

POTENCIAL DE ESCORRENTÍA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CURVA EN UNA CUENCA SERRANA, NAPOSTÁ GRANDE (ARGENTINA)

RUNOFF POTENTIAL IN FUNCTION OF THE CURVE NUMBER IN A MOUNTAIN WATERSHED, NAPOSTÁ GRANDE (ARGENTINA)

Natalia LÓPEZ¹, Ana CASADO², Natalia REVOLLO³, Verónica GIL⁴

¹Universidad Nacional del Sur - CIC. Instituto de Ingeniería. Departamento de Ingeniería. Área 1 – Hidráulica. Alem 1253 1er piso. Bahía Blanca 8000. Buenos Aires – Argentina. E-mail: nclopez@uns.edu.ar

² Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo, Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible, UPSO – CONICET. 12 de octubre y San Juan, 4to piso. Bahía Blanca, 8000. Argentina. E-mail: ana.casado@uns.edu.ar

³Universidad Nacional del Sur. Instituto de Ciencias e Ingeniería de la Computación – ICIC (CONICET/UNS). Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras. Alem 1253 1er piso. Bahía Blanca 8000. Buenos Aires – Argentina. E-mail: nrevollo@criba.edu.ar

⁴Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo. – CONICET. 12 de octubre y San Juan, 4to piso. Bahía Blanca, 8000. Argentina. E-mail: verogil@uns.edu.ar

Introducción

Materiales, métodos y técnicas

Área de estudio

Métodos

Aproximación por ponderación espacial de complejos hidrológicos

Aproximación por evento-respuesta en base a registros históricos

Datos de entrada

Función de ajuste

Validación y ajuste de los CN obtenidos

Resultados

Aproximación del CN por ponderación espacial

Aproximación del CN por evento-respuesta (P:E)

Potencial de escorrentía: validación de los resultados

Validación sobre series de eventos P:E

Validación sobre series acumuladas

Ajuste a la realidad hidrológica de la cuenca del arroyo Napostá Grande

Discusión

Conclusiones

Agradecimientos

Referencias

Resumo. O conhecimento do potencial de escoamento de uma bacia é essencial para a gestão da água a curto e longo prazo e para a tomada de decisões sociopolíticas e ambientais. A simplicidade do modelo NCRS-CN torna-o uma ferramenta útil em bacias com poucos registros hidrológicos contínuos. A validação e ajuste do CN em bacias instrumentadas conferem confiabilidade e transferibilidade ao método. Os valores de CN foram obtidos por ponderação espacial, CN_c, e por análise de resposta a eventos, S_{II} e métodos assintóticos. Os CN foram validados em séries históricas de precipitação - vazão por evento (curto prazo) e acumuladas (longo prazo) para duas sub-bacias montanhosas com diversidade de área, B₁ e B₂, do riacho Napostá Grande, Argentina, avaliando finalmente um ajuste à realidade hidrologia da bacia. O método S_{II} apresenta melhores resultados que o método assintótico e o CN_c para análises de curto prazo em ambas as sub-bacias, enquanto, para análises acumuladas de longo prazo, anuais ou plurianuais, o método ajustado tanto para B₁ como para B₂ é mais representativo. Os modelos analisados são uma representação matemática determinística que permite prever o escoamento superficial a partir de dados de precipitação, e seu uso pode ser extrapolado para bacias regionais não instrumentadas e com diversidade de área.

Palavras chave: Número de curva. Escoamento. Bacias serranas. Arroio Napostá Grande.

Abstract. Knowledge of the runoff potential of a watershed is essential for short- and long-term water management and for socio-political and environmental decision-making. The simplicity of the NCRS-CN model makes it a useful tool in basins with absence of continuous hydrological records. The validation and adjustment of the CN in gauged basins provides greater reliability and transferability to the method. CN values were obtained by spatially weighted approximations, CN_c, and by event-response analysis, S_{II} and asymptotic methods. The CNs were validated on historical precipitation-runoff records considering event (short term) and cumulated (long term) series for two sub-basins with areal diversity, B₁ and B₂, of the Napostá Grande stream, Argentina. An adjustment to the hydrological reality of the basin was also evaluated. The S_{II} method yields better results than the asymptotic and the CN_c approximations for short-term analysis within both sub-basins, while on the long-term, annual or multi-year cumulative analysis, the adjusted CN is more representative for both B₁ and B₂. The models yielded herein constitute a deterministic mathematical representation that would allow predicting runoff from precipitation data, and their use can be extrapolated to ungauged regional basins with areal diversity.

Keywords: Curve number. Runoff. Mountain watersheds. Napostá Grande stream.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento del potencial de escorrentía políticas y ambientales. Uno de los métodos de de una cuenca es fundamental para su gestión, así transformación precipitación-escorrentía más como para la toma de decisiones sociales, popularmente empleados a escala global es el

método del Número de Curva (CN) del hoy Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS). El método NRCS-CN estima la escorrentía directa por abstracción de un evento de precipitación en base a un único parámetro de transformación, el CN (NRCS, 2004a). Inicialmente, fue desarrollado para estimar la escorrentía directa en pequeñas cuencas agrícolas no aforadas y, en la actualidad, es adoptado en numerosas cuencas del mundo sujetas a una variedad de tamaños, usos y climas y en modelos hidrológicos integrales (Soulis & Valiantzas, 2012; Verma et al., 2017).

La popularidad del NRCS-CN radica en la simplicidad, predictibilidad y estabilidad del modelo de transformación y en su capacidad de ajustar el parámetro CN a las propiedades de la cuenca que influyen en la escorrentía, como los tipos de suelo y coberturas, las condiciones de superficie y la humedad antecedente (Ponce & Hawkins, 1996), lo que lo convierte en una herramienta particularmente útil en cuencas con ausencia de registros hidrológicos continuos. Paralelamente, estas ventajas constituyen la base de los principales cuestionamientos al método, cuya formación, racionalidad, aplicabilidad, extensibilidad y significado físico han sido objeto de debate y discusión desde sus inicios (Verma et al., 2017), dado que el modelo es más sensible al CN seleccionado que a la precipitación utilizada como variable de entrada (Hawkins, 2014).

Así, en cuencas con cierto grado de aforo, la práctica ha demostrado la importancia de calibrar el CN en función de registros locales (Soulis & Valiantzas, 2012; Stewart et al., 2012; Tedela et al., 2012; Verma et al., 2017). Sin embargo, ha sido igualmente demostrado que la gama de combinaciones posibles entre las series seleccionadas como entrada y los métodos de calibración empleados, en función de la relación observada, en cada caso, entre la precipitación y el CN, puede dar lugar a valores de CN muy diferentes y, en consecuencia, la bondad del ajuste dependerá del juicio en la elección de dichos procedimientos en relación con el objetivo de aplicación del método (Hawkins et al., 2009). Asimismo, diversos estudios han cuestionado la ambigüedad en la determinación de la humedad antecedente (McCuen, 2002; Michel et al., 2005; Mishra et al., 2005; Mishra & Singh, 2006). Dicha variable se determinó históricamente en función de la precipitación

acumulada de los cinco días previos, P_5 , la que condiciona el valor que toma CN medio de una cuenca para condiciones antecedentes secas ($P_5 < 23$ mm) o húmedas ($P_5 > 40$ mm) (SCS, 1972). Sin embargo, el NRCS (2004a) advierte que no existe correlación entre P_5 y la variabilidad del CN y, en consecuencia, el uso de tablas de P_5 ya no es compatible ni aprobado por NRCS (Grabau et al., 2009). Sobre la base de los resultados de Hjelmfelt et al. (1982), se postula que el CN constituye una variable aleatoria con tendencia central de tipo II y límites de error I y III, correspondientes al 90 y 10 % de probabilidad de excedencia, respectivamente (Grabau et al., 2009). Emerge así el concepto de escurrimiento antecedente (ARC), el cual implica asumir el error en la estimación vinculado no solo con la humedad antecedente sino también con el conjunto de condiciones que pueden influenciar la variabilidad del CN de una cuenca, como la intensidad, duración y magnitud de la tormenta, la densidad de coberturas, el estado de crecimiento de la vegetación, la temperatura y el error en los registros (NRCS, 2004a).

Estos aspectos ponen de relieve la importancia de la correcta determinación y evaluación del CN de una cuenca, en relación con las aplicaciones posibles de dicho parámetro y, particularmente, en relación con la heterogeneidad característica de los sistemas naturales que contrarresta la uniformidad espacial y temporal asumida implícitamente por el método. El presente trabajo implementa y compara diversos métodos de aproximación del CN con el objetivo de responder dos interrogantes fundamentales: (i) cuál es el sesgo en la escorrentía estimada en función del CN empírico derivado de las tablas del NEH-4 y el CN calibrado por registros históricos y en relación con qué potencial de aplicación del método y (ii) cuál es el sesgo en el CN estimado para cuencas de distinto tamaño y, por extensión, distinto grado de heterogeneidad espacial. Para ello, se toma el caso de una cuenca pobremente aforada donde el cálculo del CN no se ha realizado. Esta doble característica es común a muchas cuencas y justifica el objetivo del trabajo presentado. Los resultados se validan considerando el potencial de escorrentía de la cuenca por evento de precipitación (potencial hídrico a corto plazo) y por progresión acumulada de eventos (potencial hídrico a largo plazo) para dos unidades espaciales con distinto grado de heterogeneidad, la cuenca alta (pequeña

extensión relativa) y la cuenca alta y media (mediana extensión relativa). Además de advertir sobre las implicancias de la incorrecta determinación del CN para la gestión de los recursos

hídricos en el corto y largo plazo, los resultados del presente estudio son transferibles a otras cuencas regionales no instrumentadas y revisten, en consecuencia, un gran interés regional.

MATERIALES, MÉTODOS Y TÉCNICAS

Área de Estudio

El arroyo Napostá Grande nace en la vertiente occidental del cordón de Sierra de la Ventana, SO de la provincia de Buenos Aires (Argentina) y

escurre en sentido N-S hasta su desembocadura en el Estuario de Bahía Blanca (Figura 1). La agricultura y la ganadería extensiva dominan el paisaje regional desde finales del Siglo XIX (Sili, 2000).

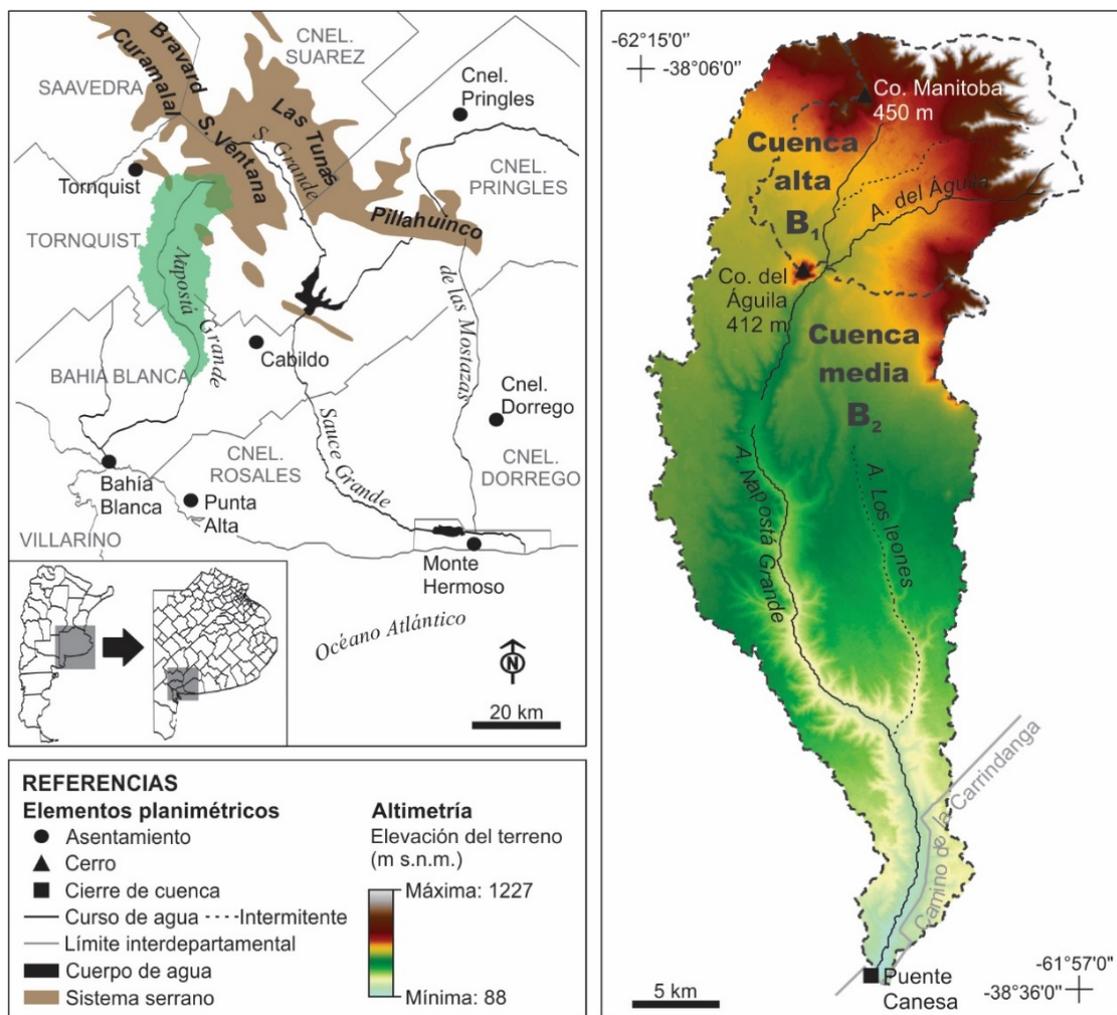


Figura 1. Localización y situación geográfica de la cuenca alta y media del arroyo Napostá Grande.

Así, el uso del suelo de la cuenca se mantiene predominantemente agrícola-ganadero y, con excepción de la ciudad de Bahía Blanca (que alberga ≈ 315.000 habitantes; INDEC, 2020), la densidad de población es muy baja ($0,4 \text{ hab./km}^2$; INDEC, 2010).

La precipitación media anual es de 721 mm (1888-1998) con un gradiente decreciente de $2,4 \text{ mm/km}$ en sentido NE-SO (Carrica, 1998). El régimen de precipitaciones exhibe una estacionalidad de octubre a marzo y marcada variabilidad interanual (Casado & Campo, 2019), con un rango de casi 1000 mm entre eventos extremos (Berón de la Puente et al., 2017). La variación inte-

ranual de la precipitación, que responde mayoritariamente al fenómeno El Niño - Oscilación del Sur (ENOS) junto a otros fenómenos atmosféricos y oceánicos (Scian, 2000; Scian et al., 2006), se traduce en una sucesión de ciclos húmedos y secos que representan el mayor desafío no sólo para la economía regional sino también para la gestión de los recursos hídricos locales.

Métodos

La escorrentía estimada (E_{est}) para un evento de precipitación (P) resulta de la relación entre P y el potencial de retención máxima del suelo (S) que resulta de la transformación del número de curva de la cuenca como sigue (NRCS, 2004a):

$$E_{est}(mm) = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad P > 0,2S \quad (1)$$

$$S(mm) = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Este estudio implementa y compara tres métodos de aproximación para determinar el CN de mejor ajuste, por validación en base a registros

históricos (Figura 2). En función de los objetivos propuestos, se determina la bondad del ajuste en relación con dos aplicaciones principales del método: (i) la determinación de la escorrentía generada por un evento de precipitación (análisis eventual) y (ii) la determinación de la escorrentía potencial de la cuenca a largo plazo (análisis acumulado).

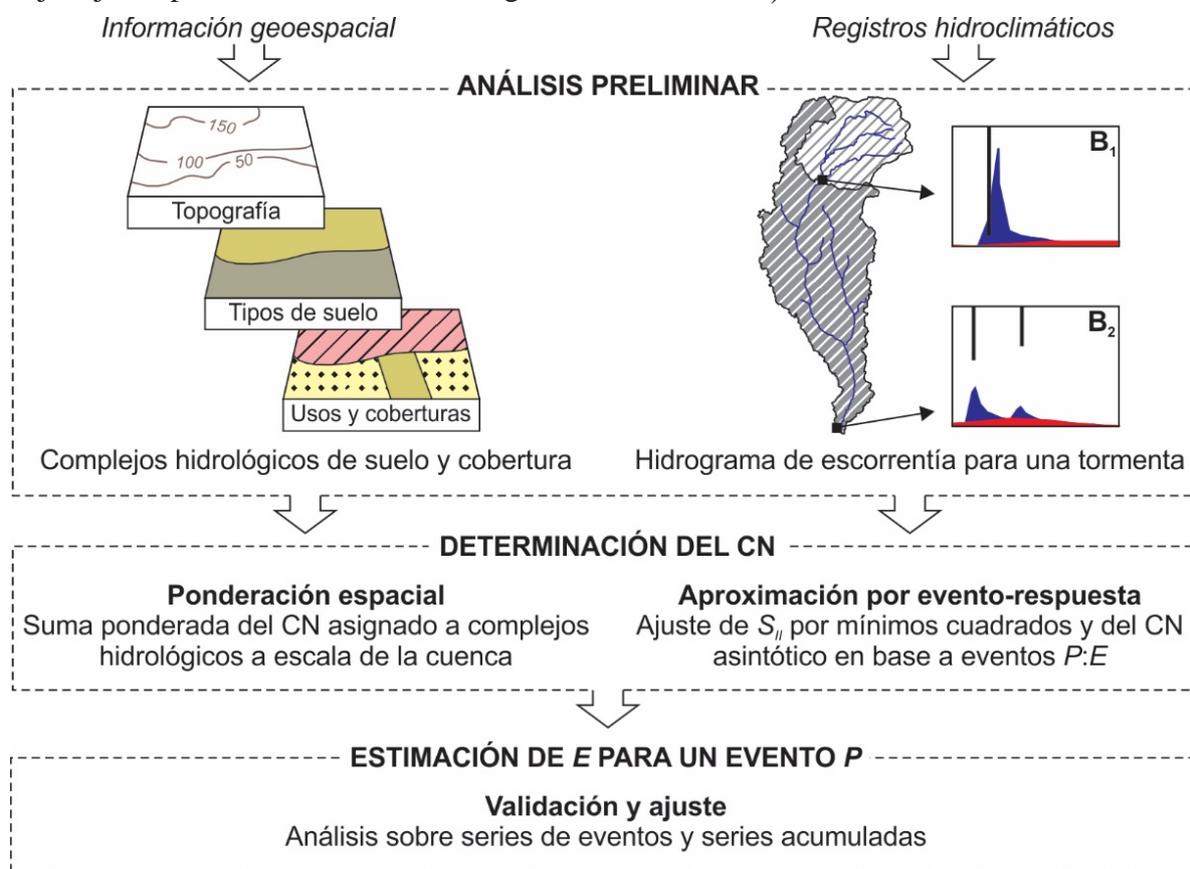


Figura 2- Esquema metodológico general.

Aproximación por ponderación espacial de complejos hidrológicos

El método de aproximación más simple implica determinar el CN de una cuenca en función de los complejos hidrológicos de suelo y cobertura que la componen (Figura 2). La delimitación de complejos hidrológicos en el seno de ambas subcuencas se basó en las cartas de suelos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 2018), sobre las que se delimitaron los distintos tipos de coberturas por análisis visual de imágenes satelitales disponibles en *Google Earth* (GE). Dado que el NRCS-CN es un modelo agrupado, se utilizó el historial de imágenes GE para privilegiar las clases de coberturas dominantes en el espacio y en el tiempo. Las imágenes GE se consideraron particularmente apropiadas porque proporcionan amplia cobertura espacial con alta resolución espacial y temporal (Revollo Sarmiento et al., 2020), lo que permitió consultar

hasta 36 imágenes de los programas *Landsat* y *Copernicus* desde 1984 hasta 2020. Las características fisiográficas de las subcuencas (hipso-metría y pendientes) fueron extraídas del modelo digital de elevación (MDE) de 1 arco segundo de resolución (~28 m) provisto por el USGS (misión SRTM) (Figura 1).

Los CN asignados a los complejos hidrológicos reconocidos en B_1 y B_2 se combinaron según las tablas del NEH-4 (NRCS, 2004b) con tres clases de pendiente, delimitadas por los intervalos de 5 y 15 %, para dar continuidad a estudios hidrológicos realizados en otras cuencas regionales (Luque et al., 1979). El CN compuesto (CN_c) para cada cuenca se obtuvo mediante la expresión:

$$CN_c = \sum_{i=1}^n CN_i A_i \quad (3)$$

donde CN_i es el número de curva de cada

complejo hidrológico i y A_i es su área relativa.

Aproximación por evento-respuesta en base a registros históricos

Las técnicas de determinación del CN en base a registros históricos dependen de dos aspectos fundamentales: (i) la selección de datos de entrada y (ii) la función de ajuste utilizada (Hawkins et al., 2009). A continuación se describen las técnicas utilizadas en el presente estudio.

Datos de entrada

Las series hidroclimáticas disponibles para las

subcuencas B_1 y B_2 se sintetizan en la Tabla 1, donde las series de caudal corresponden al cierre de ambas subcuencas (Figura 1). La selección de eventos de precipitación-escorrentía se basó en la totalidad de registros disponibles, aun si discontinuos, siempre que se contara con series simultáneas de precipitación y de caudal. Por su parte, el análisis sobre series acumuladas se limitó a los periodos continuos: 01/09/1935-31/12/1945 para B_1 y 30/01/1963-19/12/1969 para B_2 .

Tabla 1 - Series de datos hidroclimáticos disponibles para las cuencas B_1 y B_2 .

	Tipo	Denominación	Localización	Periodo de registro	Paso de tiempo	Blancos de datos	Fuente
B_1	Estación de aforo	Cerro del Águila	38°12'48"S 62°07'29"O	01/09/1935 31/12/1945	Diario	126 registros, continuo	Ministerio de Obras Públicas
	Estación pluviométrica	Estancia Cerro Manitoba	38°07'16"S 62°05'52"O	01/01/1935 31/12/1945	Diario	---	Propietario estancia
B_2	Estación de aforo	Puente Canesa	38°35'27"S 62°05'16"O	01/06/1959 31/12/1969	Diario	636 registros, discontinuo	Ministerio de Obras Públicas
	Datos grillados de precipitación	South America Gridded Precipitation Data Set	38°25'00"S 62°00'00"O	01/01/1960 30/09/2008	Diario	---	(Liebmann & Allured, 2005)

Las series de escorrentía se obtuvieron por separación del caudal de base (Q_b) utilizando el método de mínimos locales con parámetros estándar (Sloto & Crouse, 1996). Además de proporcionar valores similares a los determinados por Carrica (1998) en su estudio hidrogeológico de la cuenca, este método proporciona la estimación más conservadora de Q_b , separándolo de la escorrentía superficial y subsuperficial (Curtis et al., 2020). Nótese que E_{est} en la Ecuación 1 considera implícitamente ambos componentes de escorrentía en proporciones desconocidas, mientras que Q_b es tratado por separado (NRCS, 2004a).

Se utilizó la totalidad de eventos de precipitación-escorrentía (P:E) observados a lo largo de las series disponibles (Tabla 1). Para asegurar la independencia entre calibración y validación, se extrajo para cada subcuenca una muestra aleatoria de tamaño $0,5N$. Asimismo, cada una de las muestras de pares naturales P:E se transformó en serie de pares ordenados por correspondencia de frecuencias, asumiendo periodos de retorno equivalentes para P y para E (Hawkins, 1993). Para cada serie muestral de pares naturales y pares ordenados, se obtuvo una solución de S mediante la Ecuación 4 (Hawkins, 1973) y, vía la Ecuación 2, el valor de CN correspondiente.

$$S(mm) = 5[P + 2E - (4E^2 + 5PE)^{\frac{1}{2}}] \quad (4)$$

Función de ajuste

Se implementaron y compararon los ajustes por mínimos cuadrados y asintótico, utilizando las series muestrales de pares naturales y de pares ordenados, respectivamente. El ajuste por mínimos cuadrados implica encontrar el valor medio de S, SII, que minimice la función objetivo F (Ecuación 5). Esta función se basa en la variable de interés, E_{est} , y es quizás el método más intuitivo (Hawkins et al., 2009).

$$\text{Min } F = \sum (E_{est} - E)^2 \quad (5)$$

Por su parte, el método asintótico implica encontrar el valor de CN en función de P. Por regla general, los valores de CN tienden a disminuir hasta alcanzar valores constantes con el incremento de P (Hawkins, 1993). En cuencas donde los valores constantes de CN(P) son aparentes, se extraen dichos valores y se calcula el CN medio de la cuenca. De acuerdo con Hawkins et al. (2009), este es el método más adecuado. Si los valores constantes no son aparentes, pero se observa una tendencia estable del CN, el CN de la cuenca se estima por ajuste de la ecuación:

$$CN(P) = CN_{\infty} + (100 - CN_{\infty})e^{-kP} \quad (6)$$

donde CN_{∞} es el valor constante para $P \rightarrow \infty$ (asíntota) y k es el parámetro de ajuste. Ambos parámetros, CN_{∞} y k, se ajustaron por mínimos cuadrados para la función:

$$\text{Min } F = \sum (CN(P) - CN)^2 \quad (7)$$

Validación y ajuste de los CN obtenidos

Los resultados se validan considerando dos usos principales del método: (i) la estimación de la escorrentía generada por un evento de precipitación determinado (análisis eventual) y (ii) la escorrentía potencial de la cuenca a largo plazo (análisis acumulado). Así, en primer lugar, se determinó la habilidad de los CN obtenidos, CN_c , SII y $CN(P)$, para estimar la escorrentía generada por eventos de precipitación en cada subcuenca. Para cada evento P, se validaron los residuos entre la escorrentía estimada y la observada utilizando cinco métricas de error: (i)

el error medio (ME), (ii) el error estándar (SE), (iii) la raíz del error medio cuadrático (RMSE), (iv) el coeficiente de determinación (R^2) y (v) el coeficiente de eficacia de Nash-Sutcliffe (NSE). En segundo lugar, se planteó la ecuación de continuidad acumulada en tiempo discreto a partir de series completas, para determinar la escorrentía total acumulada (E_a) en el cierre de cada subcuenca:

$$E_a^i(\text{mm}) = E_{\text{est}}^i + Qb_i + E_a^{i-1} \quad (8)$$

donde Q_b es el caudal de base expresado en mm. Las métricas de error entre la E_a estimada y la observada incluyeron el error volumétrico medio (VE), expresado en hm^3 y el error relativo medio (RE), expresado en porcentaje absoluto.

RESULTADOS

Aproximación del CN por ponderación espacial

Se diferenciaron nueve complejos hidrológicos (CH) a lo largo de las cuencas alta y media del arroyo Napostá Grande por superposición espacial de tipos de suelos, usos y coberturas y

clases de pendiente (Figura 3). Las variaciones espaciotemporales de tipo y estadio de los cultivos se agregaron en una clase única (clase C), que comprende los terrenos en barbecho, arados y cultivados, de uso mixto.

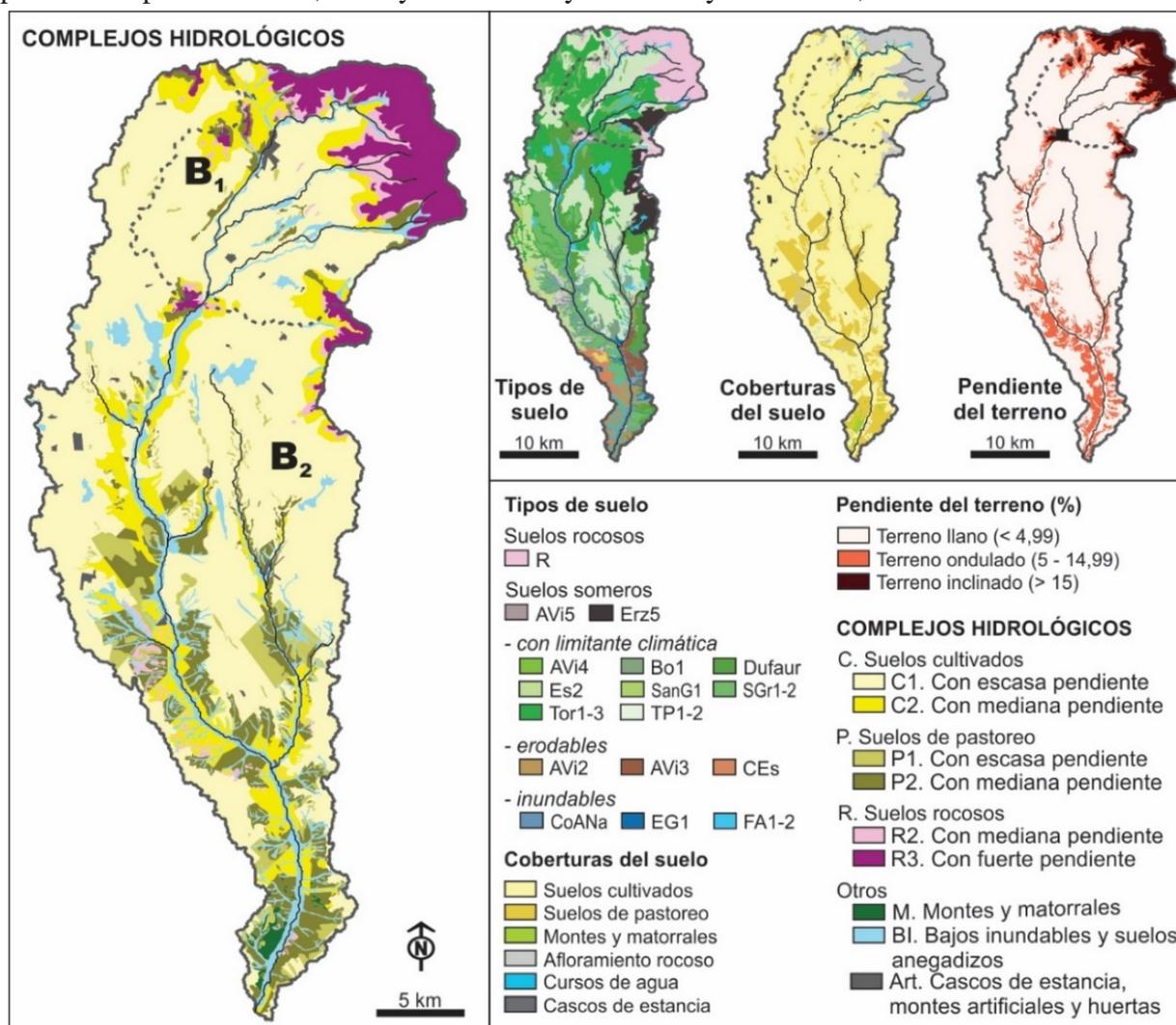


Figura 3 - Complejos hidrológicos de suelo y cobertura en las subcuencas B_1 y B_2 .

La Tabla 2 indica los CN asignados a cada CH y el CN_c obtenido en cada caso. Nótese que el CN_c sintetiza la heterogeneidad hidrológica de las cuencas para condiciones de escurrimiento antecedente intermedia (ARC II). El potencial de escurrimiento en B₁ promedia 0,38P, siendo hasta 4,3 % superior al potencial de escurrimiento de B₂

para precipitaciones equivalentes. En efecto, la proporción de condiciones de escurrimiento alto es mayor en B₁ (la clase R excede en 19,4 % el porcentaje observado en B₂), mientras que en B₂ predominan las condiciones de escurrimiento medio y bajo (clases C y BI superan a B₁ en un 5,4 y 3,6 %).

Tabla 2 - Número de curva asignado a los complejos hidrológicos de B₁ y B₂.

Clase	Pendiente	CH	CN-II	S (mm)	B ₁			B ₂		
					A (km ²)	A _i (%)	CN _i A _i	A (km ²)	A _i (%)	CN _i A _i
C. Suelos cultivados	Baja	C1	64	142,9	100,6	48,9	31,3	415,4	54,9	35,2
	Mediana	C2	69	114,1	22,6	11,0	7,6	87,4	11,6	8,0
P. Suelos de pastoreo	Baja	P1	75	84,7	-	-	-	28,3	3,7	2,8
	Mediana	P2	80	63,5	7,7	3,7	3,0	68,9	9,1	7,3
R. Suelos rocosos	Mediana	R2	86	41,3	12,1	5,9	5,1	19,4	2,6	2,2
	Fuerte	R3	90	28,2	48,0	23,3	21,0	54,2	7,2	6,5
Otros	-	M	70	108,9	-	-	-	3,1	0,4	0,3
	-	BI	84	48,4	12,5	6,1	5,1	73,6	9,7	8,2
	-	Art	83	52,02	2,3	1,1	0,9	5,6	0,7	0,6
Total					205,7	CN_c	73,9	756,0	CN_c	71,0
						S_c	89,6		S_c	103,8

Aproximación del CN por Evento-Respuesta (P:E)

Los eventos P:E seleccionados en función de las series de precipitación y escurrimiento disponibles para cada subcuenca de estudio se presentan en la Figura 4. Los eventos de escurrimiento en B₁ promedian 6,3 mm con máximo de 70,2 mm y exhiben una duración media de 8 días. La tormenta

máxima registrada es de 217 mm y la precipitación anual acumulada se encuentra entre 335 y 798 mm. En B₂, los eventos de escurrimiento promedian 1,2 mm y 9 días de duración; el máximo observado es de 10,1 mm para una precipitación de 98 mm. La precipitación anual acumulada, entre 632 y 822 mm para el periodo estudiado, no incluye años secos como ocurre en B₁ ni eventos con P > 100 mm.

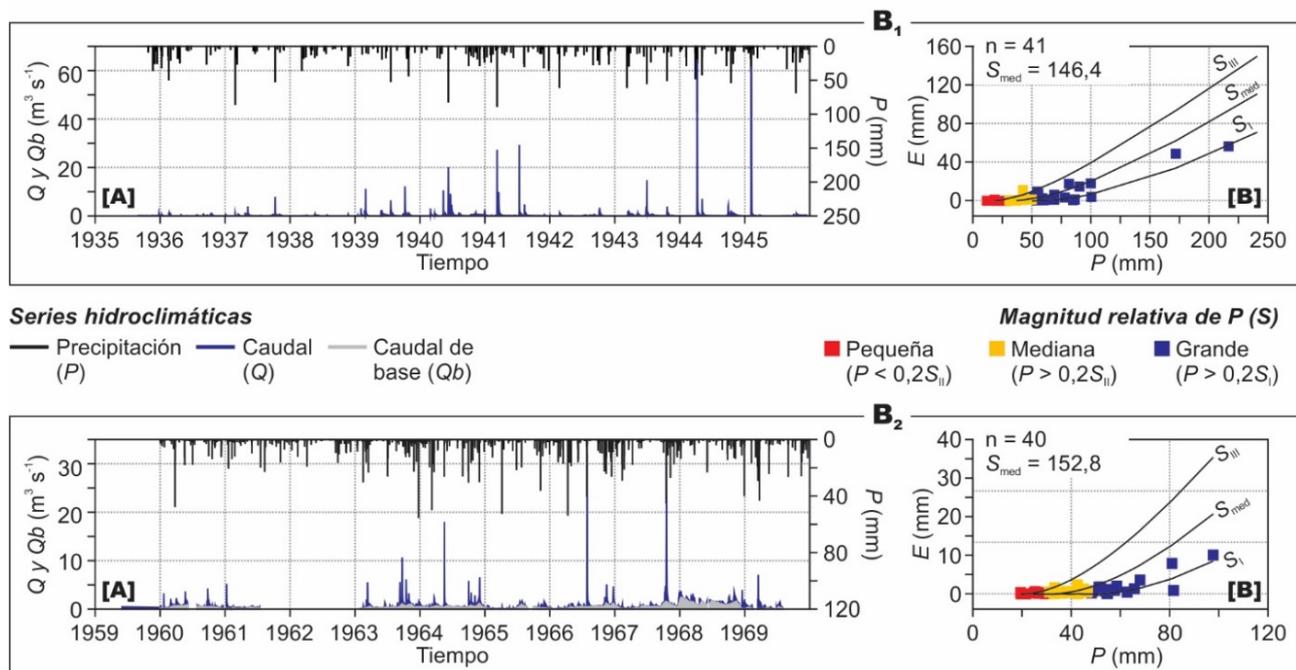


Figura 4 - [A] Series hidroclimáticas disponibles y [B] eventos P:E observados a lo largo de las series (0 < E < P) para las subcuencas B₁ y B₂.

En una primera aproximación, se calculó el S mediano de cada subcuenca, S_{med}, este último tamaño relativo de cada evento P en función del correspondiendo al 50 % de la distribución de los São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 42, n. 3, p. 403 - 418, 2023

valores de S obtenidos para la totalidad de pares P:E seleccionados. Asimismo, se calcularon los valores de S correspondientes a las condiciones ARC I y ARC III (10 y 90 % de la probabilidad de excedencia, respectivamente). Dichos valores representan, respectivamente, $S_I=1,74S_{med}$ y $S_{III}=0,53S_{med}$ en B_1 y $S_I=1,60S_{med}$ y $S_{III}=0,62S_{med}$ en B_2 . El muestreo estratificado de eventos en función de la relación P/S indica una baja frecuencia de eventos grandes ($P/S > 0,2S_I$) en relación con los de mediana y pequeña magnitud, particularmente en B_2 (Figura 4). Si bien el tamaño relativo de un evento P depende del valor de S y este último varía en función del método de ajuste empleado, estos resultados preliminares sugieren que las muestras extraídas para cada subcuenca no incluirán necesariamente una dispersión equilibrada de eventos hacia ambos lados de la condición media (ARC II). En consecuencia, los CN obtenidos estarán más afectados por condiciones de escurrimiento alto (ARC III) que por condiciones de escurrimiento bajo (ARC I), puesto que dichos eventos solo pueden ocurrir

para $P/S > 0,2S_I$ (Hawkins et al., 1985).

El ajuste de S_{II} y $CN(P)$ para B_1 y B_2 se basó en muestras aleatorias de 20 eventos y discriminó, de forma iterativa, aquellos pares P:E con $P/S < 0,2$ (ajuste de S_{II}) o con $CN(P) < CN_0$, donde CN_0 es el número de curva en el que comienza la escorrentía directa para una precipitación dada (Hawkins et al., 2009). Los resultados indican valores similares de S_{II} y $CN(P)$ para ambas subcuencas, con un ajuste aceptable en ambos casos (Figura 5). Se advierte asimismo que ambos métodos arrojan valores similares entre sí, puesto que un valor de $S \approx 190$ mm es equivalente a un valor de $CN \approx 57$. Un aspecto interesante a destacar es que la relación entre CN y P exhibe un comportamiento diferencial para cada subcuenca. B_1 presenta un comportamiento estándar, donde el valor del CN decrece con el incremento de la precipitación hasta alcanzar un valor estable para $P > 100$ mm, mientras que B_2 exhibe un comportamiento con tendencia entre complaciente y estándar, sin alcanzar un valor estable aparente.

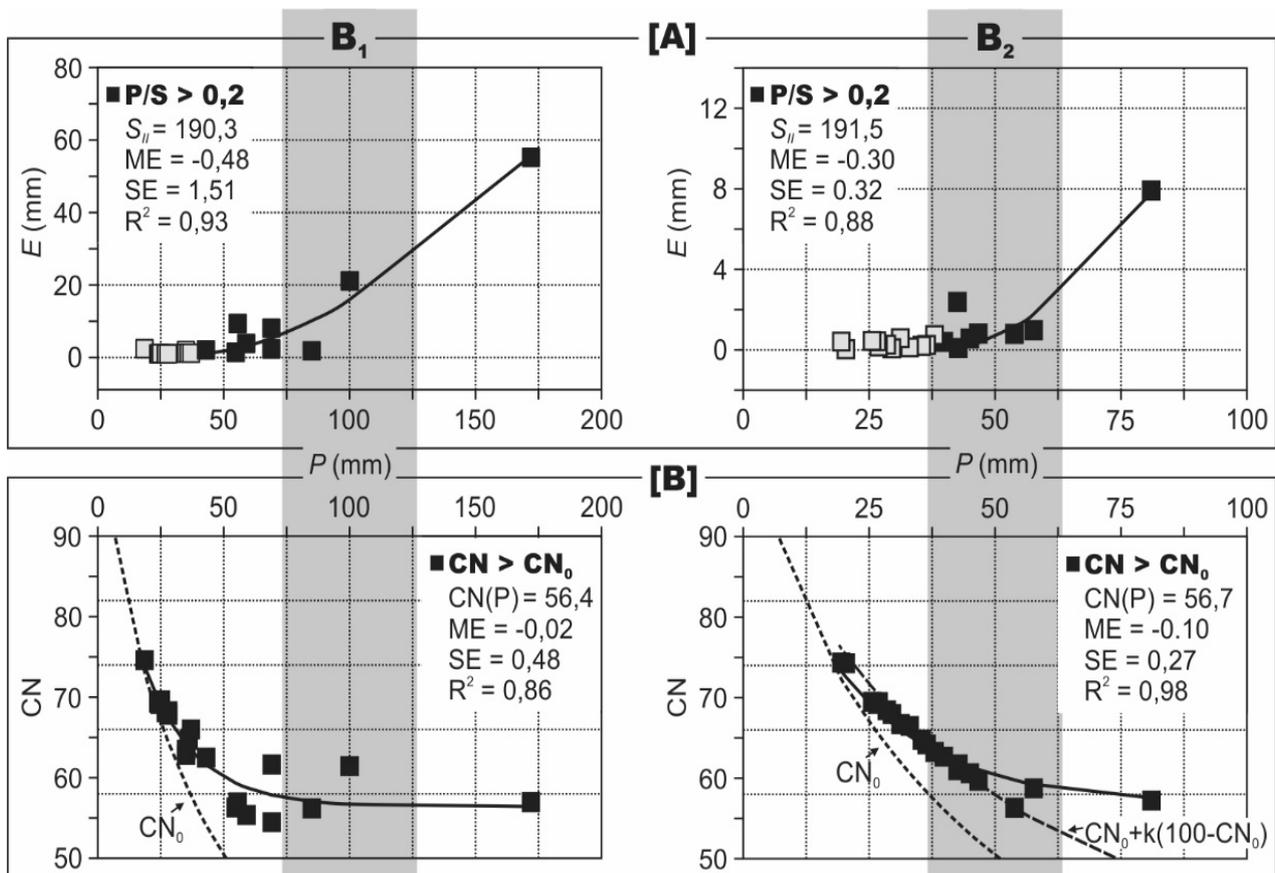


Figura 5 - Ajuste de S_{II} por método de mínimos cuadrados sobre pares naturales [A] y ajuste del $CN(P)$ por método asintótico sobre pares ordenados [B] para las subcuencas B_1 y B_2 .

De acuerdo con Hawkins et al. (2009), la forma complaciente implica una respuesta lineal simple del tipo $E=C.P$, donde C adquiere valores muy bajos ($C < 0,07$), representativos de eventos de

escorrentía para precipitaciones poco significativas. Para B_2 , $C=0,03$, con $ME=0,3$, $SE=0,3$ y $R^2=0,59$. Asimismo, el ajuste de la curva en base al CN_0 , propuesto igualmente por Hawkins et al.

(2009) para cuencas complacientes, arroja resultados menos aceptables que la asíntota para condiciones estándar ($ME = 0,4$, $SE = 0,6$ y $R^2 = 0,93$). Ello sugiere que la subcuenca B_2 posee un comportamiento estándar al igual que B_1 ; sin embargo, el valor estable de $CN(P)$ para la cuenca excede el límite de los datos disponibles en la serie y, en consecuencia, el $CN(P)$ obtenido debe ser utilizado con cautela.

Potencial de Escorrentía: Validación de los Resultados

Validación sobre series de eventos P:E

Se estimó la escorrentía generada para cada evento P remanente sobre las series no utilizadas en calibración.

Las métricas de error para condiciones de escurrimiento intermedias (ARC II) indican que

todos los CN obtenidos presentan un comportamiento similar en ambas subcuencas y, comparativamente, se ajustan mejor en B_1 que en B_2 (Figura 6). El CN_c se presenta notablemente sobreestimado en ambos casos, arrojando los mayores errores absolutos y los menores coeficientes de relación, quedando la cuasi totalidad de eventos observados por debajo del valor estimado para ARC II.

Por su parte, los parámetros S_{II} y $CN(P)$ se posicionan como los parámetros de mejor ajuste en ambas subcuencas, aunque en B_2 arrojan un ME equivalente a la escorrentía media observada, un R^2 moderado y un NSE muy bajo. En este sentido, los resultados indican que ninguno de los parámetros estimados para B_2 es fiable para estimar la escorrentía generada por eventos de precipitación.

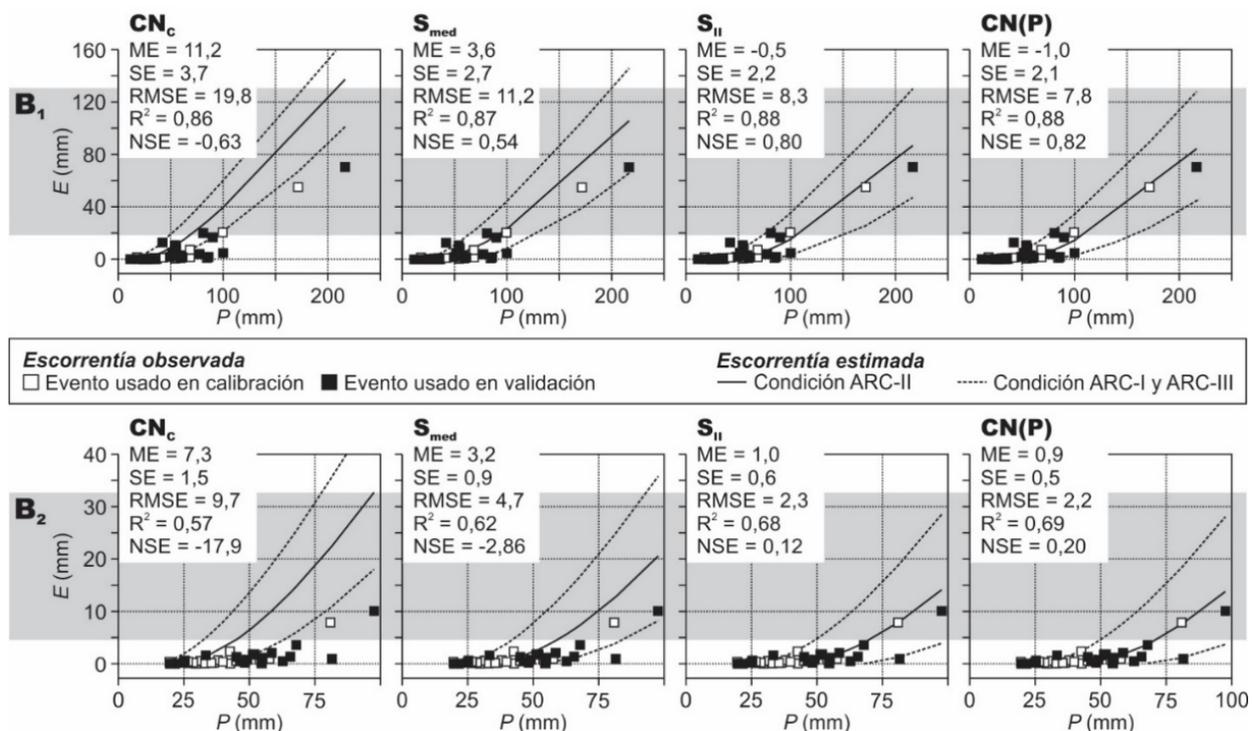


Figura 6 - Curvas de escorrentía estimada por evento P para las subcuencas B_1 y B_2 por método de aproximación. Las métricas de error corresponden a la condición ARC II.

Independientemente de la mayor o menor bondad del ajuste, se observa que los errores arrojados por los CN obtenidos para las subcuencas de análisis se deben a la existencia de eventos que se encuentran más próximos a los límites de la distribución, I y III, que a la condición intermedia II, siendo sistemáticamente sobreestimados o subestimados, respectivamente.

Ello se ve reflejado más claramente por la forma que adquiere la curva de ajuste de S_{med} en cada subcuenca. En efecto, dicho parámetro representa el 50 % de la distribución y, en consecuencia, separa los eventos en dos conjuntos que responden a condiciones cada vez más cercanas

a los límites de error I y III (Figura 6).

Validación sobre series acumuladas

Las curvas de escorrentía acumulada indican que ninguno de los CN obtenidos resulta adecuado para estimar el potencial hídrico de las subcuencas a largo plazo puesto que, en términos intermedios (ARC II), se presentan como muy bajos (S_{II} y $CN(P)$) o muy altos (CN_c). Ello guarda relación directa con la relación inversa que existe entre CN y S. A menor CN, mayor será la abstracción inicial $0,2S$ y, en consecuencia, mayor será el número de eventos de pequeña magnitud relativa que no serán tenidos en cuenta por el método.

A la inversa, cuanto mayor sea el CN, mayor será el número de eventos que superen la abstracción inicial $0,2S$. Así, los parámetros S_{II} y $CN(P)$ estiman adecuadamente los eventos de mediana y gran magnitud relativa (Figura 6), pero fallan a largo plazo porque omiten sistemáticamente un buen número de eventos de pequeña magnitud que, en definitiva, contribuyen a la escorrentía acumulada de las subcuencas a largo plazo (Figura 7). Por el contrario, el CN_c sobreestima sistemáticamente los eventos de mediana y gran magnitud (Figura 6), aunque,

paralelamente, incluye un mayor número de eventos de pequeña magnitud. Ello resulta en una sobreestimación del volumen acumulado en B_1 y de una adecuación de la curva en B_2 (Figura 7), donde el ajuste aparente se debe principalmente a la predominancia de eventos pequeños en la serie.

Al igual que en el caso del análisis eventual, estos resultados advierten sobre la necesidad de determinar algún parámetro que permita considerar las condiciones de escurrimiento antecedente de tipo I y III en las estimaciones.

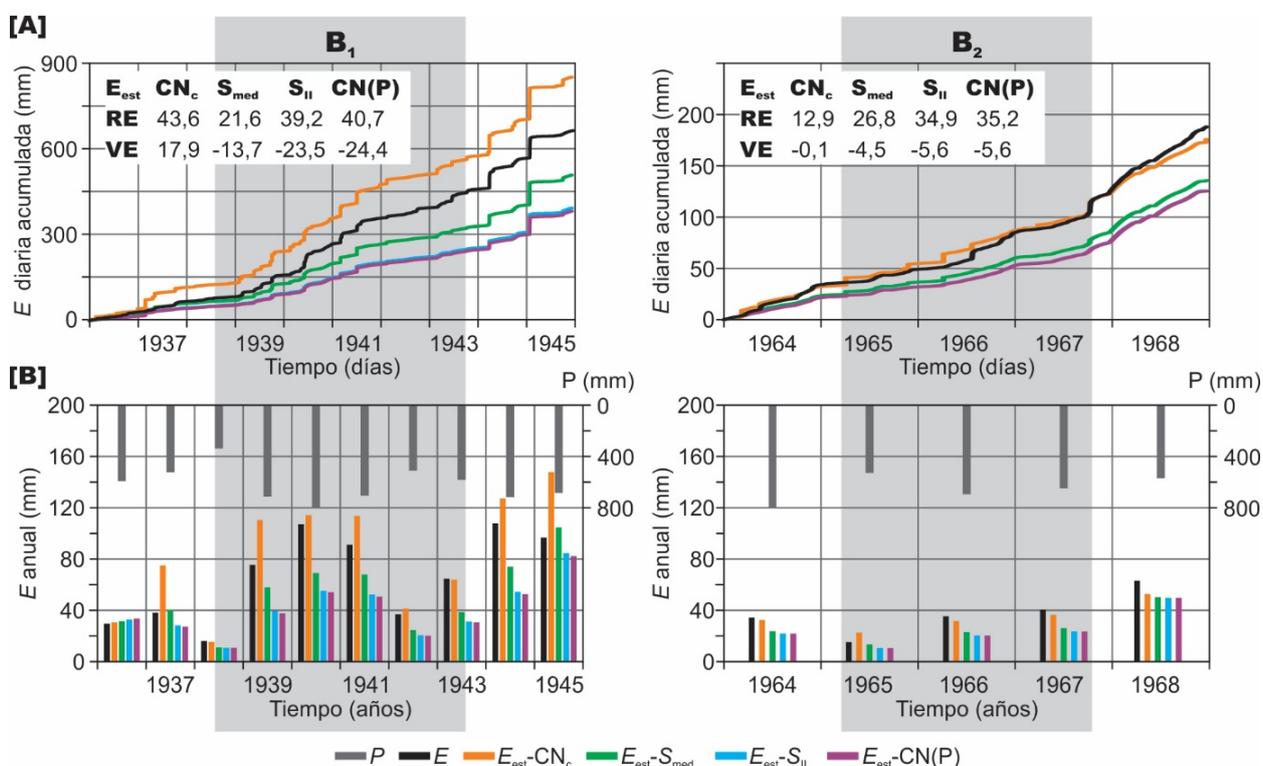


Figura 7 - Escorrentía registrada y estimada por método de aproximación del número de curva para las subcuencas B_1 y B_2 . [A] Lámina diaria acumulada y [B] lámina anual.

Ajuste a la realidad hidrológica de la cuenca del arroyo Napostá Grande

Dado que la mayoría de las cuencas regionales carece de registros sobre los cuales conducir el análisis propuesto en este estudio, la obtención de un CN ajustado a la realidad regional adquiere particular relevancia. El análisis implica la definición, con carácter primordial y excluyente, de los estados límites de humedad antecedente que permitirán establecer los CN correspondientes. Se halló para cada cuenca un ajuste de CNI, CNII y CNIII utilizando los límites de humedad I y III según P_5 , que represente la acumulación de la lámina escurrida en periodos plurianuales, y que permita evaluar la disponibilidad de agua superficial en la cuenca a considerar en la planificación hídrica.

Para ello, en ambas subcuencas se efectuó un

análisis iterativo de la continuidad en tiempo discreto a fin de hallar un CN ajustado (CN_{aj}) que compense las diferencias positivas y negativas acumuladas entre E_{est} y E , de manera de minimizar, al menos exploratoriamente, los valores de RE y VE promedio, teniendo en cuenta dos aspectos (i) la respuesta del modelo frente a la existencia o ausencia de precipitaciones diarias y antecedentes y (ii) la dispersión característica de los datos de entrada.

Se compararon para cada subcuenca los Ajustes: 1) definiendo un nuevo CNII y calculando CNI y CNIII según P_5 : $CNI = CNII / (2,281 - 0,01281CNII)$; $CNIII = CNII / (0,427 - 0,00573CNII)$; 2) recalculando CNI y/o III en función de lo analizado precedentemente para los métodos CN_c , $CN(P)$ y S_{II} ; y 3) repitiendo el procedimiento anterior para CNI, II y/o III (iteración); los CN_{aj} obtenidos

nidos reducen el intervalo de las diferencias entre E_{est} y E y optimizan la distribución de las estimaciones por exceso y defecto, centrándolas (Figura 8). La mejor solución para la metodología aplicada se obtuvo para el Ajuste 3 en B_1 y B_2 (Tabla 4).

Los valores de CN_{aj} en ambas subcuencas son más próximos a los obtenidos por el método CN_c para ARC II, muy superiores a los obtenidos por los métodos $CN(P)$ y/o S_{II} , mientras que para

ARC I, CN_{aj} resultó comparable al CN derivado de S_{med} . Se observa, entonces, que el potencial de escorrentía de esta cuenca seca subhúmeda para condiciones antecedentes de tipo seco y húmedo resulta mayor y menor, respectivamente, que el esperado a partir de las características geospaciales de la cuenca debido, presumiblemente, al efecto de la pendiente topográfica y la distribución y capacidad de infiltración de los suelos rocosos sobre el escurrimiento.

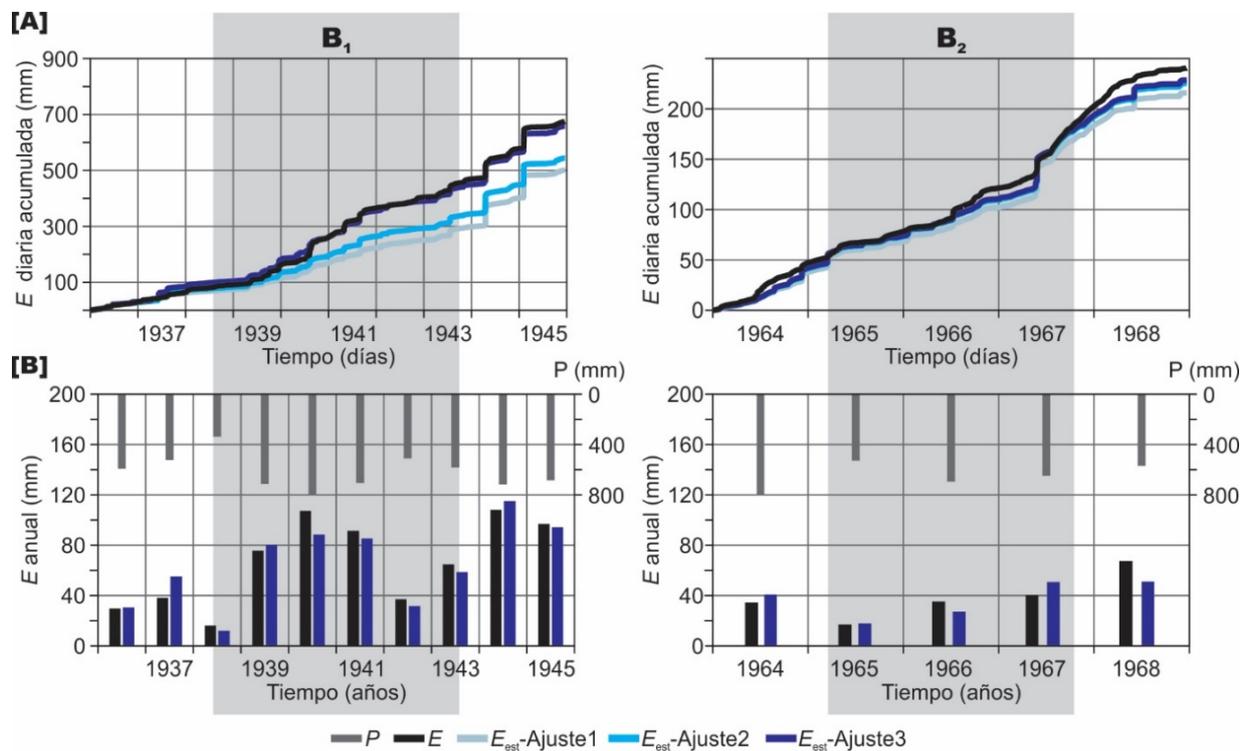


Figura 8 - Escorrentía registrada y estimada por Ajustes 1, 2 y 3 para las subcuencas B_1 y B_2 . [A] Lámina diaria acumulada y [B] lámina anual.

Tabla 4 - CN adoptados en los ajustes propuestos y métricas de error para el análisis acumulado en las subcuencas B_1 y B_2 .

	B_1			B_2								
	CNI	$CNII$	$CNIII$	$E_{est}-E$ (mm)	VE (hm^3)	RE (%)	CNI	$CNII$	$CNIII$	$E_{est}-E$ (mm)	VE (hm^3)	RE (%)
Ajuste 1	53,0	72,0	85,8	[-176,4]	-17,7	25,7	58,1	76,0	88,1	[-29,1]	-9,7	15,4
Ajuste 2	60,0	72,0	83,0	[-134,9]	-12,5	18,4	62,0	76,0	88,1	[-20,10]	-5,3	9,4
Ajuste 3	67,8	72,0	79,8	[-24,38]	0,03	9,2	62,0	78,0	88,1	[-18,11]	-4,5	8,6

En B_1 , los CN_{aj} arrojan una diferencia promedio en el volumen de agua diario acumulado escurrido prácticamente nula y reduce RE en al menos un 50 % respecto a los otros métodos, mejorando consecuentemente la estimación de las escorrentías anuales en el periodo estudiado. La máxima diferencia anual entre E_{est} y E resultó de -19 mm en 1940 (30 % de la escorrentía anual), lo que equivale a una subestimación de $14,5 \text{ hm}^3$ anuales (Figura 8 [A]).

En B_2 , los CN_{aj} resultan superiores a los

valores obtenidos para B_1 (Tabla 4), excepto por el CN_{ajI} que se mantiene por debajo de dicho parámetro indicando abstracciones iniciales mayores que B_1 a igual precipitación. Así, y a diferencia de B_1 donde la pendiente contribuye a incrementar el potencial de escurrimiento bajo condiciones antecedentes secas, la escasa pendiente que caracteriza más del 90 % de la subcuenca B_2 favorece el predominio de procesos hidrológicos verticales sobre los horizontales para condiciones antecedentes secas, lo cual se traduce en un potencial de escorrentía menor.

Los errores porcentuales de CN_{aj} obtenidos representan el 66 % del error porcentual promedio obtenidos a través del método espacial (CN_c); sin embargo, este último resulta más

efectivo en la predicción de escorrentía medida como VE y mejora la estimación de las escorrentías anuales a lo largo del periodo respecto al ajuste propuesto (Figura 8 [B]).

DISCUSIÓN

Los modelos analizados para las subcuencas en estudio resultan una representación matemática de los sistemas reales a través de una expresión analítica de aproximación determinística, donde cada variable independiente interviniente produce una única respuesta del sistema hidrológico. Si bien es sabido que la respuesta hídrica de una subcuenca cuenta con la dispersión propia de cualquier sistema natural complejo, disponer de una expresión analítica simple para la predicción de la respuesta hídrica de la misma frente a eventos de precipitación registrados, cuya adquisición resulta en general más accesible y continua en el tiempo respecto a los aforos de caudal, es de gran importancia.

La aplicación del método CN_c resulta sencilla en aquellos casos en que la zona se halla debidamente representada geoespacialmente en mapas actualizados de escala adecuada y justifica, de esta manera, la implementación de esfuerzos para ampliar y mantener las redes pluviométricas de la zona de interés (Ares et al., 2014). La estimación de la escorrentía con CN_c a partir únicamente de datos de precipitación sobreestima la respuesta hídrica de ambas subcuencas, tanto para eventos como para su progresión acumulada. Se recomienda entonces cautela en la determinación de CN a partir de tablas de NEH-4, particularmente para otras cuencas regionales de similares características geoespaciales.

Por su parte, el método asintótico requiere disponer de registros diarios confiables de precipitación y aforos simultáneos en periodos continuos temporalmente representativos, por lo que su aplicación en cuencas no aforadas no sería factible. En este sentido, el comportamiento asintótico de B_1 coincide con el hallado por Ares et al. (2014) para una microcuenca de Pampa Serrana en provincia de Buenos Aires, Argentina, de 116 km². En el caso de la subcuenca B_2 , el carácter complaciente de la curva $CN(P)$ obtenida indicaría que la superficie de la misma no contribuye en su totalidad a la generación de escurrimiento superficial en el punto de cierre, desaconsejándose su uso para predicción hidrológica (Hawkins, 1993). De

igual manera, la instrumentación continua de los parámetros precipitación y caudal escurrido disponible hasta el momento, que alcanza sólo 5 años y que no incluyen extremos hídricos como en el caso de B_1 , la diversidad observada en las características geoespaciales de la subcuenca, en la que se han detectado extensiones medianosas de alta capacidad de infiltración (Carrica, 1998) y la extensión areal que resulta muy superior a los límites recomendados y utilizados en el desarrollo de los métodos NCRS, indica la importancia de ampliar los estudios, al menos, a series continuas de mayor duración.

Los CN_{aj} hallados para ambas subcuencas representan una solución matemática preliminar que logra, por un lado, mejorar la predicción de la escorrentía acumulada en B_1 a partir del cálculo basado en registros reales y, por otro lado, compensar las estimaciones por defecto y exceso a fin de alcanzar pronósticos de volumen de agua superficial disponible a largo plazo más acordes con los registros históricos disponibles. Los valores de CN_{aj} en B_2 resultan mayores que en los métodos NCRS, en coherencia con los obtenidos por Banasik & Woodward (2010) en la cuenca Zagozdzonka de Polonia Central. Este estudio, uno de los pocos existentes que aborda el tema, determinó un CN a partir de datos reales de 82,6 en promedio, con extremos entre 50,6 y 97,1, mientras que CN teórico fue de 74,6.

Los estudios preexistentes en la cuenca superior, en los que Q_b fue determinado manualmente y la escorrentía fue deducida a partir del uso del programa Balshort v.3, indican que los valores de lámina anual obtenidos en este estudio para el modelo ajustado en B_1 subestiman, en general, la escorrentía directa respecto a la obtenida por Carrica (1998) y Carrica & Lexow (2004), lo que derivaría en una sobreestimación de las abstracciones. Las diferencias absolutas mínimas entre la escorrentía calculada por Carrica & Lexow (2004) y el método ajustado resultan menores a 3 mm anuales (1938, 1941, 1942 y 1944), correspondientes a P anuales mínimas (1938 y 1942) y a P acumuladas máximas durante un evento de precipitación de varios días (1944). De esta manera, el modelo propuesto resulta com-

parable con los estudios previos existentes y se asume que logra representar adecuadamente la escorrentía correspondiente a los años hidrológicos secos. Para los años hidrológicos con P anual mayor a 700 mm la diferencia absoluta máxima para E respecto a Carrica & Lexow (2004) resulta 5,1 mm, a excepción de 1940 donde se observa la diferencia mayor (27,4 mm/año).

Para todos los métodos analizados, las láminas anuales generadas por P anuales similares resultan superiores en la subcuenca de menor tamaño debido, presumiblemente, a la mayor celeridad en el inicio de la escorrentía y a la mayor uniformidad de las características geoespaciales, como lo determinado por Esteves & Lapetite (2003), Cerdan et al. (2004) y Feng & Li (2008). El efecto de la variabilidad témporo-espacial de la precipitación (distribución e intensidad) es alta, especialmente en áreas extensas, lo que debería analizarse a fin de esclarecer la influencia de dicha variabilidad en la estimación de la infiltración o abstracción continuada y en la cuantificación de las áreas de aporte de escorrentía superficial a los cursos de agua.

Por otro lado, los aportes de agua subterránea al agua superficial del cauce en forma de caudal base observada por Carrica (1998) a lo largo de la cuenca media resulta una fracción importante de la escorrentía registrada, por lo que resulta un parámetro de importancia en la cuantificación de E correspondiente a las abstracciones continuadas. Asimismo, debería explorarse en B₂ la manera de incorporar a las respuestas del modelo el perfil del hidrograma de recesión de caudales típico para esta cuenca, que muestra un descenso ralentizado de caudales una vez superado el pico debido al almacenamiento de agua en las riberas (almacenamiento de banco) (Carrica, 1998), especialmente en los eventos de precipitación que se mantienen durante más de un día, como en oct-67.

Estudios realizados por Iguacel et al. (2022) indican que los hidrogramas estimados por el programa HEC-HMS v. 4.4.1 a partir de las precipitaciones registradas en la cuenca alta y media del arroyo Napostá Grande con valores de S de 31 mm definidos en 5 subcuencas generadas por el software representan adecuadamente los picos de caudal reales, pero con ciertas dificultades en la reproducción de eventos hídricos con diversos estados antecedentes de humedad, en coincidencia con los resultados obtenidos a partir de las metodologías aplicadas en el presente trabajo.

En la aplicación del método de NCRS se acepta con validez general en cualquier cuenca de estudio que la abstracción inicial de la precipitación es el 20 % de la retención potencial máxima del suelo S, aunque los valores experimentales obtenidos en distintos sitios muestran una alta dispersión (NCRS, 2004b). En efecto, dicho coeficiente depende fuertemente de las condiciones climáticas y ha sido reportado con valores entre 0 y 0,38 para otras cuencas (Mishra & Singh, 2004; Ponce & Hawkins, 1996; Woodward et al., 2003). La posibilidad de que el coeficiente de abstracción inicial sea distinto del 20 % en las subcuencas analizadas en el presente trabajo es realmente posible, especialmente en B₂ donde estudios previos han destacado la importancia del aporte subterráneo de agua al arroyo (Carrica, 1998). La redefinición del coeficiente de abstracción inicial implicaría reemplazar la Ecuación 4, sólo válida para un coeficiente de 0,2, a fin de obtener la variación de la retención potencial de agua en el suelo S en función de los datos de precipitación y escorrentía observados en el sitio, así como también obtener tablas acordes para los valores de CN según los tipos de suelo, cobertura y pendientes de las subcuencas. El procedimiento requeriría plantear la optimización del sistema de ecuaciones para el cálculo de la escorrentía superficial para CN y coeficiente de abstracción inicial variables, como Vargas & Monroy (2011) llevaron a cabo en tres subcuencas del Valle de Cauca, Colombia.

Otra consideración a tener en cuenta es la diferencia que pudiera existir entre los caudales pico de los eventos de tormenta y los caudales diarios instantáneos o medios registrados con los que se efectuó el presente estudio, y que vale también para precipitaciones, ya que representa un efecto que debiera estudiarse mediante modelos de tormenta para la obtención de CN para eventos de corto plazo. En cuencas con registro de caudales en varios sitios de cierre, es importante estudiar la posibilidad de calibrar las estaciones de aforo en forma secuencial desde aguas arriba hacia aguas abajo (Fattorelli & Fernández, 2011). Para ello es necesario disponer de datos hídricos e hidrológicos confiables registrados simultáneamente en periodos de tiempo continuo lo más extensos posible, calibrando el sistema manualmente por prueba y error o por combinación de hidrogramas calibrados en alguna de las subcuencas e hidrogramas sintéticos en otras. En el caso de las subcuencas superior y

media del arroyo Napostá Grande, los registros simultáneos de precipitación y caudal en B₁ y B₂ sólo alcanzan un periodo de 14 meses discon-

tinuos (Carrica, 1998), por lo que el modelado secuencial sólo podría arrojar valores indicativos y preliminares.

CONCLUSIONES

Este estudio implementó y comparó diversos métodos de aproximación del número de curva del NRCS para determinar el potencial de escorrentía de la cuenca del Arroyo Napostá Grande, una cuenca serrana pobremente aforada sujeta a gran presión hídrica. La metodología de análisis integral planteada en este estudio aborda diversas teorías para la determinación de la escorrentía frente a eventos de tormentas a corto y largo plazo.

El estudio se desarrolla en forma secuencial y paulatina, evaluando la pertinencia de los resultados alcanzados en cada etapa contrastándolos con la respuesta real obtenida a partir de datos registrados en el cierre de dos subcuencas de este sistema, B₁ y B₂, en series de tiempo donde éstas se encontraban aforadas e instrumentadas. Comparativamente, el método S_{II} arroja mejores resultados que el asintótico y que el S_{med} y el CN_c del NRCS para análisis de corto plazo de ambas subcuencas, mientras que para análisis de láminas acumuladas a largo plazo, anuales o plurianuales, resulta más representativo el método ajustado para B₁ y B₂. En consecuencia, podría indicarse la factibilidad de transferencia de estos resultados a otras cuencas regionales no aforadas y/o instrumentadas insuficientemente, como punto de partida para su posterior calibración bajo estados en los que se puedan efectuar los registros correspondientes. Cabe destacar que la transferibilidad de los resultados implica la disponibilidad previa de datos geoespaciales actualizados y registros de precipitaciones diarias seriadas en lapsos temporales significativos. Sin embargo, esta información es crecientemente asequible de forma libre y gratuita, gracias a la implementación de repositorios de datos espaciales e hidroclimáticos a escala global.

En el caso particular de la cuenca del arroyo Napostá Grande, los modelos recomendados para B₁ y B₂ al depender exclusivamente de la variable P, permitirían extender la estimación de las respuestas hídricas/hidrológicas a todas aquellas series de precipitaciones registradas en diversos puntos de las subcuencas, pudiéndose conformar una gran diversidad de escenarios posibles que contribuyan a la gestión y planificación integral del recurso en la cuenca alta del

arroyo Napostá Grande, como capacidad de transporte del cauce, disponibilidad y almacenamiento de agua y comportamiento de la zona frente a inundaciones.

La extensión en los registros continuos de P y Q en B₂ de la serie 1964-1968 a 1959-1969 y el completamiento de otra serie que se encuentra actualmente en etapa de procesamiento entre 2011 y 2021, permitirían obtener resultados más representativos del sistema real y, adicionalmente, contar con dos series independientes entre sí para evaluar los efectos de cambios climáticos sobre los ciclos hidrológicos históricos a lo largo de 62 años, ya que la cuenca no ha evidenciado modificaciones geoespaciales relevantes. Dado que el completamiento de los registros debería plantearse a partir de ecuaciones analíticas que permitan hallar la escorrentía a partir de datos de precipitación, que se hallan disponibles con frecuencia diaria en los intervalos a completar, se requeriría la aplicación de una metodología iterativa a medida que los nuevos pares P-E sean ingresados al sistema de ecuaciones. Para esta subcuenca, entonces, se recomienda la ejecución y/o continuación de un plan de monitoreo de pares P-Q representativos a fin de conformar registros históricos continuos diarios que permitan completar y/o corroborar el modelo preliminar propuesto. También se recomienda evaluar la obtención de un coeficiente de abstracción inicial particular para B₂ y valores de número de curva correspondientes mediante la optimización del ajuste entre la curva de lámina acumulada y estimada, y el estudio de sensibilidad e incertidumbre de los distintos modelos que resuelvan el sistema.

El proceso llevado a cabo, que sigue los pasos de cálculo, verificación, análisis y calibración y finalmente ajuste, permite establecer un protocolo de acción para la determinación de un valor de CN propio de las cuencas en estudio, y que aumenta la fiabilidad de su aplicación en modelos de predicción y simulación de escenarios hídrico/hidrológicos dentro de las mismas. Los procedimientos descritos podrían aplicarse en cuencas de similares características, que se encuentren o hayan estado aforadas e instrumentadas en series largas de tiempo, contribuyendo a la confiabilidad de los modelos hídricos/hidrológicos

existentes o a desarrollar. El análisis de hidrogramas de tormenta característicos y del balance de agua en el suelo mediante teorías complementarias permitirá en un futuro mediato mejorar

la respuesta del modelo propuesto en el presente trabajo, pudiéndose programar los casos particulares en complementos compatibles con software de cálculo hídrico de acceso gratuito.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto de investigación de la Universidad Nacional del Sur: PGI 24/ZJ44 “Estudio de Balances Hídricos e Hidrológicos en Cuencas Mediante Modelos Computacionales con Ajuste a Series de Datos Históricas”.

REFERENCIAS

- ARES, M.G.; CHAGAS, C.I.; VARNI, M. Respuesta hidrológica de cuencas de diferentes tamaños ubicadas en la Pampa Serrana y en la Pampa Ondulada. **Ciencia del suelo**, v. 32, n. 1, p. 117-127, 2014.
- BANASIK, K. & WOODWARD, D. Empirical determination of runoff curve number for a small agricultural watershed in Poland. In: 2nd Joint Federal Interagency Conference, 2010, Las Vegas, NV. **Resumen extendido...** Las Vegas, 2010.
- BERÓN DE LA PUENTE, F., GIL, V.; ZAPPERI, P. Estimación de la pérdida del suelo por erosión hídrica de la cuenca alta del arroyo Napostá Grande, Buenos Aires, Argentina. In: VI Congreso Nacional de Geografía de Universidades Públicas, 2017, Resistencia, Argentina. **Resumen extendido...** Resistencia, 2017.
- CARRICA, J. C. & LEXOW, C. Evaluación de la recarga natural al acuífero de la cuenca superior del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires. **Revista de la Asociación Geológica Argentina**, v. 59, n. 2, p. 281-290, 2004.
- CARRICA, J. **Hidrogeología de la cuenca del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires**. 1998. Tesis (Doctoral). Departamento de Geología. Universidad Nacional del Sur.
- CASADO, A. & CAMPO, A.M. Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos: estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina. **Cuadernos Geográficos**, v. 58, n. 1, p. 6-26, 2019.
- CERDAN, O.; LE BISSONNAIS, Y.; GOVERS, G.; LECOMTE, V.; VAN OOST, K.; COUTURIER, A.; DUBREUIL, N. Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy. **Journal of hydrology**, v. 299, n. 1-2, p. 4-14, 2004.
- CURTIS, J.A.; BURNS, E. R.; SANDO, R. Regional patterns in hydrologic response, a new three-component metric for hydrograph analysis and implications for ecohydrology, Northwest Volcanic Aquifer Study Area, USA. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 30, p. 100698, 2020.
- ESTEVEZ, M. & LAPETITE, J. M. A multi-scale approach of runoff generation in a Sahelian gully catchment: a case study in Niger. **Catena**, v. 50, n. 2-4, p. 255-271, 2003.
- FATTORELLI, S. & FERNÁNDEZ, P.C. **Diseño Hidrológico** (Edición Digital), cap. I, sección, v. 2, 2011.
- FENG, P. & LI, J. Scale effects on runoff generation in meso-scale and large-scale sub-basins in the Luanhe River Basin. **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, v. 5, n. 3, p. 1511-1531, 2008.
- GRABAU, M.R., HAWKINS, R.H., VERWEIRE, K.E.; SLACK, D.C. Variety of antecedent runoff conditions for rainfall-runoff with the curve number method. In: Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest, 2009, Arizona. **Resumen extendido...** Arizona-Nevada: Academy of Science, 2009, p. 45-47.
- HAWKINS, R.H. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 119, n. 2, p. 334-345, 1993.
- HAWKINS, R.H. Curve number method: Time to think anew? **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 6, p. 1059-1059, 2014.
- HAWKINS, R.H. Improved prediction of storm runoff in mountain watersheds. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 99, n. 4, p. 519-523, 1973.
- HAWKINS, R.H.; HJELMFELT JR, A.T.; ZEVENBERGEN, A.W. Runoff probability, storm depth, and curve numbers. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 111, n. 4, p. 330-340, 1985.
- HAWKINS, R.H.; WARD, T.J.; WOODWARD, D.E.; VAN MULLEM, J.A. Curve number hydrology: State of the practice. **American Society of Civil Engineers**, 2009.
- HJELMFELT, A.T., KRAMER, L.A. & BURWELL, R. E. Curve numbers as random variables. In: International Symposium on Rainfall -Runoff Modeling, 1982, Littleton, Colorado. **Resumen extendido...** Littleton: Water Resources Publishers, 1982, p. 365 -373.
- IGUACEL, N.A.; AGUINAGA MARTÍNEZ, M.; LÓPEZ, N.C.; RANGO, B.J.; GIL, V. Identificación de hidrogramas unitarios característicos para un arroyo del SO bonaerense. In: 6° Congreso Argentino de Ingeniería, 2022, **Resumen extendido**, 2022.
- INDEC. **Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010**. Bases de datos REDATAM. 2010.
- INDEC. **Encuesta Permanente de Hogares: Cuadros regulares - EPH Continua**. 2020.
- INTA. **Carta de suelos de la República Argentina**. 3963-5 TORNQUIST. 2018.
- LIEBMANN, B. & ALLURED, D. Daily precipitation grids for South America. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 86, n. 11, p. 1567-1570, 2005.
- LUQUE, J.A.; PAOLONI, J.D.; BONORINO, G.A. **Estudio hidrológico e hidrogeológico de la cuenca del río Sauce Grande** (Vol. 3). Bahía Blanca: Universidad Nacional del Sur, 64 p., 1979.
- MCCUEN, R. H. Approach to confidence interval estimation for curve numbers. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 7, n. 1, p. 43-48, 2002.
- MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C. Soil conservation service curve number method: How to mend a wrong soil moisture accounting procedure? **Water Resour. Res.**, v. 41, n. 2, 2005.
- MISHRA, S.K. & SINGH, V.P. A relook at NEH-4 curve number data and antecedent moisture condition criteria. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 20, n. 13, p. 2755-2768, 2006.
- MISHRA, S.K. & SINGH, V.P. Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number. **Hydrological Processes**, v. 18, p. 1291-1313, 2004.
- MISHRA, S.K.; JAIN, M.K.; PANDEY, R.P.; SINGH, V.P. Catchment area-based evaluation of the AMC-dependent SCS-CN-based rainfall-runoff models. **Hydrological Processes**, v. 19, p. 2701-2718, 2005.
- NRCS. National Engineering Handbook, Part 630: Hydrology. **Chapter 10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall**. Washington: USDA, 79 p., 2004a.
- NRCS. National Engineering Handbook. Part 630: Hydrology. **Chapter 9: Hydrologic soil-cover complexes**. Washington: USDA, 20 p., 2004b.
- PONCE, V.M. & HAWKINS, R.H. Runoff curve number: Has it reached maturity? **Journal of hydrologic engineering**, v. 1, n. 1, p. 11-19, 1996.

- REVOLLO SARMIENTO, G.N.; REVOLLO SARMIENTO, N.V.; DELRIEUX, C.A.; PERILLO, G.M. **Morphological characterization of ponds and tidal courses in coastal wetlands using Google Earth imagery**. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 246, p. 107041, 2020.
- SCIAN, B. Episodios ENSO y su relación con las anomalías de precipitación en la pradera pampeana. *Geoacta*, v. 25, p. 23-40, 2000.
- SCIAN, B.; LABRAGA, J.C.; REIMERS, W.; FRUMENTO, O. Characteristics of large-scale atmospheric circulation related to extreme monthly rainfall anomalies in the Pampa Region, Argentina, under non-ENSO conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 85, n. 1-2, p. 89-106, 2006.
- SCS. **National Engineering Handbook. Section 4: Hydrology**. Washington: U.S. Government Printing Office, 1972.
- SILI, M. **Los espacios de la crisis rural : geografía de una pampa olvidada**. Bahía Blanca: EdiUNS, 179 p., 2000.
- SLOTO, R. A. & CROUSE, M.Y. **HYSEP, a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis**. Lemoyne, Pennsylvania: US Geological Survey, 54 p., 1996.
- SOULIS, K. & VALIANTZAS, J. SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds-the two-CN system approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 16, n. 3, p. 1001, 2012.
- STEWART, D.; CANFIELD, E.; HAWKINS, R. Curve number determination methods and uncertainty in hydrologic soil groups from semiarid watershed data. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 17, n. 11, p. 1180-1187, 2012.
- TEDELA, N.H.; MCCUTCHEON, S.C.; RASMUSSEN, T.C.; HAWKINS, R.H.; SWANK, W.T., CAMPBELL, J.L.; TOLLNER, E.W. Runoff Curve Numbers for 10 small forested watersheds in the mountains of the Eastern United States. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 17, n. 11, p. 1188-1198, 2012.
- VARGAS, A. & MONROY, J.C. Estudio del comportamiento de modelos hidrológicos bajo un análisis de sensibilidad e incertidumbre. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, n. 10, p. 65-77, 2011.
- VERMA, S.; VERMA, R.; MISHRA, S.; SINGH, A.; JAYARAJ, G.A revisit of NRCS-CN methodology and application of RS and GIS for surface runoff estimation. *Hydrol Sci J*, v. 62, n. 12, p. 1891-1930, 2017.
- WOODWARD, D.E.; HAWKINS, R.H.; JIANG, R.; HJELMFELT, J.; ALLEN, T.; VAN MULLEM, J.A.; QUAN, Q.D. Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio. In: World Water & Environmental Resources Congress 2003, Philadelphia, Pennsylvania. **Resumen extendido...** Philadelphia, 2003, p. 1-10.

*Submetido em 28 de outubro de 2022
Aceito para publicação em 18 de setembro de 2023*