

MODELADO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO DE LA CUENCA DEL RÍO GRANDE (CÓRDOBA, ARGENTINA) EN BASE A DATOS DE PRECIPITACIÓN DERIVADOS DE SATÉLITES

DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODELING OF RÍO GRANDE BASIN (CÓRDOBA, ARGENTINA) BASED ON SATELLITE-DERIVED PRECIPITATION DATA

Juan F. Weber ⁽¹⁾ y Máximo G. Jaeggi ⁽²⁾

⁽¹⁾ Grupo de Investigación, Desarrollo y Transferencia en Recursos Hídricos y Saneamiento, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Córdoba, Argentina.

e-mail: jweber@frc.utn.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3958-9580>

⁽²⁾ Grupo de Investigación, Desarrollo y Transferencia en Recursos Hídricos y Saneamiento, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Córdoba, Argentina.

e-mail: maxijjaeggi@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7125-6702>

RESUMEN

Se presenta el desarrollo, implementación y calibración de un modelo hidrológico de simulación continua para la cuenca del río Grande (Córdoba, Argentina). Esta cuenca, de un área de 592.7 km², se desarrolla sobre la vertiente oriental de la Sierra de Comechingones. Para una mejor representación de la distribución espacial de la precipitación, se implementó un procedimiento de asimilación de los datos de precipitación derivados de satélites del producto PDIR-Now, en conjunto con siete estaciones pluviométricas. El modelo se implementó a través del programa SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool) y la calibración a través del programa SWAT+ Toolbox. Para la descripción de la red de drenaje en SWAT+, se ajustaron las relaciones de la geometría hidráulica en base a observaciones locales. Para la calibración se contó con una sección fluviométrica en la descarga de la cuenca. Se presentan los parámetros de mayor sensibilidad y sus modificaciones producto de la calibración, en conjunto con los estadísticos del ajuste. Se considera que el modelo implementado describe razonablemente el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Grande, típica de las cuencas de la región serrana de Córdoba.

Palabras clave: Modelos Hidrológicos, SWAT+, Simulación Continua, Calibración Automática, Sensores Remotos.

ABSTRACT

The development, implementation, and calibration of a continuous simulation hydrological model for the Río Grande basin (Córdoba, Argentina) is presented. This basin, with an area of 592.7 km², is located on the eastern slope of the Sierra de Comechingones range. To better represent the spatial distribution of precipitation, a procedure for assimilating precipitation data derived from the PDIR-Now satellite product, together with seven rain gauge stations, was implemented. The model was implemented using the SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool) program and calibrated through the SWAT+ Toolbox program. For the description of the drainage network in SWAT+, the hydraulic geometry relationships were adjusted based on local observations. The calibration was carried out using a flow measurement section at the basin's discharge point. The parameters with the highest sensitivity and their modifications resulting from the calibration, along with the adjustment statistics, are presented. It is considered that the implemented model reasonably describes the hydrological behavior of the Río Grande basin, typical example of the watersheds in the mountainous region of Córdoba.

Keywords: Hydrological Models, SWAT+, Continuous Simulation, Automatic Calibration, Remote Sensing.

INTRODUCCIÓN

La Hidrología trata de los complejos fenómenos naturales que componen el ciclo hidrológico. Procesos tales como la precipitación, infiltración, evaporación y escurrimiento en ríos, dependen de un gran número de factores, que dificultan su análisis, tanto cuantitativo como cualitativo. Un modelo hidrológico es una herramienta que permite entender y representar el comportamiento de una cuenca hidrográfica y prever condiciones diferentes de las observadas (Tucci, 2005). Los modelos se clasifican comúnmente, entre otras formas, según el tipo de variables utilizadas en el modelado (estocásticas o deterministas), la escala temporal analizada (de eventos o de simulación continua), el tipo de relaciones entre estas variables (empírica o conceptual), la forma de representación de los datos (discreta o continua), la existencia o no de relaciones espaciales (concentradas o distribuidas) y existencia de dependencia temporal (estacionaria o dinámica) (Marinho Filho et al., 2012).

Los Modelos Hidrológicos Distribuidos (MHD) toman en cuenta explícitamente la variabilidad espacial de los procesos, entradas, condiciones de borde y/o de las características del sistema (cuenca).

La dinámica hidrológica en una cuenca hidrográfica está determinada principalmente por las características y el régimen de precipitación. Los modelos hidrológicos son extremadamente sensibles a los datos de precipitación. Por lo tanto, el uso de modelos hidrológicos requiere datos confiables de precipitación espacial y temporal que sean representativos de las cuencas. En la práctica, la escasez o ausencia de información de campo o experimental ha limitado históricamente la aplicabilidad de este tipo de modelos (Singh, 1995). Sin embargo, en los últimos años, los MHD se están volviendo comunes en una variedad de aplicaciones. Mediante la revisión de los modelos existentes junto con el desarrollo de nuevos modelos, la Hidrología se esfuerza por seguir el ritmo del crecimiento explosivo de las fuentes de datos geoespaciales en línea, la teledetección y la tecnología de radar para la medición de la precipitación. En este contexto no es sorprendente que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se hayan convertido en una parte integral de los estudios hidrológicos considerando el carácter espacial de los parámetros y las entradas que controlan los procesos hidrológicos (Vieux, 2004). Entre los aspectos positivos que pueden mencionarse, en relación a la incorporación de las

tecnologías SIG al modelado hidrológico, se destaca el análisis de la variación espacial de la precipitación, considerada en los inicios como elemento constante y estático. Esto permite un análisis de las diferentes intensidades de precipitación para los distintos puntos de una cuenca, así como el estudio de los movimientos de las tormentas y las variaciones que ello conlleva (Olaya Ferrero, 2004).

A pesar de que individualmente los términos "Datos de Precipitación Derivados de Satélites" (DPDS) y "Modelado Hidrológico" han sido ampliamente estudiados a lo largo de al menos tres décadas, su uso en conjunto ha cobrado interés recién en los últimos tiempos (Gebremichael y Hossain, 2009), ya que los DPDS han tenido históricamente un uso limitado en la predicción de inundaciones y en el modelado de la escorrentía porque se consideró que estas estimaciones de lluvia no eran confiables (Artan et al., 2007). La corrección de los DPDS basadas en información de campo mejora significativamente su calidad como insumo de los MHD al reducir en gran medida el sesgo en las predicciones, especialmente en áreas montañosas. Estas correcciones son necesarias en el uso de los DPDS en el modelado hidrológico, ya que se ha demostrado que los errores de lluvia tienen un fuerte impacto en las predicciones del caudal de los ríos (Pan et al., 2010) y consecuentemente, en el impacto de las inundaciones (Maggioni y Massari, 2018). Adicionalmente, los DPDS proveen de la información de entrada necesaria e inexistente en la simulación hidrológica de cuencas no instrumentadas (Khan et al., 2012), situación frecuente en los países con recursos limitados o en vías de desarrollo.

Estado del conocimiento del tema

Por estos motivos, y por la creciente disponibilidad de DPDS con cada vez mayor resolución y cobertura espacial y temporal, en los últimos años se ha incrementado notablemente el número de aplicaciones de modelos hidrológicos distribuidos alimentados con DPDS. Esto se vio potenciado por la incorporación de "generadores de clima" en modelos hidrológicos distribuidos ampliamente utilizados como SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al. 2012) que permiten el uso de la información climática sintética proveniente del producto de reanálisis Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) (Saha et al., 2010), incluidos los campos de precipitación.

Collischonn et al. (2008) evaluaron las estimaciones de lluvia del producto satelital Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) sobre la cuenca del río Tapajós, un importante afluente del Amazonas. Las estimaciones de lluvia TRMM de tres horas se agregaron a valores diarios y se compararon con la lectura diaria de los pluviómetros de la cuenca después de interpolar ambos datos en una cuadrícula regular. Luego se utilizaron TRMM diarios y campos de lluvia interpolados por pluviómetros como entrada para un modelo hidrológico a gran escala para toda la cuenca; los hidrogramas calculados se compararon con observaciones en varias secciones de aforo a lo largo del río Tapajós y sus principales afluentes. Los resultados del modelado hidrológico mostraron que los hidrogramas calculados basados en TRMM son comparables con los obtenidos utilizando datos de pluviómetros.

Bitew et al. (2012) se centraron en evaluar cuatro DPDS de alta resolución global ampliamente utilizados: CMORPH (Climate Prediction Center CPC MORPHing technique), TMPA-TRMM (3B42RT), TMPA (Multisatellite Precipitation Analysis) (3B42) y PERSIANN (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks) con una resolución espacial de 0.25° y una resolución temporal de 3 h a través de su uso en la aplicación del modelo SWAT en una cuenca montañosa de 299 km² en Etiopía. Los resultados muestran sesgos significativos en las estimaciones de precipitación satelital. Se examinó la capacidad predictiva de cada uno de los DPDS utilizando un modelo SWAT calibrado en dos enfoques diferentes: con precipitaciones pluviométricas como entrada, y con cada uno de los productos de precipitación satelital como entrada. Se obtienen mejoras significativas en las simulaciones de caudal del modelo cuando éste se calibra con datos reales de precipitación frente a los DPDS. La calibración de SWAT con estimaciones de precipitación satelital resultó en valores de número de curva (CN) que son considerablemente más altos que los valores tabulados estándar, por lo que se debe tener precaución al usar valores de parámetros tabulados estándar con entradas de precipitación satelital. El estudio también reveló que la corrección de sesgos de las estimaciones de precipitación satelital mejora significativamente las simulaciones del modelo.

Cohen Liechti et al. (2012) analizaron, para la cuenca del río Zambezi (África) tres estimaciones derivadas de

satélites de alta resolución operativas y reconocidas: los productos TRMM 3B42, FEWS RFE2.0 (Famine Early Warning Systems) y CMORPH, en términos de distribución espacial y temporal de las precipitaciones. En términos de confiabilidad, la correspondencia de todas las estimaciones con los datos terrestres aumentó con el paso de tiempo elegido para el análisis. El cálculo de la proporción de volumen indicó que CMORPH sobreestimó la lluvia en casi un 50%. Las estadísticas de las estimaciones de TRMM y FEWS mostraron resultados bastante similares. Debido a su menor intercorrelación y su conjunto de datos más largo, eligieron el producto TRMM 3B42 como entrada para el modelo hidráulico-hidrológico de la cuenca.

Tong et al. (2014) evaluaron cuatro productos de precipitación satelital de alta resolución global ampliamente utilizados en comparación con observaciones de pluviómetro sobre el Plateau Tibetano (TP). También investigaron la capacidad de los productos satelitales en simulaciones hidrológicas utilizando el modelo VIC (Capacidad de Infiltración Variable). Los resultados mostraron que los DPDS 3B42 y el CMORPH tienen un mejor rendimiento que el 3B42RT y el PERSIANN tanto a escala de meseta como de cuenca. El 3B42 mostró un rendimiento comparable a los datos de la CMA (Administración Meteorológica de China) tanto en simulaciones de caudal mensuales como diarias, principalmente debido al ajuste mensual de los pluviómetros involucrado en él.

Camici et al. (2018) exploraron la viabilidad de utilizar DPDS como forzantes de un modelo hidrológico agregado - MISDC (Modelo Hidrológico SemiDistribuido in continuo) - en 15 cuencas en el área mediterránea con diferentes tamaños y características fisiográficas. Específicamente, se utilizaron en el análisis los DPDS: TMPA 3B42-RT, CMORPH, PERSIANN y SM2RAINCCI (Soil Moisture to Rain - Climate Change Initiative). Los resultados mostraron que los DPDS proporcionan un rendimiento relativamente bajo cuando se usan para forzar el modelo MISDC en comparación con el caso en que se utilizan observaciones terrestres. Los peores resultados se obtienen en cuencas más pequeñas (< 500 km²), que, sin embargo, representan el principal objetivo para el modelado de inundaciones en el área mediterránea. Se obtienen rendimientos relativamente mejores cuando DPDS independientes se integran entre sí: esto sugiere que la explotación (a través de la integración) de fuentes independientes de lluvia

ofrece un camino potencial para reducir los errores de caudal inducidos por la lluvia, incluso en áreas desafiantes como el Mediterráneo.

Le et al. (2020) evaluaron ocho conjuntos de DPDS, que incluyeron tanto productos no corregidos como corregidos: TMPA-TRMM, GPM (Global Precipitation Measurement), CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station) y PERSIANN. Estos conjuntos de datos se utilizaron con seis cuencas fluviales representativas, correspondientes a seis zonas subclimáticas en Vietnam, durante el período 2002-2017. Las evaluaciones se llevaron a cabo en dos partes: 1) intercomparación de los DPDS con pluviómetros, para las seis cuencas; 2) comparación de las simulaciones de caudal, utilizando el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), forzado por precipitación de pluviómetros y DPDS. Los resultados indicaron que los DPDS corregidos con pluviómetros exhibieron ligeramente mejores resultados sobre los conjuntos de datos no corregidos en comparación con los pluviómetros, pero mostraron un rendimiento mucho mayor como entradas en simulaciones hidrológicas. El conjunto de datos de CHIRPS demostró un sesgo relativamente bajo, lo que podría beneficiar la planificación de recursos hídricos a largo plazo para sequías. En las simulaciones mensuales de caudal, las simulaciones alimentadas por DPDS superaron a las simulaciones alimentadas por pluviómetros en una cuenca más grande (Región Noroeste), que tiene una baja densidad de pluviómetros.

En la actualidad, los esfuerzos están centrados en estudiar cómo las incertidumbres en los DPDS se propagan en los resultados de los modelos hidrológicos (Hong et al., 2006; Mazzoleni et al., 2019; Wang et al., 2020), de qué forma corregir los DPDS para su adecuado uso como insumo de modelos hidrológicos (Tobin y Bennett, 2010; De Vera y Terra, 2012; Wang et al., 2020), o cómo combinar las fuentes de información superficiales y remotas (Rozante et al., 2010) considerando que el impacto de las inundaciones depende no solo de las características de la inundación en sí, sino también de las características de la región (densidad de población, uso de la tierra, factores geofísicos y climáticos), y por lo tanto se requiere un análisis regional para evaluar el desempeño de los modelos hidrológicos en monitorear y predecir inundaciones (Maggioni y Massari, 2018).

OBJETIVOS

El objetivo general de esta línea de trabajo es evaluar la aplicabilidad de los DPDS en el modelado hidrológico distribuido en cuencas de tamaño medio [$O(10^3 \text{ km}^2)$] en la región serrana de Córdoba (Argentina).

Entre los objetivos específicos se pueden citar:

- Conceptualizar e implementar un modelo hidrológico distribuido para la cuenca instrumentada del río Grande (Córdoba, Argentina).
- Seleccionar los DPDS más adecuados para el modelado hidrológico de la cuenca.
- Implementar una técnica para la asimilación de los DPDS a la información de campo (pluviométrica).
- Describir las relaciones de la geometría hidráulica para la red de drenaje de la cuenca.
- Calibrar el modelo implementado a partir de las observaciones de caudales disponibles en la cuenca a estudiar, realizando un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo.

METODOLOGÍA

Caso de estudio

La cuenca del río Grande está ubicada en la provincia de Córdoba, dentro del departamento Calamuchita ubicado al Sur-Oeste de la ciudad de Córdoba (Figura 1). Dentro de esta cuenca se encuentran las localidades de Villa Yacanto, El Durazno, Los Vallecitos y en proximidades se encuentra Lutti.



Figura 1. Ubicación de la Cuenca del río Grande en Ume Pay.

La superficie de la cuenca es de 592.7 km² y se desarrolla entre los 813 msnm y 2699 msnm. Esta cuenca aporta su caudal en forma directa a la represa hidroeléctrica Río Grande, la cual lleva su nombre debido a su cauce principal.

El río Grande nace en la cuenca homónima a partir de la confluencia de los ríos El Manzano, El Durazno y Las Letanías, los cuales son de régimen permanente; éstos a su vez se encuentran alimentados por otros arroyos más pequeños. Su curso continúa a través del embalse Arroyo Corto, luego de este continúa en forma de cauce regulado hasta llegar al embalse Río Tercero.

La cuenca hidrográfica del río Grande ha sido definida estableciendo como punto de cierre el aforo en la estación Ume Pay (Figura 2), una estación medidora de niveles de agua en el cauce por medio de un limnógrafo. Luego estos niveles son convertidos en caudales mediante curvas altura-caudal (H-Q).

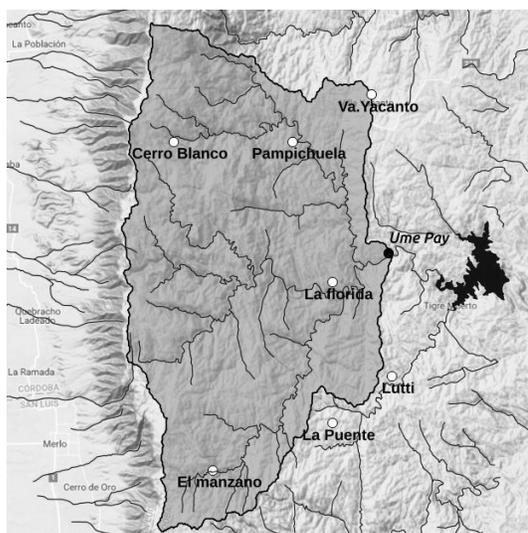


Figura 2. Cuenca del río Grande en Ume Pay: ubicación de estaciones pluviométricas y limnimétrica.

La cuenca río Grande se encuentra sobre la formación geológica Sierra de Comechingones. Este complejo metamórfico está compuesto principalmente por metatexitas y diatexitas, de manera subordinada aparecen cuerpos de gneises biotíticos granatíferos, anfibolitas, filonitas, pequeños bancos de mármoles y cuerpos pegmatíticos graníticos (Radice et al., 2012). En las partes de baja altura predomina el complejo metamórfico (filitas, esquistos, gneis, anfibolitas y calizas) y en la parte

central, más alta, dominan rocas graníticas de gran altura (cerro Champaquí, 2790 msnm). La cuenca se encuentra sobre la vertiente oriental de esta formación, la cual es amplia y está constituida por una serie de escalones de falla. En este costado oriental la alteración del complejo metamórfico es profunda, debido a una mayor presencia de humedad y de planos de esquistosidad subverticales que favorecen a la penetración del agua entre láminas (meteorización profunda).

En las zonas altas graníticas, de mayor humedad, los suelos son someros, de texturas finas, con buenos contenidos de materia orgánica, y alto porcentaje de roca expuesta. Además existen zonas denominadas “Pampas”, tales como la de Achala (2000 msnm) y otras menores con cobertura eólica loéssica más reciente y suelos profundos como las de Yacanto.

La vegetación autóctona de la zona está vinculada al clima regido por alturas relativas. En una secuencia altitudinal se puede considerar que hasta los 1200 msnm domina el bosque serrano, luego un estrato intermedio (romerillal) que puede estar ausente y a mayores alturas el pastizal-gramineal, o césped de altura y bosquecillos de tabaquillo en quebradas escarpadas y protegidas. Además, se encuentran en la cuenca plantaciones de exóticas, en particular coníferas (Agencia Córdoba Ambiente SE e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [ACA - INTA], 2003) (Figura 3).



Figura 3. Río El Durazno. Se aprecian forestaciones de coníferas.

Información utilizada

Topografía

La cuenca del río Grande fue representada topográficamente a través del Modelo Digital de Elevaciones de la Argentina (MDE-Ar).

Mediante la combinación de información obtenida por las misiones satelitales Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) y Advanced Land Observing Satellite (ALOS), el Instituto Geográfico Nacional (IGN) desarrolló el modelo MDE-Ar v2.1, el cual abarca todo el territorio continental del país y está alineado verticalmente con el Sistema de Referencia Vertical Nacional (SRVN16). Este modelo ha sido sometido a un proceso de filtrado para corregir los valores de altitud de los píxeles que se hallaban fuera de los parámetros establecidos.

La misión SRTM fue un proyecto internacional realizado en el año 2000 por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) en colaboración con el Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), la Agencia Espacial Italiana (ASI) y la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA), con el fin de crear un modelo digital global de elevaciones de alta resolución y uniformidad utilizando la técnica de interferometría radar de apertura sintética (InSAR) (Van Zyl, 2001). Por su parte, la misión ALOS, llevada a cabo por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), permitió la elaboración de un modelo digital global de elevaciones mediante el uso de aproximadamente 3 millones de imágenes capturadas por el instrumento pancromático de teledetección para mapeo estéreo (PRISM) instalado en el satélite japonés de observación terrestre DAICHI (Rosenqvist et al., 2007).

El MDE-Ar v2.1, distribuido por el IGN, cuenta con una resolución espacial de 30 m y una precisión vertical de alrededor de 2 m, adecuada para el alcance de este trabajo. En la Figura 4 se puede ver un mapa de la topografía de la cuenca del río Grande generado a partir del modelo MDE-Ar.

Precipitaciones

Para el desarrollo del trabajo se contó con dos fuentes de información: datos pluviométricos provenientes del Sistema Nacional de Información Hídrica (datos reales), a través de siete estaciones pluviométricas distribuidas en la cuenca o en su vecindad (Figura 2), en el periodo 01/06/2000 – 31/05/2021; y datos derivados de satélite (datos virtuales) provenientes del producto PDIR-Now (Nguyen et al., 2020), adquiridos a través del CHRS Data Portal de la Universidad de California, Irvine (Nguyen et al., 2019).

PDIR-Now (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural

Networks - Dynamic Infrared Rain Rate near real-time) es un producto de precipitación satelital de alta resolución global en tiempo real ($0.04^\circ \times 0.04^\circ \approx 4\text{km} \times 4\text{km}$) desarrollado por el Center for Hydrometeorology and Remote Sensing (CHRS) de la Universidad de California, Irvine (UCI). PDIR-Now se ha implementado en el sistema global de monitoreo de precipitación satelital en tiempo real de UCI CHRS – iRain.

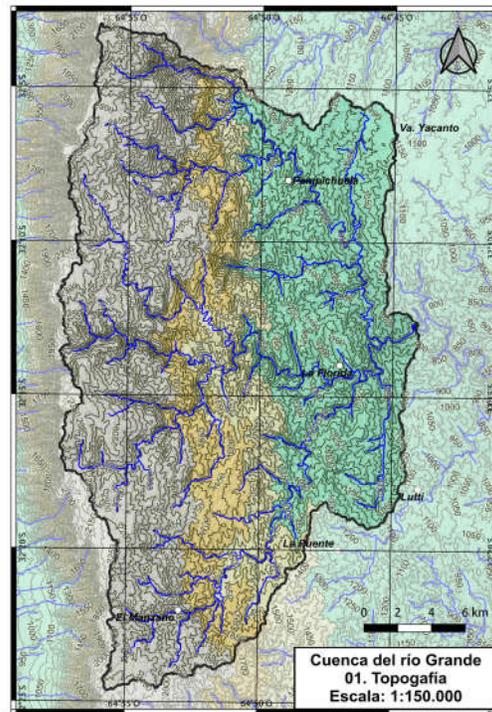


Figura 4. Topografía de la cuenca del río Grande.

La principal ventaja de PDIR-Now, en comparación con otros conjuntos de datos de precipitación en tiempo casi real, es su dependencia de la imagen de infrarrojo (IR) muestreada a alta frecuencia; consecuentemente, la latencia de PDIR-Now desde el momento de la ocurrencia de la lluvia es muy corta (15-60 minutos). Además, PDIR-Now tiene en cuenta los errores e incertidumbres que resultan del uso de imágenes de IR al adoptar una variedad de técnicas, siendo la más notable el desplazamiento dinámico de las curvas (Tb-R) utilizando climatología de precipitación. La corta latencia del PDIR-Now hace que el conjunto de datos sea adecuado para aplicaciones hidrológicas casi en tiempo real, como la predicción de inundaciones y el desarrollo de mapas de inundación. Además, estudios previos indican el potencial del algoritmo

PDIR para reconstruir estimaciones históricas de precipitación a alta resolución espacio-temporal (Nguyen et al., 2020).

Se adquirió la serie de precipitaciones virtuales espacialmente distribuidas en formato GeoTIFF, recortadas al área de interés, con una resolución temporal de 3 horas, en el periodo 11/03/2001–04/11/2020; estos campos de precipitaciones virtuales se acumularon entre las 9 am del día actual y las 6 am del día siguiente, de modo de cubrir un intervalo horario equivalente al de la medición pluviométrica tradicional.

Caudales

Como se indicó, la cuenca del río Grande cuenta con una estación limnométrica y de aforos en Ume Pay (Figura 2). Los caudales medios diarios se obtuvieron, al igual que las precipitaciones reales, del Sistema Nacional de Información Hídrica, para el periodo 01/06/2000 – 31/08/2020, con varios intervalos de datos faltantes (Figura 5).

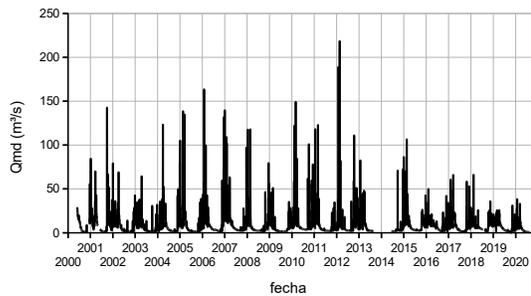


Figura 5. Serie de caudales medios diarios disponibles en Ume Pay.

Clima

En ausencia de estaciones meteorológicas en la zona de estudio, se utilizó la base de datos climática por defecto de SWAT+, lo que implica que las variables temperatura, humedad, intensidad del viento y radiación solar fueron recuperadas del producto de reanálisis NCEP CFSR (Saha et al., 2010).

El Reanálisis del Sistema de Pronóstico Climático del NCEP (CFSR) ofrece información climática desde el año 1979. Fue diseñado como un sistema global de alta resolución que combina atmósfera, océano, superficie terrestre y hielo marino para proporcionar la mejor estimación del estado de estos dominios durante ese tiempo. El CFSR incluye acoplamiento de atmósfera y océano, un modelo interactivo de hielo marino y asimilación de radiaciones satelitales. Ofrece resolución horaria y

espacial de 0.5° de latitud x 0.5° de longitud. Se distribuye a través del NCAR (National Center for Atmospheric Research) y se utiliza para múltiples propósitos, incluyendo pronósticos climáticos operativos, pronósticos históricos y análisis de la climatología de la Tierra.

Suelos

Los tipos de suelo presentes en la cuenca, y su distribución espacial, se obtuvieron de la Carta de Suelos de Córdoba, desarrollada en conjunto por el Ministerio de Agricultura y Ganadería de la provincia y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); en particular para este trabajo se contó con las hojas 3366-6 Santa Rosa de Calamuchita (Pacheco et al., s.f.) y 3366-12 Río de los Sauces (Bosnero et al., s.f.). Estos tipos de suelo fueron asociados a la taxonomía de suelos presentada por Food and Agriculture Organization (FAO) (1974), de modo de utilizar las bases de datos globales de suelos disponibles en SWAT+. En la Figura 6 se presenta el mapa de suelos de la cuenca.

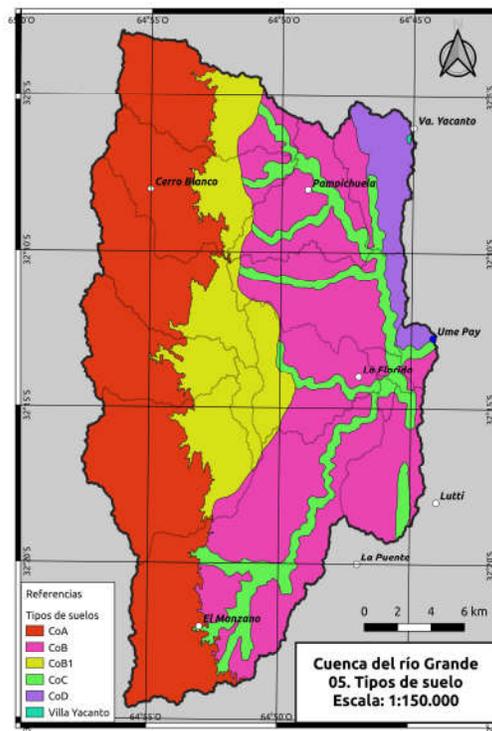


Figura 6. Mapa de suelos de la cuenca.

Los símbolos indicados en la Figura 6 corresponden a:
 - CoA. Ambiente fisiográfico: Sierras Altas. Características dominantes: suelos muy someros,

desarrollados sobre roca, fuertes pendientes y rocosidad aflorante. Clasificación FAO asociada: I-C-3c-3971.

- CoB. Ambiente fisiográfico: Sierras fuertemente inclinadas. Características dominantes: Suelos someros evolucionados sobre roca alterada y 20% de afloramiento rocoso. Clasificación FAO asociada: Kh1-1a-5778.

- CoB1. Ambiente fisiográfico: Sierras fuertemente inclinadas. Características dominantes: Suelos someros evolucionados sobre roca alterada y 40% de afloramiento rocoso. Clasificación FAO asociada: I-C-2c-3101.

- CoC. Ambiente fisiográfico: Quebradas con fuertes pendientes. Características dominantes: Suelos someros evolucionados sobre roca alterada, con intercalación de roca aflorante (más del 20%) y combinaciones de fuertes pendientes con algunos sectores de pendientes suaves. Clasificación FAO asociada: Je13-1a-4517.

- CoD. Ambiente fisiográfico: Pampa serrana – sectores ondulados del área serrana. Características dominantes: Suelos desarrollados sobre materiales loessoides, asociado a suelos someros evolucionados sobre roca alterada, presencia de calcáreo, tosca a distintos niveles y erosión hídrica. Clasificación FAO asociada: Kh1-1a-4768.

Asimilación de datos de precipitación

Se desarrolló e implementó un proceso de asimilación entre los datos de precipitación reales y virtuales, con el objetivo de lograr una versión mejorada de esta información. La motivación de esta asimilación se funda en aprovechar lo mejor de ambas fuentes: la fiabilidad de las precipitaciones reales, de la que adolecen los datos virtuales, y la variabilidad espacial de los datos virtuales, que no logran captar los datos reales, incluso luego de aplicar técnicas de interpolación espacial.

El proceso de asimilación propuesto se basa en las siguientes hipótesis:

- la precipitación real debe preservarse, en su localización, luego de la asimilación;
- es posible interpolar el campo de errores de la precipitación, determinados en la localización de los datos reales entre éstos y los datos virtuales;
- el campo de errores interpolados permite corregir los campos virtuales de precipitación.

De este modo, para cada conjunto diario de precipitaciones reales y virtuales, se implementó el algoritmo de asimilación representado en la Figura

7. Denominando S_i al conjunto de estaciones pluviométricas (reales), R_i las precipitaciones registradas en estas estaciones, $V(S_i)$ las precipitaciones virtuales en la localización de las estaciones reales, el campo de errores se obtuvo por interpolación espacial (aplicando el método de la inversa de la distancia al cuadrado o método de Shepard) de los errores en las estaciones definidos como lo expresa la ecuación (1):

$$E_i = V(S_i) - R_i \quad (1)$$

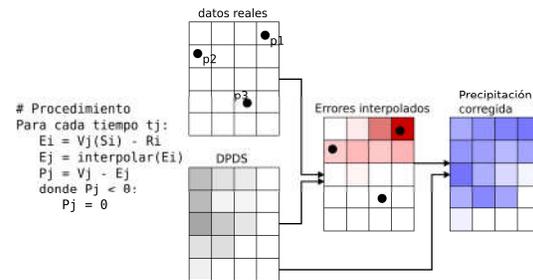


Figura 7. Algoritmo de asimilación de precipitaciones reales y virtuales.

El campo de errores E así interpolado, puede aplicarse a la corrección de los datos virtuales, generando un campo de precipitaciones corregidas P como se presenta en la ecuación (2):

$$P = V - E \quad (2)$$

Dado que en la operación del álgebra de mapas de la expresión (2) es posible que aparezcan valores $P < 0$, éstos se interpretan como ausencia de precipitación, asignando $P = 0$ en esos píxeles.

Este proceso se automatizó a través de un código desarrollado específicamente en Python, utilizando las librerías NumPy, Pandas, Geopandas y Rasterio. Este código generó tres archivos GeoTIFF por cada día considerado: el campo de precipitaciones reales interpolado, el campo de errores interpolado, y el campo de precipitaciones corregido.

Modelo hidrológico

El modelo hidrológico de la cuenca del río Grande se implementó a través del programa SWAT+, en base a su integración con el Sistema de Información Geográfica QGIS por medio del complemento QSWAT+.

Soil and Water Assessment Tool (Herramienta de asesoramiento en suelo y agua) es un modelo hidrológico de base física, simula el ciclo hidrológico mediante los distintos procesos que lo componen. Modela al ciclo hidrológico tanto a través del flujo superficial en la cuenca como en el flujo unidimensional en el cauce principal y sus tributarios. Además, permite simular procesos de calidad del agua.

El modelo SWAT en escala temporal se clasifica como continuo, ya que permite simular los procesos del ciclo hidrológico en periodos largos (meses o años). Permite además la distribución espacial de la información en zonas de menor tamaño a la cuenca. Inicialmente es posible dividir a la cuenca en subcuencas, esto permite diferenciar zonas dentro de la cuenca con distintas características. La información dentro de cada subcuenca es organizada mediante grupos de HRU (Unidades de Respuesta Hidrológica), estas son subdivisiones de menor tamaño a la subcuenca. Las HRU se clasifican y luego se aglutinan entre iguales, esto para caracterizar mejor a la subcuenca y lograr diferenciar zonas heterogéneas dentro de ésta. El modelo simula los distintos procesos del ciclo hidrológico en cada HRU. Además, el modelo organiza la información de cada subcuenca por clima, agua subterránea, vías de escurrimiento y drenaje de la subcuenca (Arnold et al., 1998).

La simulación del ciclo hidrológico se efectúa mediante un balance entre los procesos representados (ecuación 3).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (3)$$

donde SW_t es el contenido final de humedad del suelo, SW_0 es el contenido inicial de humedad del suelo, t es el tiempo, R_{day} es la precipitación en el día i , Q_{surf} es el escurrimiento superficial en el día i , E_a es la evapotranspiración en el día i , w_{seep} es la percolación en el día i , y Q_{gw} es el flujo de retorno en el día i .

Ésta es la base del modelo para simular otros procesos físicos y químicos, los cuales se ven afectados por el constante movimiento del ciclo hidrológico. En fase de terreno se mencionan: arrastre de sedimentos, de pesticidas, nutrientes y bacterias. Para la fase en conducción se mencionan: descargas y transporte de pesticidas,

bacterias, nutrientes, etc.; esto en las vías principales de cada subcuenca o en el cauce principal de la cuenca completa.

SWAT+ es una versión completamente reestructurada de SWAT que fue desarrollada para enfrentar los desafíos presentes y futuros en la modelización y gestión de recursos hídricos y para satisfacer las necesidades de la comunidad de usuarios a nivel mundial. Sus objetivos son: mejorar el desarrollo y mantenimiento del código; dar soporte a la disponibilidad, análisis y visualización de datos; y mejora las capacidades del modelo en cuanto a la representación espacial de elementos y procesos dentro de las cuencas hidrográficas. El cambio más importante es la implementación de unidades de paisaje y el enrutamiento de flujo y contaminantes a través de estas unidades. Además, SWAT+ ofrece más flexibilidad que SWAT en la definición de prácticas agronómicas, enrutamiento de diversas sustancias, como pesticidas y sedimentos, y conexión de sistemas de drenaje a la red natural de flujo (Bieger et al., 2017).

Para la presente implementación del modelo SWAT+, el cálculo de la evapotranspiración potencial se llevó a cabo mediante la ecuación de Penman-Monteith; el tránsito en la red de drenaje se efectuó a través del método de Muskingum. La infiltración se modeló a través del método CN-SCS.

Para cada día de la simulación se obtuvieron las precipitaciones corregidas medias espaciales en cada subcuenca, asignándolas a una estación localizada en el centroide de la misma, de modo de forzar a SWAT+ a asignar esas series a las respectivas subcuencas. Este cálculo se realizó mediante un código especialmente diseñado en Python, utilizando las librerías Numpy, Pandas, Rasterio y Rasterstats.

Geometría hidráulica

SWAT+ representa la geometría de las secciones transversales de la red de drenaje de la cuenca en forma simplificada a través de las relaciones potenciales dadas por la geometría hidráulica introducida por vez primera por Leopold y Maddock (1953); pero puestas en función del área drenante, en lugar del caudal (Bieger et al., 2015):

$$B = \alpha_B A^{\beta_B} \quad (4)$$

$$H = \alpha_H A^{\beta_H} \quad (5)$$

donde B (m) y H (m) son el ancho y la profundidad de la sección respectivamente, y A (km^2) es el área de la subcuenca aportante a la sección. Los parámetros α y β se obtienen por regresión por mínimos cuadrados a partir de un conjunto de datos. En ausencia de información, SWAT+ asume para estos parámetros los siguientes valores: $\alpha_B = 1.29$; $\beta_B = 0.6$; $\alpha_H = 0.13$; $\beta_H = 0.4$.

Para la determinación de la relación $B(A)$ se identificaron 176 secciones a lo largo de la cuenca del río Grande y se relevó digitalmente (mediante la herramienta Google Earth) el ancho de las mismas; luego se determinaron las respectivas áreas parciales de aporte, mediante el uso del Sistema de Información Geográfica QGIS. Finalmente, se determinaron por regresión los parámetros de la ecuación (4), que resultaron $\alpha_B = 2.16$; $\beta_B = 0.383$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.467$ (Figura 8).

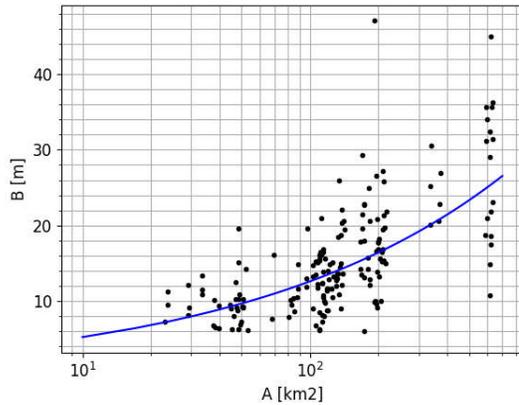


Figura 8. Relación potencial $B(A)$ para la cuenca del río Grande.

Para la estimación de las profundidades se recurrió al método de estimación estadística de caudales presentado por Bjerklie et al. (2003):

$$Q = 7.22B^{1.02}H^{1.74}S^{0.35} \quad (6)$$

donde Q (m^3/s) es el caudal y S (m/m) es la pendiente de la superficie libre, que se asumió igual a la del lecho. Esta última se obtuvo sintéticamente a partir del modelo digital de elevación MDE-Ar. Los anchos y caudales se obtuvieron para ocho fechas comprendidas entre 2010 y 2021, donde se dispuso simultáneamente de imágenes satelitales y caudales en la estación Ume Pay (Figura 2). Asumiendo un coeficiente de escorrentía constante en la cuenca, los

caudales en las 609 secciones consideradas se obtuvieron por simple regionalización lineal:

$$Q = \frac{A}{A_T} Q_T \quad (7)$$

donde Q y A son el caudal y el área de aporte de una sección dada, y Q_T y A_T son el caudal y el área de aporte de la cuenca completa (estación Ume Pay). Finalmente, de la ecuación (6) se despeja la profundidad H (m), que se grafica en función del área de aporte A (km^2), como se observa en la Figura 9. La regresión por mínimos cuadrados de la ecuación (5) arrojó los siguientes parámetros: $\alpha_H = 0.0491$; $\beta_H = 0.444$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.74$.

Este conjunto de cuatro parámetros localmente obtenidos fue utilizado en reemplazo de los valores por defecto dados por SWAT+.

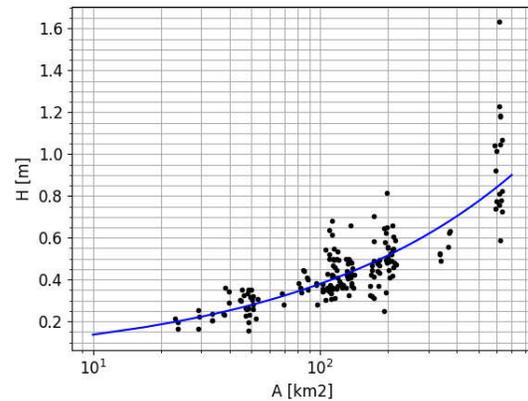


Figura 9. Relación potencial $H(A)$ para la cuenca del río Grande.

Calibración

Para la calibración del modelo se utilizó el algoritmo Dynamically Dimensioned Search (DDS) (Tolson y Shoemaker, 2007) implementado en la herramienta SWAT+ Toolbox. Como variable de estado se consideró el caudal medio diario en la estación Ume Pay, siendo la función objetivo a maximizar la Eficiencia de Nash-Sutcliffe NSE (Tucci, 2005):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (8)$$

donde \bar{Q}_o es la media de los caudales observados, y Q_m es el caudal modelado. Q_o^t es el caudal observado en el tiempo t .

- Los parámetros de calibración considerados fueron:
- alpha: es la constante de recesión del flujo base. Es un índice directo de la respuesta del flujo subterráneo a los cambios en la recarga;
 - revap_min: profundidad umbral del agua en el acuífero libre disponible para evaporación o percolación al acuífero profundo. El movimiento del agua desde el acuífero libre a la zona no saturada estará disponible solo si el volumen de agua en éste es igual o mayor que revap_min;
 - esco: factor de compensación de evaporación del suelo. Permite modificar la distribución en la profundidad para considerar el efecto de la succión capilar, formación de costras y grietas;
 - epco: factor de compensación de la absorción radicular. Permite disponer de la humedad en las capas inferiores del suelo para compensar el déficit de humedad disponible frente a la transpiración potencial;
 - cn2: número de curva en condiciones antecedentes de humedad normales (II) del método del CN-SCS;
 - flo_min: almacenamiento mínimo del acuífero para permitir el flujo de retorno;
 - chn: coeficiente n de Manning de la red de canales.

En concordancia con la metodología de calibración implementada en SWAT+ Toolbox, se establecieron

los límites máximos y mínimos de variación porcentual en los parámetros antes citados, junto con sus mínimos y máximos absolutos, según lo indicado en la Tabla 1.

Tabla 1. Límites mínimo y máximo (%) de variación de parámetros en la calibración.

Parámetro	Mínimo (%)	Máximo (%)	Mínimo abs.	Máximo abs.
alpha	-30	30	0	1
revap_min	-30	30	0	50
esco	-30	30	0	1
epco	-30	30	0	1
cn2	-30	30	35	95
flo_min	-30	30	0	50
chn	-30	30	0	0.30

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para cada día de la simulación se generaron los archivos GeoTIFF necesarios, junto con una representación gráfica de los campos de precipitación virtual, real interpolado y corregido. En la Figura 10 puede verse un ejemplo de esto último. En la Figura 11 se observa un gráfico de dispersión de las precipitaciones virtuales y corregidas versus las precipitaciones reales, en la localización de las estaciones pluviométricas. Puede observarse la significativa mejora en la correspondencia luego de la corrección.

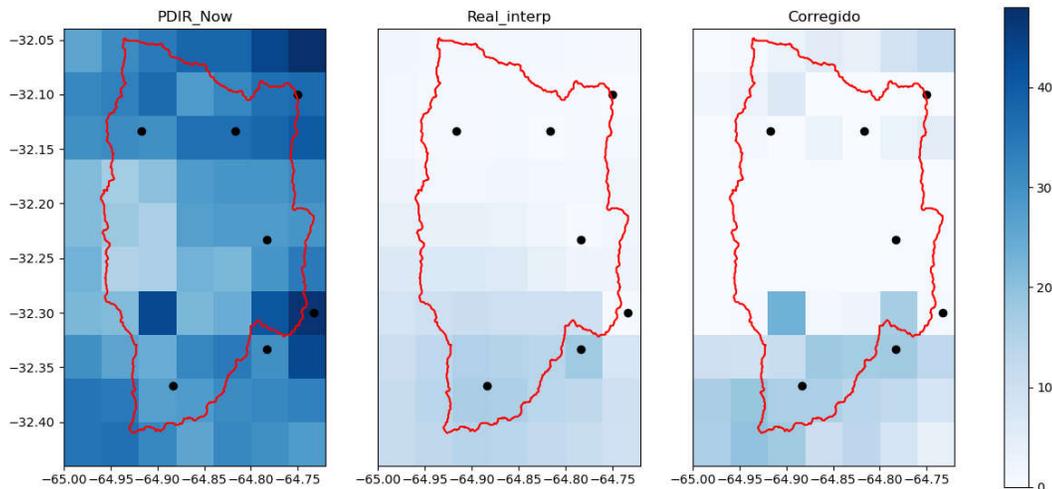


Figura 10. Campos de precipitaciones virtuales (izquierda), real interpolado (centro) y corregido (derecha). Ejemplo del 1/3/2001.

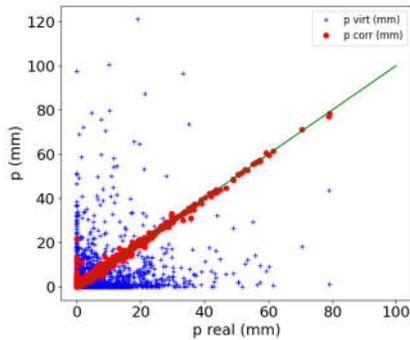


Figura 11. Precipitaciones virtuales y corregidas en función de las reales, en las estaciones pluviométricas.

La calibración de los parámetros indicados en la Tabla 1 arrojó los cambios porcentuales indicados en la Tabla 2. Como puede verse, los tres primeros parámetros explican casi el 95% de la mejora en el ajuste. El valor final de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (función objetivo) fue $NSE = 0.274$; el coeficiente de correlación de Pearson fue $r = 0.69$; el coeficiente de correlación de Spearman fue $r_s = 0.78$ y el sesgo porcentual p-BIAS = -2.65.

Como valores de referencia, el modelo estimó las magnitudes medias anuales (para el periodo considerado) de los procesos hidrológicos modelados presentadas en la Tabla 3. El valor medio del número de curva fue $CN = 80$.

En la Figura 12 se presenta el hidrograma de caudales medios diarios observados y simulados en

Ume Pay, en conjunto con la precipitación media diaria en la cuenca. Puede observarse una adecuada correspondencia entre ambas series de caudales. Esto se presenta en la Figura 13 a través de un gráfico de dispersión entre estas variables.

Tabla 2. Resultados de la calibración de los parámetros del modelo.

Parámetro	Cambio	Sensibilidad
cn2	19.01%	0.892093
alpha	28.78%	0.040046
chn	-29.56%	0.009354
epco	-29.68%	0.000657
flo_min	-28.85%	0.000527
esco	12.63%	0.000502
revap_min	9.36%	0.000380

Tabla 3. Balance hidrológico medio anual (en mm).

Proceso	Lámina (mm)
Precipitación	1120.2
Evapotranspiración potencial	1293.1
Evapotranspiración real	569.2
Escorrentamiento superficial	227.6
Flujo lateral	24.9
Revap	23.1
Flujo de retorno	508.3
Recarga	589.8

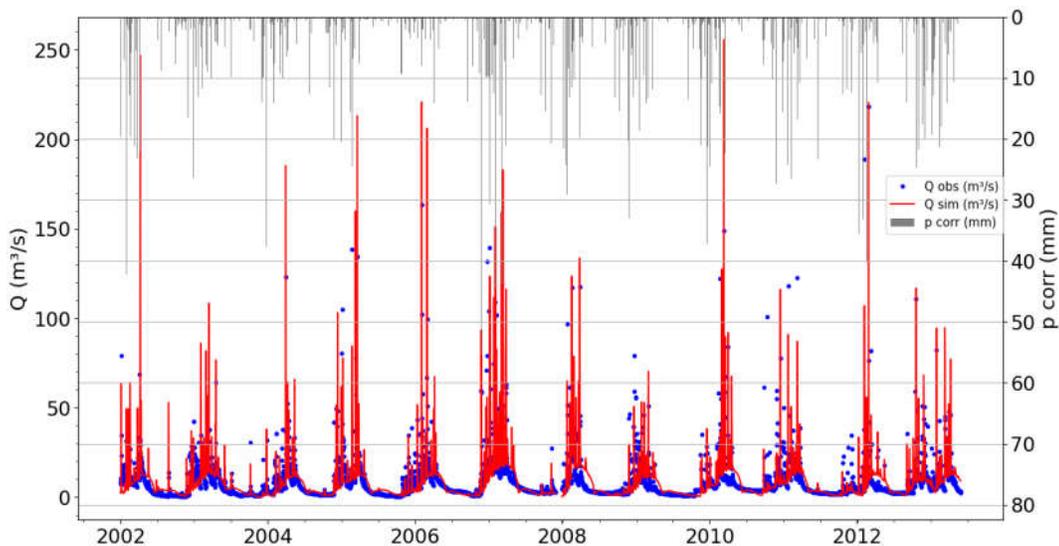


Figura 12. Hidrograma simulado y observado en Ume Pay.

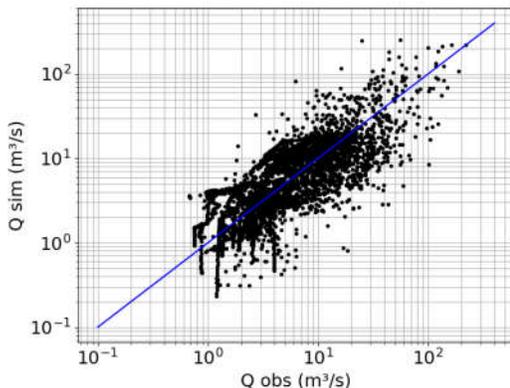


Figura 13. Gráfico de dispersión de caudales medios diarios simulados y observados en Ume Pay.

Entre las capacidades de SWAT+, se destaca la posibilidad de evaluar la dinámica de las variables representativas de la hidrología de la cuenca. Como ejemplo, en la Figura 14 se presenta la evolución del valor medio en la cuenca de tres variables: el contenido de humedad en el suelo (sw), la evapotranspiración real (ETR) y el número de curva CN.

Si bien la cuenca en estudio ha sido motivo de trabajos previos (Weber y Baigorri, 2019), se considera que el modelo desarrollado es superior teniendo en cuenta que incorpora fuentes de datos satelitales, permitiendo un análisis más detallado de la variabilidad espacial en la cuenca.

La calidad del ajuste del modelo, si bien limitada, es similar a la obtenida en otros trabajos que han utilizado datos de precipitación derivados de satélite como entradas al modelo SWAT, en particular en cuencas con escasa disponibilidad de datos reales. Por ejemplo, Mararakanye et al. (2020) reportan valores de NSE entre -0.2 y 0.3 para la cuenca del río Vaal (Sudáfrica); Odusanya et al. (2019) obtienen un valor medio de $NSE = 0.45$ en la calibración de SWAT para la cuenca del río Ogun (Nigeria), utilizando información satelital para describir la evapotranspiración; mientras que Dos Santos et al. (2022) presentan valores de NSE variables entre 0.08 y 0.66 en la validación de un modelo en SWAT para la cuenca del río Congo (África), en base a diversos datos de precipitación derivados de satélites.

Se ha demostrado que la calidad intrínseca de los DPDS, el tamaño de la cuenca, la resolución de los DPDS y la elección del modelo hidrológico afectan la propagación del error desde propios DPDS hasta el resultado. Sin embargo, no se ha llegado a un

consenso sobre la cuantificación de estos efectos. En algunos casos, se ha demostrado que el error aumenta con el área de la cuenca, pero en otros no se observó ningún cambio en la magnitud del error en función del tamaño de la cuenca. Se ha demostrado que la resolución de los DPDS desempeña un papel importante en la calidad de los resultados (Maggioni y Massari, 2018). En cualquier caso, se considera que los DPDS pueden ser utilizados, criteriosamente, en cuencas con escasez o ausencia de información hidrometeorológica para el modelado hidrológico.

CONCLUSIONES

Ha sido posible implementar un modelo hidrológico de simulación continua en la cuenca del río Grande (Córdoba, Argentina) mediante el uso del software de modelado hidrológico SWAT+ y los datos de precipitación derivados de satélites (DPDS) del producto PDIR-Now, que resultó ser el más adecuado en términos de extensión y resolución espacial y temporal.

El procedimiento de asimilación de datos virtuales (DPDS) y reales (registros de estaciones pluviométricas) permite, conservando los valores de campo observados, lograr una mayor riqueza en la distribución espacial de la precipitación en la cuenca, lo que impacta directamente en los resultados del modelo.

Fue posible encontrar valores específicos para la cuenca del río Grande de los parámetros de las relaciones potenciales de la geometría hidráulica en función del área parcial de drenaje, en la forma requerida por SWAT+. Estos parámetros fueron utilizados en el modelo desarrollado, en reemplazo de los valores por defecto de SWAT+, contribuyendo a una mejor respuesta del modelo.

La calibración del modelo hidrológico en función de los registros de caudales disponibles en la sección de cierre de la cuenca (Ume Pay) mostró que tres parámetros (el número de curva CN, el coeficiente de flujo de retorno α y el coeficiente n de Manning de la red de drenaje) explican el 95% de la mejora en el ajuste.

Los parámetros calibrados del modelo de la cuenca del río Grande podrán ser de utilidad, en ausencia de información específica, para la implementación del modelo SWAT+ en otras cuencas de la región serrana de Córdoba, donde resulte necesario una

estimación de series de caudales en ausencia de registros hidrométricos.

Adicionalmente, para la cuenca de río Grande la disponibilidad de un modelo hidrológico calibrado puede resultar de interés desde que esta cuenca es la principal aportante al sistema hidroeléctrico Cerro Pelado – Arroyo Corto; permitiendo la generación de series sintéticas de caudales para simulación, evaluación de escenarios de manejo de cuenca, etc.

Si bien el valor obtenido de la eficiencia de Nash-Sutcliffe dista del esperado para un desempeño óptimo del modelo, este estadístico se encuentra dentro del rango reportado por otros investigadores en el modelado de cuencas en SWAT, utilizando información satelital. Se considera que el modelo implementado describe razonablemente el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Grande, típica de las cuencas de la región serrana de Córdoba.

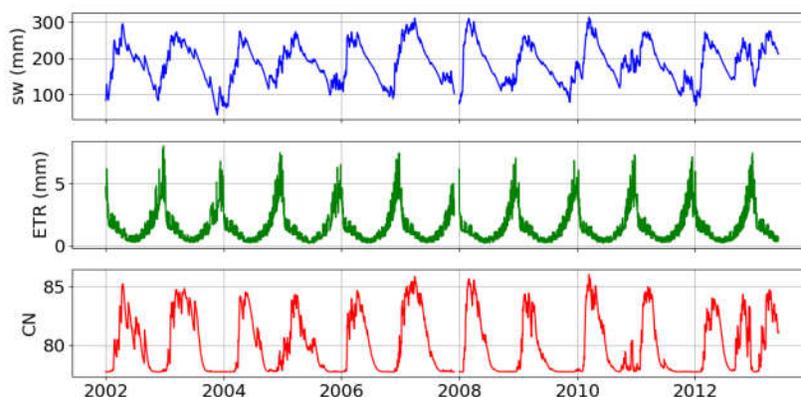


Figura 14. Evolución temporal de los valores medios en la cuenca del contenido de humedad en el suelo (sw), la evapotranspiración real (ETR) y el número de curva CN.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional por el financiamiento recibido al Proyecto de Investigación MSTCCO0008567TC.

REFERENCIAS

- Agencia Córdoba Ambiente SE e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – Estación Experimental Agropecuaria Manfredi (2003). *Recursos Naturales de la provincia de Córdoba. Los suelos. Nivel de reconocimiento. Escala 1:50000*. Agencia Córdoba D.A.C. y T.S.E.M., Dirección de Ambiente; Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan R., Santhi, C., Harmel, R. D., Van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N. y Jha, M. K. (2012). SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491–1508. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. y Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association* 34(1): 73-89, <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Artan, G., Gadain, H., Smith, J. L., Asante, K., Bandaragoda, C. J. y Verdin, J. P. (2007). Adequacy of satellite derived rainfall data for stream flow modeling. *Natural Hazards*, 43(2), 167–185. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9121-6>
- Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M., Volk, M. y Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, a Completely Restructured Version of the Soil and Water Assessment Tool. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 53(1): 115–130. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12482>
- Bieger, K., Rathjens, H., Allen, P. M. y Arnold, J. G. (2015). Development and Evaluation of Bankfull Hydraulic Geometry Relationships for the Physiographic Regions of the United States. *Journal of the American Water Resources*

- Association (JAWRA)*, 51(3), 842–858. <https://doi.org/10.1111/jawr.12282>
- Bitew, M. M., Gebremichael, M., Ghebremichael, L. T. y Bayissa, Y. A. (2012). Evaluation of High-Resolution Satellite Rainfall Products through Streamflow Simulation in a Hydrological Modeling of a Small Mountainous Watershed in Ethiopia. *Journal of Hydrometeorology*, 13(1), 338–350. <https://doi.org/10.1175/2011JHM1292.1>
- Bjerklie, D. M., Dingman, S. L., Vorosmarty, C. J., Bolster, C. H. y Congalton, R. G. (2003). Evaluating the potential for measuring river discharge from space. *Journal of Hydrology*, 278(1-4), 17–38. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00129-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00129-X)
- Bosnero, H. A., Pachecoy, V. L., Carnero, M., Espil, H. O., Lovera, E. F., Reartes, M. A., Tassile, J. L., Obligado, J., Cabido, M., Gonzalez Albarracín, C., Rossetti, E. y Correa, J. J. (s.f.) *Hoja 3366-12, Río de los Sauces; Hoja 3366-18, Alpa Corral. Cartas de Suelos de Córdoba*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Recursos Renovables - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Universidad Nacional de Córdoba. <https://suelos.cba.gov.ar/ALPACORRAL/index.html>
- Camici, S., Ciabatta, L., Massari, C. y Brocca, L. (2018). How reliable are satellite precipitation estimates for driving hydrological models: A verification study over the Mediterranean area. *Journal of Hydrology*, 563, 950–961. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.067>
- Cohen Liechti, T., Matos, J. P., Boillat, J. L. y Schleiss, A. J. (2012). Comparison and evaluation of satellite derived precipitation products for hydrological modeling of the Zambezi River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(2), 489-500. <https://doi.org/10.5194/hess-16-489-2012>
- Collischonn, B., Collischonn, W. y Tucci, C. E. M. (2008). Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, 360(1-4), 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.032>
- De Vera, A. y Terra, R. (2012). Combining CMORPH and Rain Gauges Observations over the Rio Negro Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 13(6), 1799–1809. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-010.1>
- Dos Santos, V., Oliveira, R. A. J., Datok, P., Sauvage, S., Paris, A., Gosset, M. y Sánchez-Pérez, J. M. (2022). Evaluating the performance of multiple satellite-based precipitation products in the Congo River Basin using the SWAT model. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 42(101168). <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101168>
- Food and Agriculture Organization (1974). *FAO-UNESCO Soil Map of the World: VO. I, Legend*. UNESCO, Paris. <https://www.fao.org/4/as360e/as360e.pdf>
- Gebremichael, M. y Hossain, F. (Eds.). (2009). *Satellite rainfall applications for surface hydrology*. Springer Science & Business Media. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-90-481-2915-7>
- Hong, Y., Hsu, K., Moradkhani, H. y Sorooshian, S. (2006). Uncertainty quantification of satellite precipitation estimation and Monte Carlo assessment of the error propagation into hydrologic response. *Water Resources Research*, 42(8). <https://doi.org/10.1029/2005WR004398>
- Khan, S. I., Hong, Y., Vergara, H. J., Gourley, J. J., Brakenridge, G. R., De Groeve, T. y Yong, B. (2012). Microwave Satellite Data for Hydrologic Modeling in Ungauged Basins. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(4), 663–667. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2011.2177807>
- Le, M.-H., Lakshmi, V., Bolten, J. y Bui, D. D. (2020). Adequacy of Satellite-derived Precipitation Estimate for Hydrological modeling in Vietnam Basins. *Journal of Hydrology*, 586(124820). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124820>
- Leopold, L. B. y Maddock, T. (1953). *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications*, 252. United States Government Printing Office. <https://doi.org/10.3133/pp252>
- Maggioni, V. y Massari, C. (2018). On the performance of satellite precipitation products in riverine flood modeling: A review. *Journal of Hydrology*, 558, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.039>
- Mararakanye, N., Le Roux, J. J. y Franke, A. C. (2020). Using satellite-based weather data as input to SWAT in a data poor catchment. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 117(102871). <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102871>
- Marinho Filho, G. M., Andrade, R. S., Zukowski, J. C. y Magalhães, L. L. (2012). Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. *Revista de Ciências Ambientais*, 6(2), 35-47. <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/268>
- Mazzoleni, M., Brandimarte, L. y Amaranto, A. (2019). Evaluating precipitation datasets for large-scale distributed hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 578(124076). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124076>

- Nguyen, P., Ombadi, M., Gorrooh, V. A., Shearer, E. J., Sadeghi, M., Sorooshian, S., Hsu, K., Bolvin, D. y Ralph, M. F. (2020). PERSIANN Dynamic Infrared–Rain rate (PDIR-Now): A near-real-time, quasi-global satellite precipitation dataset. *Journal of Hydrometeorology*, 21(12), 2893-2906. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0177.1>
- Nguyen, P., Shearer, E. J., Tran, H., Ombadi, M., Hayatbini, N., Palacios, T., Huynh, P., Braithwaite, D., Updegraff, G., Hsu, K., Kuligowski, B., Logan, W. S. y Sorooshian, S. (2019). The CHRS Data Portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. *Nature Scientific Data*, 6(180296). <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.296>
- Odusanya, A. E., Mehdi, B., Schürz, C., Oke, A. O., Awokola, O. S., Awomeso, J. A., Adejuwon, J. O. y Schulz, K. (2019). Multi-site calibration and validation of SWAT with satellite-based evapotranspiration in a data-sparse catchment in southwestern Nigeria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(2), 1113-1144. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1113-2019>
- Olaya Ferrero, V. (2004). *Hidrología computacional y modelos digitales de terreno: teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico*. <https://drive.google.com/file/d/1BcsUoJY0gARbWw1JgBf-zHhxA3p6YzJz/view?pli=1>
- Pachecoy, V. L., Jarsún, B., Espil, H. O., Zamora, E. M. y Tassile, J. L. (s.f.) *Hoja 3366-6, Santa Rosa de Calamuchita. Cartas de Suelos de Córdoba*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Recursos Renovables - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Universidad Nacional de Córdoba. <https://suelos.cba.gov.ar/SANTAROSA/index.html>
- Pan, M., Li, H. y Wood, E. (2010). Assessing the skill of satellite-based precipitation estimates in hydrologic applications. *Water Resources Research*, 46(9). <https://doi.org/10.1029/2009wr008290>
- Radice, S., Arangue, J., Fagiano, M. R. y Pinotti, L. P. y Cristofolini, E. A. (2012). Análisis petrológico estructural del basamento encajonante del Batolito Cerro Áspero, Sierra de Comechingones, Córdoba. *Serie correlación geológica*, 28(2), 9-22. <https://www.insugeo.org.ar/publicaciones/docs/scg-28-2-01.pdf>
- Rosenqvist, A., Shimada, M., Ito, N. y Watanabe, M. (2007). ALOS PALSAR: A pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11), 3307-3316. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.901027>
- Rozante, J. R., Moreira, D. S., de Goncalves, L. G. G. y Vila, D. A. (2010). Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. *Weather and forecasting*, 25(3), 885-894. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1>
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y., Chuang, H., Juang, H. H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Van Delst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., van den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R. W., Rutledge, G. y Goldberg, M. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1058. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>
- Singh, V. P. (Ed.). (1995). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications.
- Tobin, K. J. y Bennett, M. E. (2010). Adjusting Satellite Precipitation Data to Facilitate Hydrologic Modeling. *Journal of Hydrometeorology*, 11(4), 966-978. <https://doi.org/10.1175/2010jhm1206.1>
- Tolson, B. A. y Shoemaker C. A. (2007). Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration, *Water Resources Research*, 43(1). <https://doi.org/10.1029/2005WR004723>
- Tong, K., Su, F., Yang, D. y Hao, Z. (2014). Evaluation of satellite precipitation retrievals and their potential utilities in hydrologic modeling over the Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 519(Part A), pp. 423-437. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.044>
- Tucci, C. E. M. (2005). *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Editora da UFRGS.
- Van Zyl, J. J. (2001). The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta astronautica*, 48(5-12), 559-565. [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(01\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(01)00020-0)
- Vieux, B. E. (2004). *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2460-6>
- Wang, W., Sun, L., Cai, Y., Yi, Y., Yang, W. y Yang, Z. (2020). Evaluation of multi-source precipitation data in a watershed with complex

topography based on distributed hydrological modeling. *River Research and Applications*, 37(8), 1115–1133, <https://doi.org/10.1002/tra.3681>

Weber, J. F. y Baigorri Ocampo, S. (2019). Calibración del modelo hidrológico SWAT para una cuenca de la región serrana de Córdoba (Argentina). *Aqua-LAC*, 11(1), 34-54. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2019-v11-1-03>

Tipo de Publicación: ARTÍCULO.

Trabajo recibido el 04/07/2024, aprobado para su publicación el 19/09/2024 y publicado el 20/11/2024.

COMO CITAR

Weber, J. F. y Jaeggi, M. G. (2024). Modelado hidrológico distribuido de la cuenca del río Grande (Córdoba, Argentina) en base a datos de precipitación derivados de satélites. *Cuadernos del CURIHAM*, 30, e06. <https://doi.org/10.35305/curiham.v30i.e06>

ROLES DE AUTORÍA

JW realizó el proceso de investigación, recopilación de datos, análisis, conceptualización y preparó, creó y redactó el trabajo. MJ llevó a cabo la recolección, análisis e interpretación de los datos de la geometría hidráulica; y colaboró en la revisión del trabajo. Ambos aprobaron la versión para ser publicada y son capaces de responder respecto a todos los aspectos del manuscrito.

LICENCIA

Este es un artículo de acceso abierto bajo licencia: Creative Commons Atribución -No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>)

