo que sugiere que los factores climáticos predominan sobre los cambios en el uso del suelo en estas condiciones. Sin embargo, se identificaron áreas críticas donde la degradación del suelo por urbanización y deforestación aumenta el riesgo de escorrentía, así como regiones con mejoras asociadas a reforestación y manejo sostenible, destacando la efectividad de estas medidas. Este trabajo resalta la relevancia de integrar modelos distribuidos, datos geoespaciales de alta resolución y herramientas como GPCN10 para el cálculo automatizado del CN, ofreciendo una base robusta para diseñar estrategias adaptativas que mitiguen los impactos del cambio climático en la hidrología de cuencas y fomenten la gestión sostenible de los recursos hídricos.

I. INTRODUCCIÓN

La intensificación de eventos hidrometeorológicos extremos como consecuencia del cambio climático ha tenido un impacto significativo en diversas regiones del mundo, afectando tanto los ecosistemas como las comunidades humanas. Por ejemplo, eventos recientes en España, relacionados con las Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANA), han demostrado los devastadores efectos de las precipitaciones intensas, destruyendo infraestructura, viviendas y cultivos, además de causar pérdidas humanas significativas. Este contexto resalta la importancia de entender y modelar las

respuestas hidrológicas de las cuencas bajo escenarios de cambio climático para gestionar eficazmente el riesgo de desastres. En el caso del Perú, los estudios realizados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) han identificado áreas críticas donde los impactos del cambio climático pueden alterar significativamente los patrones hidrológicos, especialmente en cuencas con alta vulnerabilidad física y ecosistémica, como las del río Piura y el río Lurín [1], [2].

La integración de escenarios de cambio climático en el modelamiento hidrológico-hidráulico es importante para evaluar los impactos futuros en la cuenca del río Ichu. La incorporación de proyecciones climáticas permite anticipar cambios en los patrones de precipitación y temperatura, ajustando los modelos para reflejar condiciones futuras. El SENAMHI ha desarrollado estudios de modelamiento hidrológico a nivel nacional, proporcionando información valiosa para el monitoreo de potenciales inundaciones y la gestión del riesgo de desastres [3].

La implementación de modelos hidrológicos-hidráulicos distribuidos se ha convertido en una herramienta clave para comprender y predecir los efectos del cambio climático sobre los regímenes hidrológicos. Por ejemplo, el modelo SWAT ha sido utilizado para cuantificar el impacto del cambio climático en la oferta hídrica superficial en la cuenca media y alta del río Piura al año 2050, utilizando proyecciones climáticas basadas en las rutas RCP4.5 y RCP8.5 [4]. Estos modelos permiten evaluar cómo las alteraciones en las variables climáticas afectan la disponibilidad y distribución del recurso hídrico, proporcionando información crítica para diseñar estrategias de adaptación.

La gestión de recursos hídricos en cuencas experimentales ha cobrado una relevancia creciente en el contexto de variabilidad y cambio climáticos. La cuenca experimental del río Ichu, situada en la región de Huancavelica y bajo la gestión de la Universidad Nacional de Huancavelica, representa un escenario importante para el estudio de los impactos de estos fenómenos sobre el régimen hidrológico. Este tipo de cuencas permite analizar de manera detallada la relación entre los factores climáticos, las características del suelo y la respuesta hidrológica, proporcionando información esencial para la planificación y gestión hídrica en zonas vulnerables. En particular, el presente estudio se centra en la aplicación de un

modelo hidrológico-hidráulico distribuido, implementado en la plataforma *HEC-RAS*, para evaluar los efectos combinados del cambio climático y los parámetros de CN. Este enfoque metodológico no solo permite simular la relación *precipitación-escorrentía* con alta precisión, sino que también incorpora técnicas avanzadas como la onda de difusión, proporcionando una representación más realista del flujo en sistemas fluviales complejos.

La relevancia de los modelos *hidrológicos-hidráulicos* reside en su capacidad para representar y simular la dinámica hídrica de manera integral, abarcando diferentes escenarios climáticos y proporcionando herramientas para prever eventos extremos, como inundaciones. Estos modelos permiten evaluar de forma detallada la influencia de las características físicas del suelo y del uso del suelo en la generación y distribución de la escorrentía, integrando además la heterogeneidad espacial y temporal que caracteriza a las cuencas hidrográficas. A diferencia de los modelos *lumped* o conceptuales, los modelos distribuidos ofrecen una representación más precisa y robusta de los procesos hidrológicos al capturar las interacciones espaciales entre el terreno, la vegetación y las precipitaciones, lo que los convierte en una herramienta indispensable para la planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos en entornos complejos como el de la cuenca del río Ichu.

En este contexto, la aplicación de un modelo distribuido en la cuenca del río Ichu permite explorar de manera diferenciada los efectos de variables críticas, como los cambios en los parámetros del Número de Curva, que representan las condiciones del suelo y su uso entre los años 2017 y 2023. Además, estos modelos ofrecen la posibilidad de evaluar escenarios de cambio climático (CC) y sin cambio climático (SC), lo que permite analizar sus impactos específicos en caudales pico y volúmenes acumulados. También se incluyen escenarios basados en las condiciones antecedentes de humedad del CN, tanto en estado normal (CN II) como en estado húmedo (CN III), que reflejan distintos niveles de permeabilidad del suelo. Estas simulaciones no solo aportan conocimientos significativos sobre el comportamiento hidrológico bajo diferentes condiciones ambientales, sino que también tienen implicaciones prácticas en la gestión hídrica de la región de Huancavelica, donde los resultados son clave para mitigar riesgos asociados a inundaciones y erosión fluvial, diseñar estrategias sostenibles de manejo del agua y priorizar medidas de conservación de suelos y restauración de ecosistemas fluviales.

La implementación del modelo *HEC-RAS* en el presente estudio destaca como una herramienta robusta para analizar escenarios hidrológicos complejos. Este enfoque metodológico se enriquece con el uso de herramientas avanzadas como el aplicativo *GPCN10*, que automatiza la generación del parámetro CN a través de técnicas de procesamiento espacial basadas en PyQGIS y Python. Esta herramienta integra datos de alta resolución provenientes de imágenes satelitales Sentinel-2, con 10 metros de resolución, y de bases de datos de grupos hidrológicos como SoilGrid, con una resolución de 250 metros.

La automatización mediante *GPCN10* no solo incrementa la precisión de los análisis, sino que también garantiza uniformidad en el tratamiento de grandes volúmenes de datos espaciales. Esto es especialmente crítico al manejar información de alta resolución, ya que minimiza los errores humanos asociados a procedimientos manuales y optimiza la eficiencia del proceso. Adicionalmente, el uso de bibliotecas como GeoPandas permite realizar análisis dinámicos en tiempo real, integrando información actualizada que fortalece la capacidad de respuesta ante variaciones en las condiciones climáticas y del suelo.

El análisis de los cambios en el CN entre 2017 y 2023 en la cuenca del río Ichu proporciona una visión integral de las transformaciones en la cobertura y uso del suelo, identificando tendencias clave como el decremento del CN, que sugiere mejoras en la infiltración atribuibles a intervenciones de conservación o regeneración vegetal. Por otro lado, se observan incrementos en el CN asociados a la degradación del suelo, como resultado de actividades humanas, incluyendo la urbanización y la deforestación. Estas variaciones tienen implicaciones significativas para la gestión hídrica, destacando la necesidad de implementar estrategias sostenibles que mitiguen los impactos negativos del cambio climático y promuevan la resiliencia de los ecosistemas fluviales. En este sentido, el presente estudio subraya la importancia de combinar herramientas tecnológicas avanzadas con modelos distribuidos para proporcionar soluciones científicas y prácticas a los desafíos complejos de la gestión de recursos hídricos en cuencas vulnerables.

II. BASES TEORICAS

A. Descripción de la cuenca de estudio

La cuenca experimental del río Ichu, con código 49964 según ANA y área 610 km², se extiende aguas arriba de la ciudad de Huancavelica, en la región central del Perú, constituyendo un entorno fundamental para la investigación hidrológica y académica. Esta cuenca presenta características geomorfológicas propias de la Sierra peruana, con terrenos montañosos de gran complejidad y una diversidad en el uso y tipo de suelo que influye de manera significativa en los procesos hidrológicos. Estas particularidades permiten la realización de estudios detallados en respuesta a los fenómenos hidrometeorológicos, aprovechando la red de monitoreo instalada por la Universidad Nacional de Huancavelica, que incluye seis estaciones meteorológicas y una estación hidrométrica, el mismo que registra los niveles de la superficie libre de agua en la parte urbana.

La topografía variada, desde elevaciones bajas hasta cumbres montañosas, y los gradientes pronunciados definen la dinámica de la escorrentía y la infiltración en la cuenca. Las formaciones rocosas y el tipo de cobertura vegetal juegan un papel importante en el comportamiento hidrológico, afectando el flujo de agua superficial y subterránea. Además, la presencia de la ciudad de Huancavelica dentro de la cuenca introduce una

componente urbana que altera los patrones naturales de infiltración y contribuye a la complejidad de la gestión hídrica.

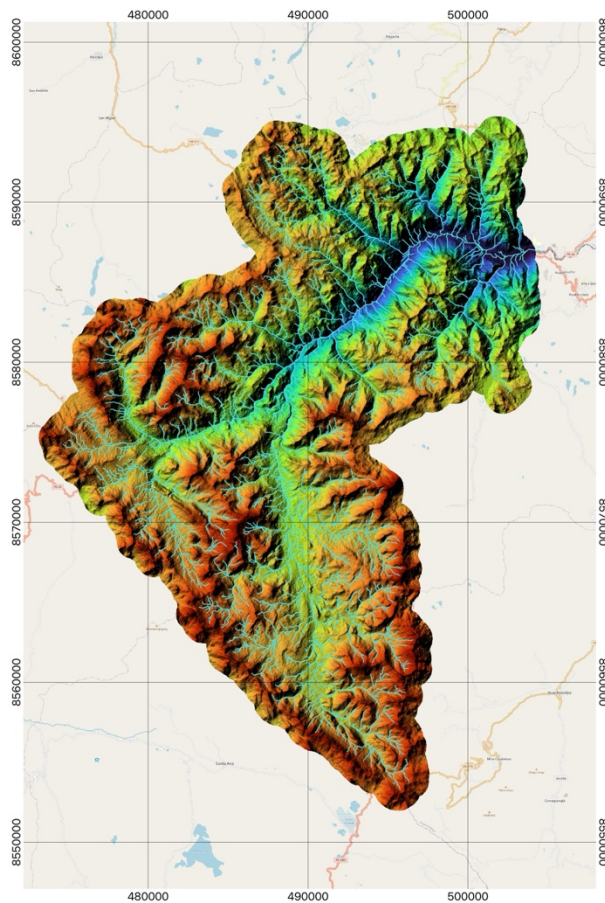


Fig. 1 Modelo digital de elevaciones de la cuenca experimental del río Ichu

B. Uso y cobertura terrestre

Esri e Impact Observatory publicaron un servicio de imágenes llamado Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Time Series, que permite visualizar y analizar mapas de uso y cobertura terrestre globales con una resolución de 10 metros, actualizados desde 2017 hasta 2023. Este recurso, disponible en la plataforma ArcGIS, es especialmente útil para la planificación de conservación, la seguridad alimentaria y el modelado hidrológico, ya que proporciona una herramienta precisa para monitorear cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo [5].

El año 2024, Esri lanzó una versión actualizada de su mapa global de cobertura terrestre, utilizando datos de alta resolución de Sentinel-2. Esta actualización abarca de 2017 a 2023 y permite a usuarios analizar cambios en el uso de la tierra, lo que es útil para la toma de decisiones en sostenibilidad y gestión ambiental. La herramienta Sentinel-2 Land Cover Explorer facilita la visualización de estos datos, proporcionando un recurso esencial para organizaciones ambientales y

gubernamentales para realizar un seguimiento de cambios en el paisaje global [6].

Por otro lado, en [7] se desarrolló un modelo basado en redes neuronales profundas que clasifica imágenes con alta precisión, permitiendo obtener información detallada sobre el cambio de uso de suelo. En [7] también se indican que esta metodología puede ser aplicada en áreas como la gestión de recursos naturales, el cambio climático y la planificación urbana, donde es esencial un monitoreo preciso y actualizado de la superficie terrestre.

C. Tipo de suelo

La clasificación de Grupos Hidrológicos de Suelos (HSG, por sus siglas en inglés) es esencial para modelar el escurrimiento superficial utilizando el método del número de curva del USDA. Esta clasificación se basa en las propiedades del suelo, como la textura y la profundidad hasta el lecho rocoso, y se divide en cuatro categorías principales: A, B, C y D, que representan suelos con potencial de escurrimiento bajo, moderadamente bajo, moderadamente alto y alto, respectivamente. Además, existen grupos duales (A/D, B/D, C/D y D/D) que indican suelos con alto potencial de escurrimiento debido a la presencia de una capa freática superficial, pero que pueden reclasificarse si se drenan adecuadamente. Esta clasificación es importante para estudios hidrológicos y ambientales, ya que permite estimar la capacidad de infiltración y el potencial de escurrimiento de diferentes tipos de suelos, lo cual es crucial para la gestión de recursos hídricos y la planificación del uso del suelo [8].

La clasificación del suelo es esencial no solo para entender sus propiedades físicas, químicas y biológicas, sino también para gestionar adecuadamente recursos agrícolas, forestales, urbanos y ambientales [9].

En [10] se presenta una versión mejorada del sistema *SoilGrids*, que ofrece predicciones globales de propiedades del suelo a una resolución de 250 metros. Este avance se basa en aproximadamente 150,000 perfiles de suelo y 158 covariables derivadas de sensores remotos, como productos MODIS, derivados del DEM SRTM, imágenes climáticas y mapas globales de formas de relieve y litología. Para las predicciones, se emplearon métodos de aprendizaje automático, implementados en los paquetes de R. Los autores sugieren futuras investigaciones para refinar los métodos que incorporen incertidumbres en los datos de entrada y para desarrollar métodos que permitan la fusión multiescala de las predicciones de *SoilGrids* con productos de suelo locales o nacionales de mayor resolución.

D. Producto GCN250

En [11] se aborda esta brecha al presentar el conjunto de datos GCN250, que proporciona una cobertura global y consistente de números de curva a una resolución espacial de 250 metros. Este producto se basa en datos de uso de la tierra de la Agencia

Espacial Europea (ESA CCI-LC) de 2015 y el producto global de grupos de suelo hidrológico (HYSOGs250m) desarrollado por Ross et al. (2018). El análisis de Jaafar y sus colegas destaca que el potencial de escorrentía de moderado a alto domina globalmente, con números de curva que oscilan entre 75 y 85 bajo condiciones promedio.

En particular, Australia muestra el mayor potencial de escorrentía, mientras que Europa tiene el menor. Las aplicaciones de este conjunto de datos son amplias e incluyen el diseño hidrológico, la gestión de tierras, la evaluación de riesgos de inundaciones y la modelización de la recarga de aguas subterráneas. Los autores subrayan la importancia de este producto para la comunidad científica, ya que permite evaluar cambios en la escorrentía a nivel global, regional y de cuenca.

El método para generar *GCN250* involucró la integración de mapas de uso de la tierra y grupos de suelo hidrológico, utilizando tablas de consulta de CN basadas en la metodología del USDA. Se emplearon los datos más recientes de ESA-CCI LC de 2015 y los datos de HYSOGs250m. En este proceso, las clases de uso de la tierra de ESA se mapearon a las clases del Manual de Ingeniería Nacional del USDA (NEH-630) para derivar los números de curva correspondientes. Los autores explican cómo diferentes tipos funcionales de plantas, como árboles de hoja perenne o pastos naturales, se asignaron a categorías específicas según las condiciones hidrológicas (buenas, medias o malas). En [11] recomiendan que los usuarios ajusten las condiciones de escorrentía según el conocimiento local y los datos disponibles. Entonces, el conjunto de datos *GCN250* representa un avance significativo en la modelización hidrológica global, proporcionando una herramienta valiosa para gestionar los recursos hídricos y evaluar los impactos del cambio climático. Los autores mencionan que, aunque el producto es útil para estudios de gran escala, debe usarse con precaución en aplicaciones de diseño hidrológico local, comparando siempre las estimaciones de escorrentía con datos observados.

E. Plugin GPCN10 en Qgis

El aplicativo *CPCN10* utiliza datos de alta resolución (10 metros) de uso de suelo obtenidos del satélite Sentinel-2, proporcionados por Esri. Estos datos son combinados con información sobre los Grupos Hidrológicos de Suelo (HSG) clasificados en A, B, C, y D, definidos según las recomendaciones y parámetros establecidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). La metodología implementada sigue las mejores prácticas de la ciencia hidrológica, asegurando que las curvas número calculadas se adapten a las condiciones específicas del terreno, lo que es esencial para evaluar el potencial de escurrimiento en diferentes escenarios.

Además, la aplicación no solo simplifica el cálculo manual de los valores de Curva Número, sino que también ofrece una interfaz amigable, mejorando la eficiencia del trabajo de profesionales en hidrología, gestión de cuencas, y planificación ambiental. Esta automatización reduce significativamente el

tiempo requerido para procesar grandes volúmenes de datos geoespaciales y aumenta la precisión de las estimaciones de escorrentía, permitiendo tomar decisiones más informadas y sostenibles en la gestión de recursos hídricos.

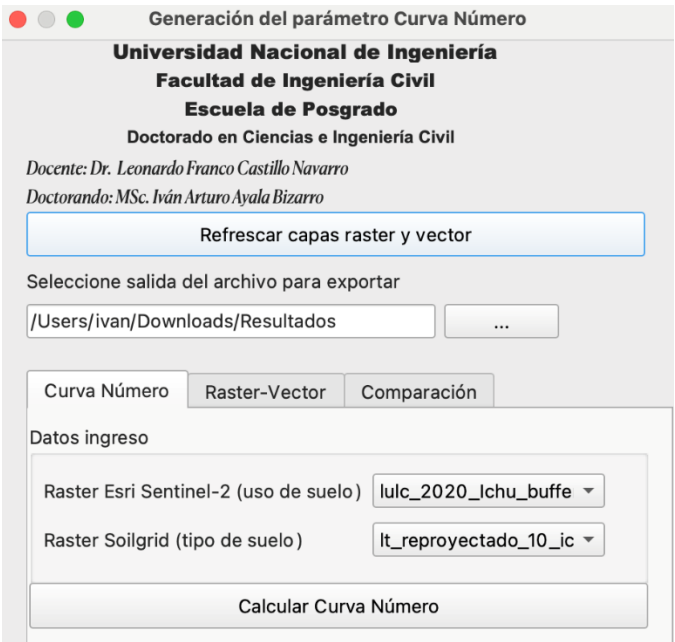


Fig. 2 Ventana principal de GPCN10

Generación del parámetro Curva Número (GPCN10)

Esta herramienta automatiza la generación del parámetro Curva Número desde los datos de uso de suelo (Esri Sentinel 2) y tipo de suelo (Soilgrids)

El usuario elige dos rasters para generar el parámetro Curva Número

Categoría	Plugins
Etiquetas	python
Más información	página web Seguimiento de errores repositorio de código
Autor	Ayala Bizarro Iván Arturo
Versión instalada	0.1

Fig. 3 Plugin GPCN10 en Qgis

F. Factores de cambio climático

SENAMHI ha desarrollado metodologías para evaluar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos, integrando modelos climáticos y herramientas hidrológicas. Una de las principales estrategias empleadas es la regionalización de modelos climáticos globales, que permite obtener proyecciones climáticas a escalas más detalladas, adecuadas para estudios locales y regionales. Este proceso, conocido como *downscaling*, ajusta las salidas de modelos globales a resoluciones espaciales más finas, facilitando la evaluación de impactos específicos en distintas cuencas hidrográficas del país.

En el ámbito de la modelación hidrológica, SENAMHI ha implementado el uso de modelos como el WEAP (Water Evaluation and Planning System) para simular la disponibilidad y demanda de recursos hídricos bajo diferentes escenarios de cambio climático. Por ejemplo, en la cuenca del río Santa, se construyó un modelo utilizando WEAP que incluye la hidrología de la cuenca y un módulo de modelación glaciar, permitiendo analizar cómo las variaciones climáticas futuras podrían afectar la oferta hídrica en la región [12].

Además, SENAMHI ha elaborado escenarios climáticos al año 2050, considerando cambios en el clima promedio y en eventos extremos. Estos escenarios se basan en metodologías reconocidas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) y emplean datos regionalizados para el Perú, proporcionando información detallada sobre posibles variaciones en precipitación y temperatura. Esta información es crucial para la planificación y gestión de los recursos hídricos, ya que permite anticipar y mitigar los efectos adversos del cambio climático en diferentes sectores [13].

La TABLA I adjunta representa un resumen de las precipitaciones máximas diarias de la cuenca del río Ichu bajo tres condiciones específicas: escenarios históricos sin considerar el cambio climático, escenarios proyectados con cambio climático (P24 max CC), y factores de variación entre ambos escenarios. Estas proyecciones han sido obtenidas mediante metodologías del SENAMHI, empleando la mediana de tres modelos de cambio climático, incluidos en el CMIP5 bajo el escenario de altas emisiones RCP 8.5. Los modelos considerados son HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR y ACCESS1-3. La mediana representa un valor central de estos tres modelos según se detalla en el repositorio presentado por SENAMHI IDSEP [14]. De la misma tabla se evidencia un incremento aproximado del 7 % en los valores analizados, atribuido a los efectos proyectados del cambio climático en la cuenca en estudio. Este aumento refleja la sensibilidad de la cuenca a las condiciones climáticas extremas, destacando la importancia de considerar estos escenarios en la planificación y gestión de recursos hídricos.

TABLE I
RESUMEN DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS Y FACTORES DE VARIACIÓN BAJO ESCENARIOS HISTÓRICOS Y CON CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA CUENCA DEL RÍO ICHU

Período de Retorno (Años)	P24 max Histórico (mm)	P24 max CC (mm)	Factor de variación
2	25.39	27.85	1.10
5	33.00	35.45	1.07
10	38.14	40.06	1.05
30	44.80	48.11	1.07
50	50.16	53.87	1.07
75	52.33	56.19	1.07
100	55.79	59.83	1.07
200	62.00	66.58	1.07
500	71.01	76.25	1.07
1000	78.01	83.86	1.07

Asimismo, se observa el valor de la precipitación máxima diaria correspondiente al período de retorno de 100 años,

considerando tanto el escenario histórico como el escenario proyectado bajo condiciones de cambio climático. Para analizar la distribución temporal de la tormenta asociada a estos valores, se ha implementado la metodología del Natural Resources Conservation Service (NRCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), específicamente utilizando el modelo de tormenta tipo II. Este enfoque es ampliamente reconocido en la ingeniería hidrológica debido a su capacidad para representar eventos extremos en regiones con características climáticas y geográficas similares a las del área de estudio. La tormenta tipo II del NRCS, basada en un perfil temporal que concentra la mayor cantidad de precipitación en el tercio central de la duración del evento, resulta adecuada para representar las características de precipitación intensa que se experimentan en cuencas con respuesta rápida, como es el caso del río Ichu. La elección de este modelo responde a su capacidad para capturar las dinámicas asociadas a eventos de alta intensidad y corta duración, que suelen ser los más relevantes para el diseño y evaluación de estructuras hidráulicas en contextos de cambio climático.

III. RESULTADOS

A. Generación del parámetro Curva Número con GPCN10 de resolución de 10 m

Se llevó a cabo una evaluación detallada de los parámetros de Curva Número correspondientes al período comprendido entre los años 2017 y 2023. Tal como se detalló en la introducción, para este análisis se utilizaron imágenes satelitales Sentinel-2 con resolución espacial de 10 metros y datos de propiedades del suelo de SoilGrid con resolución de 250 metros. Estas fuentes de alta resolución facilitaron la parametrización precisa del Curva Número (CN) empleado en los modelos hidrológicos-hidráulicos distribuidos. Estas fuentes permiten capturar con precisión las variaciones espaciales en las características del suelo y la cobertura terrestre, factores clave para la parametrización del CN y su posterior uso en modelaciones hidrológicas distribuidas.

Los resultados de los mapas CN, diferencias de valores y clases de cambio completos para cada período se adjuntan en el repositorio

<https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.980672>

La Fig. 4 presenta la distribución espacial del parámetro Curva Número (CN) correspondientes a 2023. Adicionalmente, se incluye un análisis de la variación acumulada entre 2023 y 2017, proporcionando una perspectiva integral de los cambios en los parámetros CN a lo largo de los siete años evaluados. Este enfoque permite identificar patrones y tendencias significativas en la evolución de las condiciones del suelo y el uso del territorio en la cuenca estudiada.

La Fig. 5, representa el análisis de las clases de cambio del parámetro CN. En estos resultados se identifican variaciones localizadas en la cobertura y el uso del suelo, las cuales pueden influir de manera significativa en el comportamiento hidrológico de la cuenca.

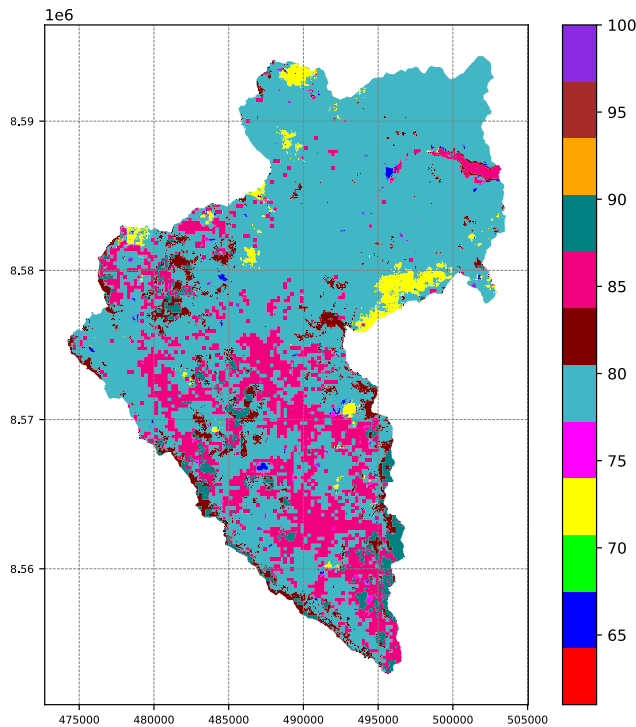


Fig. 4 Curva Número periodo 2023

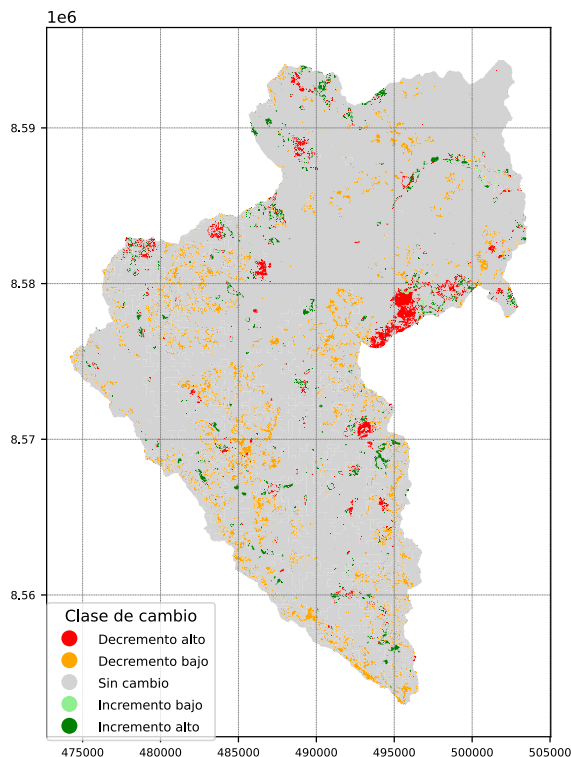


Fig. 5 Mapa de clases de cambio 2023 - 2017

El parámetro CN es utilizado para estimar el escurrimiento superficial en función del uso del suelo, la cobertura vegetal y

las características del suelo. Las diferencias de CN se agrupan en intervalos que representan cambios significativos:

- *Decremento alto (rojo)*: Corresponde a una disminución de más de 5 unidades en el CN. Esto indica una mejora considerable en la infiltración o una reducción del escurrimiento, generalmente debido a cambios en la cobertura vegetal o el uso del suelo que promueven una mayor permeabilidad.
- *Decremento bajo (naranja)*: Una disminución de entre 1 y 5 unidades en el CN. Aunque menos pronunciada, también sugiere una mejora en las condiciones de infiltración.
- *Sin cambio (gris)*: Áreas donde no ha habido una variación significativa en el CN, lo que implica que la cobertura y el uso del suelo han permanecido estables.
- *Incremento bajo (verde claro)*: Un aumento de entre 1 y 5 unidades en el CN, lo que señala un ligero deterioro en la capacidad de infiltración o un aumento en el escurrimiento.
- *Incremento alto (verde oscuro)*: Un incremento de más de 5 unidades en el CN. Esto representa un deterioro importante en la infiltración, posiblemente debido a la urbanización, deforestación o actividades agrícolas intensivas.

Las áreas en rojo (decremento alto) y naranja (decremento bajo) sugieren que ciertas partes de la cuenca han experimentado un cambio en la abstracción, posiblemente por la reforestación, prácticas agrícolas sostenibles, o la restauración de ecosistemas, que aumentan la capacidad de retención de agua del suelo y disminuyen el riesgo de escorrentía superficial.

En contraste, las áreas en verde oscuro (incremento alto) y verde claro (incremento bajo) indican zonas donde el cambio en el uso del suelo, como la expansión urbana, la deforestación o la compactación del suelo debido a actividades agrícolas, ha reducido la capacidad de infiltración, lo que podría aumentar el riesgo de inundaciones y la erosión del suelo.

Las áreas grises (sin cambio) sirven como referencia para identificar regiones donde las condiciones hidrológicas no se han alterado significativamente. A nivel de la cuenca la zona gris representa un 92% del área.

Los patrones de cambio resaltados en el mapa sugieren la necesidad de intervenciones específicas para mitigar los efectos negativos en las áreas con incrementos significativos del CN, como estrategias de conservación del suelo y agua, reforestación, o prácticas de manejo sostenible. Por otro lado, las áreas que han mostrado mejoras (decrementos en el CN) podrían servir como ejemplos de prácticas efectivas que pueden replicarse en otras partes de la cuenca.

La TABLA II muestra una interesante dinámica en los cambios del uso y cobertura del suelo en la cuenca, reflejada en la evolución del parámetro CN durante el período 2017-2023. En términos de reducción en la capacidad de escurrimiento, es

decir, mejoras en la infiltración. Se observa que un área significativa de la cuenca, aproximadamente 33.70 km², experimentó un decremento bajo en el CN, mientras que 9.66 km² presentó un decremento alto. Estas áreas pueden estar relacionadas con intervenciones como la reforestación o la adopción de prácticas de uso del suelo que favorecen la infiltración.

TABLA II

ÁREAS DE LAS DIFERENCIAS ENTRE LOS PERIODOS 2017 Y 2023

Clase Cambio	Área (km²)
Decremento alto	9.6612
Decremento bajo	33.7039
Sin cambio	558.624
Incremento bajo	0.321479
Incremento alto	7.64645

Por lo tanto, los incrementos en el CN fueron relativamente menores. El incremento bajo solo cubrió 0.32 km², lo que sugiere un impacto limitado de factores negativos leves en la infiltración, mientras que el incremento alto, más preocupante, abarcó 7.65 km². Esto último podría indicar áreas donde la urbanización, la deforestación o actividades agrícolas intensivas han reducido significativamente la capacidad de infiltración del suelo, aumentando el riesgo de escorrentía superficial.

Por otro lado, es notable que una gran parte de la cuenca, 558.62 km², se mantuvo sin cambios en términos de CN, lo que implica estabilidad en las condiciones de uso del suelo en la mayor parte del área estudiada. Este balance entre las áreas de cambio y las áreas estables proporciona información crucial para la planificación de la gestión de recursos hídricos y para la implementación de medidas de conservación en la cuenca.

B. Análisis de los escenarios de simulación hidrológico-hidráulico

Para la modelación hidrológica e hidráulica, se ha utilizado HEC-RAS en su módulo 2D, que ha permitido representar la propagación de flujo en la cuenca. Este estudio se ha basado en un modelo distribuido de *precipitación-escorrentía*, que incorpora el método de *onda de difusión* y por tanto enfoca al método *hidrológicos-hidráulicos*, implementados en la plataforma HEC-RAS. Los modelos *hidrológicos-hidráulicos* son herramientas esenciales para la comprensión y predicción de la dinámica del flujo en una cuenca. Estos modelos permiten simular la respuesta de la escorrentía frente a diferentes condiciones de precipitación, tipos de suelo, y cambios en el uso del suelo. En este estudio, se ha utilizado un modelo distribuido, el cual es particularmente relevante porque considera la heterogeneidad espacial de la cuenca, como la distribución de los tipos de suelo, pendientes y uso del suelo, asimismo, permite evaluar el impacto de eventos extremos y los efectos acumulativos del cambio climático en el régimen hidrológico y por último, ofrece un mayor nivel de detalle comparado con modelos conceptuales o *lumped*, lo que mejora la precisión en la predicción de variables como caudales pico y volúmenes acumulados.

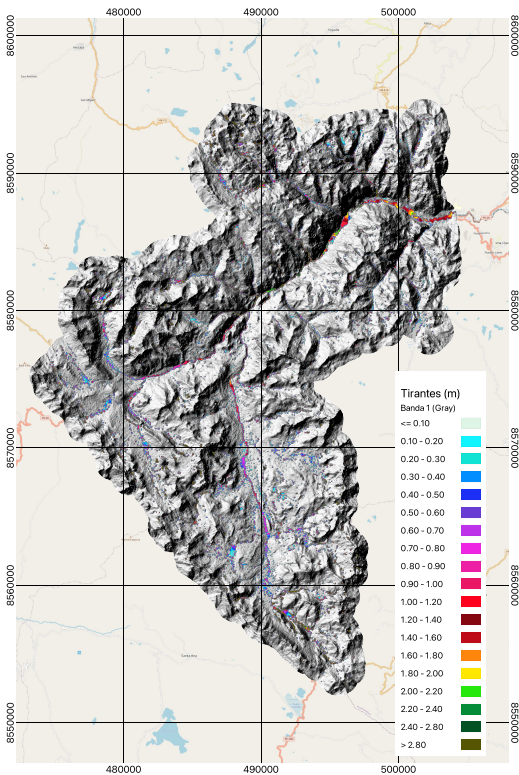


Fig. 6 Mapa de tirantes de flujo en la cuenca experimental, escenario 2023 CN-III-CC

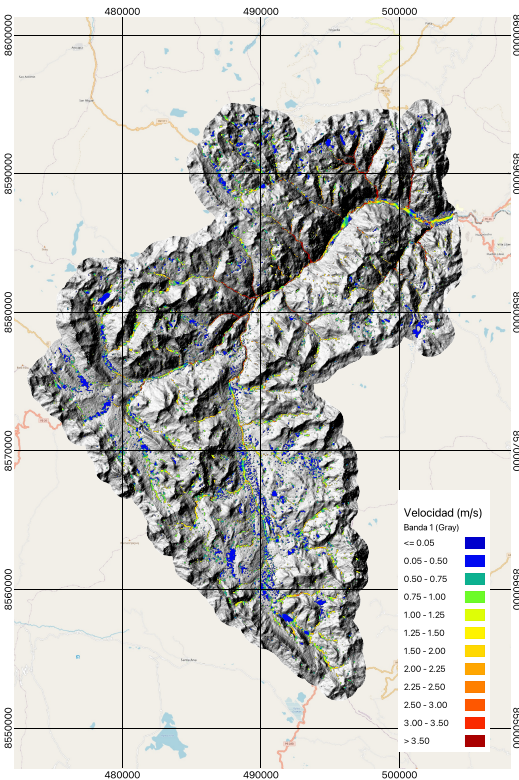


Fig. 7 Mapa de velocidades de flujo en la cuenca experimental, escenario 2023 CN-III-CC

La Fig. 6, muestra los valores espaciales de los tirantes simulados en la cuenca del río Ichu. La Fig. 7, muestra la distribución de los valores máximos de las velocidades del flujo en la cuenca. La distribución de las velocidades evidencia zonas críticas para la erosión y transporte de sedimentos. La cuenca experimental del río Ichu, representa un entorno para evaluar las interacciones entre el cambio climático y los parámetros hidrológicos.

Se han evaluado cinco escenarios representativos en la cuenca del río Ichu. Los parámetros hidrológicos se definieron mediante el CN para diferentes condiciones:

- 2017 - CN III - CC: Basado en parámetros de CN del año 2017 con condiciones de cambio climático.
- 2023 - CN III - CC: Parámetros de CN del año 2023 con las mismas condiciones de cambio climático.
- 2023 - CN III - SC: Parámetros de CN del año 2023 sin considerar cambio climático.
- 2023 - CN II - CC: Parámetros de CN en condiciones normales (CN II) con cambio climático.
- 2023 - CN II - SC: Parámetros de CN en condiciones normales (CN II) sin cambio climático.

La metodología incluyó simulaciones detalladas considerando ondas de difusión y condiciones de precipitación distribuidas espacialmente en la cuenca. En la Fig. 8 y Fig. 9, se presentan los resultados obtenidos para los distintos escenarios analizados. Estos gráficos ilustran la dinámica hidrológica representada a través del hidrograma de caudal y el volumen acumulado de escorrentía, respectivamente. Los valores específicos asociados a cada escenario serán descritos y analizados en detalle en las secciones posteriores, proporcionando una interpretación cuantitativa y cualitativa de los impactos observados.

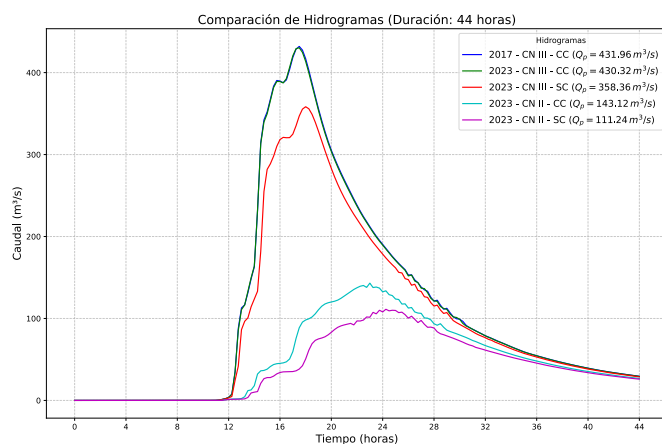


Fig. 8 Hidrogramas y resultados de caudales máximos para los distintos escenarios

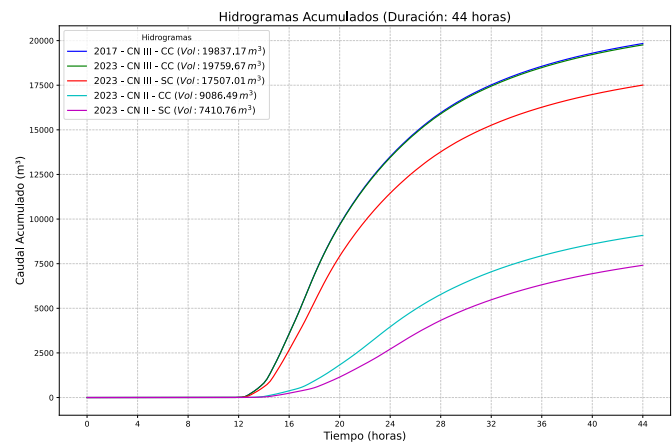


Fig. 9 Volúmenes acumulados para los diferentes escenarios

B.1 Escenarios CN III: Comparación Temporal (2017 vs. 2023 con CC)

El análisis comparativo entre los escenarios correspondientes a 2017-CN III-CC y 2023-CN III-CC demuestra estabilidad en las condiciones hidrológicas bajo un contexto de cambio climático, incluso considerando los ajustes realizados en los parámetros del Número de Curva. Este comportamiento se refleja en las variaciones mínimas observadas tanto en el caudal pico (Q_p) como en el volumen total acumulado de escorrentía, lo cual sugiere que, en este caso, los cambios en las condiciones del suelo y uso del suelo no generan alteraciones significativas en la dinámica hidrológica de la cuenca.

Para el caudal pico (Q_p), los resultados muestran que, en el año 2017, bajo el escenario CN III con cambio climático, el valor registrado fue de $431.96 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que, en el año 2023, bajo las mismas condiciones climáticas y del CN, el caudal pico fue de $430.32 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto implica una reducción mínima del 0.38%, lo que refleja que las variaciones en las condiciones del suelo o cobertura vegetal asociadas a las actualizaciones del CN tienen un impacto prácticamente insignificante en los valores máximos de caudal bajo estos escenarios. De manera similar, el volumen total acumulado de escorrentía en 2017 alcanzó un valor de $19,837.17 \text{ m}^3$, en comparación con los $19,759.67 \text{ m}^3$ registrados en 2023. Este resultado representa una disminución igualmente pequeña del 0.39%, confirmando la estabilidad en el comportamiento hidrológico de la cuenca frente a las condiciones climáticas proyectadas.

Estas reducciones marginales en ambos parámetros hidrológicos indican que los ajustes en el Número de Curva realizados para el escenario de 2023, en comparación con 2017, no generan diferencias significativas en los resultados. Esto puede atribuirse a la consistencia en las condiciones climáticas simuladas para ambos años, lo que sugiere que los factores climáticos, más que los cambios en los parámetros del suelo

dominan el comportamiento hidrológico en este contexto. En términos científicos, estos resultados destacan la importancia de la estabilidad climática en la generación de escorrentía, mientras que los ajustes en los parámetros del CN, bajo escenarios similares de cambio climático, parecen tener un impacto secundario en la dinámica hidrológica de la cuenca. Este resultado proporciona evidencia adicional para validar la robustez del modelo hidrológico utilizado y su capacidad para capturar dinámicas complejas bajo diferentes configuraciones.

B.2 Impacto del cambio climático en CN III y CN II (2023)

El análisis comparativo del impacto del cambio climático en los escenarios con CN III y CN II para el año 2023 revela diferencias significativas en términos de caudal pico (Qp) y volumen acumulado de escorrentía, destacando la influencia de las condiciones climáticas en la dinámica hidrológica de la cuenca. Estas diferencias no solo reflejan la sensibilidad del sistema hidrológico al cambio climático, sino también cómo las características del suelo, representadas por las condiciones del CN, amplifican o atenúan la respuesta hidrológica.

TABLA III
CAUDAL PICO (Qp) Y VARIACIÓN POR CAMBIO CLIMÁTICO

Escenario	Qp (m ³ /s)	Incremento por CC (%)
2023 - CN III - CC	430.32	+20.1%
2023 - CN III - SC	358.36	Base
2023 - CN II - CC	143.12	+28.7%
2023 - CN II - SC	111.24	Base

TABLA IV
VOLUMEN TOTAL ACUMULADO Y VARIACIÓN POR CAMBIO CLIMÁTICO

Escenario	Volumen (m ³)	Incremento por CC (%)
2023 - CN III - CC	19759.67	+12.9%
2023 - CN III - SC	17507.01	Base
2023 - CN II - CC	9086.49	+22.6%
2023 - CN II - SC	7410.76	Base

Según la TABLA III, en el caso del Qp, el escenario 2023-CN III-CC registra un valor de 430.32 m³/s, lo que representa un incremento del 20.1% en comparación con el escenario sin cambio climático (SC), donde el Qp es de 358.36 m³/s. Este aumento refleja cómo las condiciones climáticas más extremas proyectadas bajo el escenario de cambio climático pueden exacerbar los caudales pico en suelos con mayor saturación inicial (CN III). Por otro lado, el escenario con CN II, representando condiciones de menor saturación, muestra valores de Qp más bajos en ambos casos. Para el escenario 2023-CN II-CC, el caudal pico alcanza los 143.12 m³/s, lo que supone un incremento del 28.7% respecto al escenario 2023-CN II-SC, donde el Qp es de 111.24 m³/s. Este análisis indica que, aunque el impacto relativo del cambio climático es mayor en el caso de CN II, los valores absolutos de caudal pico permanecen significativamente menores en comparación con CN III debido a las condiciones iniciales del suelo menos saturado.

Según la TABLA IV, en términos de volumen total acumulado de escorrentía, el análisis sigue un patrón similar. Para el escenario 2023-CN III-CC, el volumen acumulado alcanza los 19,759.67 m³, lo que representa un incremento del 12.9% respecto al escenario sin cambio climático (17507.01 m³). Este aumento en el volumen refleja la capacidad del cambio climático para intensificar la generación de escorrentía en suelos ya saturados, lo que puede agravar las condiciones de inundación en eventos extremos. Por su parte, el escenario con CN II bajo cambio climático (2023-CN II-CC) presenta un volumen acumulado de 9,086.49 m³, un incremento del 22.6% respecto al escenario sin cambio climático (7410.76 m³). Esto sugiere que, aunque los volúmenes absolutos son menores en comparación con CN III, el cambio climático tiene un impacto proporcionalmente mayor en suelos con menor saturación inicial.

Los resultados de ambos análisis indican que las condiciones de saturación del suelo, representadas por los valores del CN, juegan un papel significativo y sensible en la respuesta hidrológica bajo escenarios de cambio climático. Los incrementos en caudales pico y volúmenes acumulados son más pronunciados en términos relativos para CN II, pero las condiciones absolutas de mayor riesgo se observan en CN III debido a la menor capacidad de infiltración asociada a suelos más saturados. Este comportamiento tiene importantes implicaciones para la gestión del riesgo hídrico en la cuenca, particularmente en el diseño de estrategias de mitigación y adaptación enfocadas en la gestión del suelo y la planificación de infraestructura hidráulica.

La integración de estos escenarios comparativos proporciona una visión integral del impacto del cambio climático en los regímenes hidrológicos. Los incrementos observados en los valores de Qp y volumen acumulado subrayan la necesidad de considerar estas proyecciones en la planificación hídrica de la región, especialmente para anticipar y manejar los efectos adversos asociados a eventos extremos. Además, estos resultados resaltan la utilidad de modelos distribuidos como el utilizado en este estudio, que permite capturar la interacción entre las condiciones climáticas y las características del suelo en diferentes escenarios hidrológicos.

III. CONCLUSIONES

El presente estudio enfoca la importancia de la integración de modelos *hidrológicos-hidráulicos* distribuidos para evaluar el impacto del cambio climático en cuencas experimentales como la del río Ichu, utilizando herramientas avanzadas y simulaciones en la plataforma HEC-RAS. Los resultados obtenidos permiten extraer varias conclusiones importantes en términos científicos y prácticos.

Los escenarios analizados revelan que el cambio climático tiene un impacto directo en la intensificación de eventos hidrometeorológicos extremos, aumentando tanto los caudales pico como los volúmenes acumulados de escorrentía. En particular, se observa que en condiciones de alta saturación del

suelo (CN III), el incremento relativo por cambio climático es significativo, con aumentos del 20.1% en Qp y del 12.9% en volumen acumulado. Este comportamiento refleja la influencia predominante de los factores climáticos sobre las dinámicas hidrológicas, especialmente en suelos con baja capacidad de infiltración. Sin embargo, los escenarios con condiciones de menor saturación del suelo (CN II) destacan por presentar incrementos relativos aún mayores, con aumentos de hasta el 28.7% en caudales pico y 22.6% en volúmenes acumulados, aunque con valores absolutos significativamente más bajos. Esto evidencia que los suelos menos saturados son más sensibles a las variaciones climáticas, lo que podría tener implicaciones importantes para el manejo de áreas con características similares.

La estabilidad observada en el análisis comparativo entre los escenarios 2017-CN III-CC y 2023-CN III-CC sugiere que, en ausencia de cambios significativos en las condiciones del uso del suelo, los ajustes en los parámetros del CN no generan alteraciones sustanciales en la dinámica hidrológica. Este resultado es de relevancia para la validación de los modelos hidrológicos utilizados, pues demuestra que estos son capaces de capturar las variaciones climáticas de manera consistente. Asimismo, la pequeña reducción en los valores de Qp y volumen acumulado, de 0.38% y 0.39% respectivamente, reafirma que la estabilidad de los cambios del parámetro CN no son significativos.

Los análisis de cambios en los valores del CN entre 2017 y 2023 destacan tendencias relevantes que reflejan dinámicas en la cobertura y uso del suelo. Si bien la mayor parte de la cuenca se mantuvo sin cambios significativos en el CN, aproximadamente el 7% del área total presentó incrementos significativos asociados con actividades antropogénicas, como la deforestación y la expansión urbana, que incrementan el potencial de escorrentía y el riesgo de inundaciones. Por otro lado, se identificaron mejoras en un 7.5% del área, lo que puede atribuirse a esfuerzos de conservación o reforestación, subrayando la importancia de estas prácticas en la mitigación de riesgos hidrológicos.

Finalmente, el uso de herramientas avanzadas como el aplicativo GPCN10, combinado con datos de alta resolución de Sentinel-2 y SoilGrid, ha permitido automatizar y mejorar significativamente la precisión en la parametrización del CN, proporcionando una base sólida para la modelación hidrológica. Esta metodología es esencial no solo para evaluar el impacto del cambio climático, sino también para diseñar estrategias efectivas de gestión del riesgo hídrico y la planificación de infraestructura hidráulica en zonas vulnerables como Huancavelica. En conclusión, los hallazgos de este estudio destacan la utilidad de modelos distribuidos y herramientas geoespaciales en la evaluación y manejo de los impactos del cambio climático en los regímenes hidrológicos. Las proyecciones obtenidas no solo proporcionan información crítica para anticipar escenarios extremos, sino que también apoyan la toma de decisiones informadas en la gestión de los recursos hídricos, promoviendo la sostenibilidad y la resiliencia

en regiones propensas a riesgos climáticos. Estos resultados refuerzan la necesidad de integrar ciencia, tecnología y políticas públicas para enfrentar los desafíos del cambio climático en el ámbito hidrológico.

REFERENCIAS

- [1] SENAMHI, «Escenarios del cambio climático en el Perú al 2050 : cuenca del Río Piura», SENAMHI, dic. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1777>
- [2] K. J. Osorio Díaz, L. Ramos Fernández*, y T. Velásquez Bejarano, «Proyección de los impactos del cambio climático en el caudal de la cuenca del río Urin-Perú, bajo escenarios del CMIP5-RCP», *Idesia Arica*, vol. 40, n.º 1, pp. 101-114, mar. 2022, doi: 10.4067/S0718-34292022000100101.
- [3] Llauca Harold, «Estudio de modelamiento hidrológico a paso diario a nivel nacional para el monitoreo de potenciales inundaciones», dic. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1777>
- [4] R. F. León Ochoa, D. M. Portuquez Maurtua, y Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima - Perú, «Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura - Perú, considerando la incidencia del cambio climático», *Rev. Investig. Altoandinas - J. High Andean Res.*, vol. 21, n.º 3, pp. 182-193, jul. 2019, doi: 10.18271/ria.2019.476.
- [5] Esri and Impact Observatory, «Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Time Series». [En línea]. Disponible en: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=cfeb7609de5f478eb7666240902d4d3d>
- [6] Esri Newsroom, «Esri Releases Latest Land Cover Map with Updated Sentinel-2 Satellite Data». Accedido: 7 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.esri.com/about/newsroom/announcements/esri-releases-latest-land-cover-map-with-updated-sentinel-2-satellite-data/>
- [7] K. Karra, C. Kontgis, Z. Statman-Weil, J. C. Mazzariello, M. Mathis, y S. P. Brumby, «Global land use / land cover with Sentinel 2 and deep learning», en *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, Brussels, Belgium: IEEE, jul. 2021, pp. 4704-4707. doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
- [8] C. W. ROSS, L. PRIHODKO, J. ANCHANG, S. KUMAR, W. JI, y N. P. HANAN, «Global Hydrologic Soil Groups (HYSGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling», 2018, *ORNL Distributed Active Archive Center*. doi: 10.3334/ORNLDAAC/1566.
- [9] IUSS Working Group WRB, *World Reference Base for Soil Resources: International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps*, Fourth edition. Vienna, Austria, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/cc4403en/cc4403en.pdf>
- [10] T. Hengl *et al.*, «SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning», *PLOS ONE*, vol. 12, n.º 2, p. e0169748, feb. 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0169748.
- [11] H. H. Jaafar, F. A. Ahmad, y N. El Beyrouthy, «GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design», *Sci. Data*, vol. 6, n.º 1, p. 145, ago. 2019, doi: 10.1038/s41597-019-0155-x.
- [12] Marisa Escobar, David Purkey, Jean Christophe Pouget, Wilson Suarez, Thomas Condom, y Cayo Ramos, «Evaluación de Impactos de Cambio Climático en Hidrología de Montañas: Desarrollo de una Metodología a través de un Estudio de Caso en Perú», nov. 2018. [En línea]. Disponible en: https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-ancash/archivos/public/docs/5_construccion_del_modelo_weap_del_rio_santa.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [13] Alan Llacza *et al.*, «Escenarios climáticos al 2050 en el Perú: Cambios en el clima promedio», Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, nov. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1470>
- [14] Cristian Montesinos, «Cuantiles de Precipitación Máxima Basado en la Mediana de Tres Modelos de Cambio Climático». SENAMHI, <https://idesep.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/meta/data/93215993-26c3-47f6-8f55-dc81e44a613f>, 2020.