

Balance hídrico aplicado al cálculo de evapotranspiración normal en una subcuenca serrana

Hydric balance applied to normal evapotranspiration calculation in a hill-mountain sub-basin

**Iguacel, Nicolás Andrés ⁽¹⁾, Aguinaga Martínez, Martín ⁽¹⁾, Rango, BrunoJavier ⁽²⁾
y López, Natalia Cecilia ⁽²⁾**

^{(1) (2)} Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur. Alem 1253, 1° Piso, Bahía Blanca, 8000, Argentina.

⁽³⁾ Área I-Hidráulica, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur; Instituto de Física del Sur, Universidad Nacional del Sur – CONICET. Alem 1253, 1° Piso, Bahía Blanca, 8000, Argentina.

E mail: iguacelnico@gmail.com

Iguacel, N.A.; Aguinaga Martínez, M.; Rango, B. J.; López, N. C. (2021). Balance hídrico aplicado al cálculo de evapotranspiración normal en una subcuenca serrana. *Revista Estudios Ambientales*, 9(2), 193-211.

Recibido: 28 de octubre de 2021

Aceptado: 2 de diciembre de 2021

Publicado: 30 de diciembre de 2021

RESUMEN

La cuenca superior del arroyo Napostá Grande se ubica en el SO de la provincia de Buenos Aires. Para la subcuenca superior, se dispone de registros de caudal y precipitaciones (P) durante 1936-1945. El objetivo de este estudio se orienta hacia la elaboración de la curva de evapotranspiración real (ETR) normal para la subcuenca mediante el método de balance hídrico, para predecir la respuesta hídrica en ciclos de larga duración. Para esto, de acuerdo a las características de la subcuenca, se estableció un valor de intercepción del 10% de P. Los resultados mostraron una marcada correlación entre P y ETR y que, en general, una parte significativa de P es convertida en ETR. Además, se observó que para los registros disponibles de precipitaciones acumuladas mensuales más altos, la parte de P que es transformada en ETR muestra una dispersión más alta y una tendencia general a disminuir. Este comportamiento es atribuido parcialmente a la rápida evacuación de precipitaciones extraordinarias causadas por las altas velocidades de crecidas que caracteriza esta subcuenca serrana. En cuanto a la ETR normal mensual, se encontró que la variación del parámetro durante el año sigue el régimen de precipitaciones de la subcuenca, con valores más altos en primavera y verano. Los valores medios de ETR normal resultaron similares a las magnitudes reportadas en estudios previos por otros autores en la misma subcuenca, donde se aplicaron otras metodologías. La gráfica de ETR normal resulta aceptable en periodos de 10 años o más de registros en la subcuenca de estudio, recomendándose para la comparación de distintos ciclos hídrico-hidrológicos. Reestablecer los registros hídricos contribuiría a detectar alteraciones significativas del balance hídrico, en particular a la ETR de la subcuenca, pudiendo abordar acciones destinadas a la preservación del recurso.

Palabras clave: evapotranspiración normal, precipitación, balance hídrico, A° Napostá Grande, ciclos hidrológicos.

ABSTRACT

The Napostá Grande stream basin is located in the SW of the Buenos Aires province. For the upper sub-basin, flow and rainfall (P) records corresponding to the period 1936 – 1945 are available. The objective of this study is oriented towards the construction of the normal real evapotranspiration (ETR) curve for the upper sub-basin through the method of hydric balance, in order to predict the hydric response for cycles of long duration. For this purpose,

the daily records were reorganized into monthly accumulated registers and, according to the sub-basin's characteristics, an interception value of 10% of P was established. The results revealed that a marked correlation between P and ETR exists and, in general, a significant part of P is converted into ETR. Moreover, it was observed that for the highest registers of accumulated monthly rainfall available, the part of P that is transformed into ETR shows a higher dispersion and a general tendency to decrease. This behavior is attributed partially to the rapid evacuation of extraordinary rainfalls caused by the high overflow speed that characterizes this hill-mountain sub-basin. Regarding the normal monthly ETR, the variation of this parameter during the year is found to follow the precipitations regime, with higher values in the spring and summer. The average values of normal ETR turned out to be similar to the magnitudes reported in previous studies by other authors in the sub-basin, where different methodologies were applied. The normal ETR graphic turns out acceptable in periods of 10 years or more of records in the studied sub-basin, being recommended for the comparison of different hydric-hydrological cycles. Re-establishing the hydric records would contribute to detect significant alterations in the hydric balance, in particular the ETR of the sub-basin, and would allow to take actions aimed at preserving the natural resource.

Keywords: normal evapotranspiration, precipitation, hydric balance, Napostá Grande stream, hydrological cycles.

INTRODUCCIÓN

Generalidades

Desde el inicio de los tiempos, la humanidad ha intentado conocer las variables naturales que influyen directa o indirectamente en su supervivencia en el medio ambiente y, particularmente, las referidas al agua dulce. Así, el estudio de los ciclos hidrológicos, ha permitido realizar previsiones frente a posibles contingencias en la disponibilidad del recurso hídrico y de esa forma planificar el manejo de cultivos, la reserva del agua para consumo humano y abrevado del ganado, el control de las inundaciones para la preservación de poblados y zonas productivas, entre otros. Ante el aumento poblacional observado a nivel mundial y sus consecuencias en el ambiente —creciente demanda de agua para consumo y producción, cobertura de la superficie terrestre, agotamiento de los suelos, pérdida de la diversidad natural, degradación de la calidad del agua, entre otras—, requiere repensar la

responsabilidad de los ciudadanos en su condición de usuarios, beneficiarios y muchas veces perjudicatarios de los recursos naturales. De esta forma, será posible promover el cuidado, la preservación y la gestión de los recursos, a fin de alcanzar un aprovechamiento sustentable.

En este sentido, el manejo integral de una cuenca hidrográfica requiere del estudio de los factores naturales y antrópicos que interactúan en el medio. Su adecuada identificación permitiría direccionar pautas de gestión y toma de decisiones por parte de organismos competentes en la temática a fin de favorecer la sustentabilidad del ambiente (Gaspari & Bruno, 2003). Así, la ausencia y/o discontinuidad en los registros de información hidroclimatológica pone de manifiesto la necesidad de emplear metodologías simplificadas en la ejecución de proyectos relacionados con la planeación, la gestión y el manejo de los recursos hídricos (Corredor Rivera & Peñaranda Vélez, 2012).

Los eventos de precipitación (P) generan, en una cuenca hidrográfica, mecanismos de escorrentía superficial (Es) y de abstracción o pérdida de agua de lluvia. Las abstracciones pueden ser iniciales —que incluyen la evapotranspiración real (ETR), que es la componente de mayor influencia, y la intercepción vegetal (I)— o continuadas. Las abstracciones continuadas involucran procesos de infiltración que contribuyen a acrecentar el volumen de las aguas subterráneas y pueden descargarse en los cursos de agua superficiales efluentes en forma de caudal base (Qb) o fuera de la cuenca hidrográfica (Qss). El caudal total (Q) que fluye por un cauce de agua superficial efluente resulta $Q = Es + Qb$.

La evaporación se define como el proceso por el cual el agua se retira de una superficie por efecto de la radiación solar directa, la temperatura y humedad del aire y la diferencia de la presión de vapor del agua existente en la superficie evaporante y en la atmósfera circundante. La transpiración, en cambio, es la pérdida de agua retenida en los tejidos vegetales hacia la atmósfera, predominantemente a través de las estomas de las hojas. Esta variable depende también de la radiación solar directa, la temperatura y humedad del aire, el gradiente de la presión de vapor del agua y la intensidad del viento. Dado que casi la totalidad del agua absorbida por la planta a través de las raíces se pierde en forma de transpiración, el contenido de agua del suelo y su capacidad para conducir el agua a las raíces también influyen en la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. Por otro lado, la tasa de evaporación de una superficie de referencia (ET_0) se interpreta como la capacidad evaporante de la atmósfera en una localidad y en una época del año, sin restricciones de agua y para un cultivo hipotético de pasto con características

específicas. Su valor puede determinarse aplicando métodos empíricos como el de Penman-Monteith a partir de parámetros climáticos como radiación solar neta en la superficie del cultivo, flujo de calor del suelo, temperatura media del aire, velocidad del viento, presión de vapor de saturación, presión real de vapor y pendiente de la curva de presión de vapor (FAO, 2006). Estas variables requieren la disponibilidad de una estación meteorológica de registro continuo a fin de constituir una base de datos confiable para la determinación de ET_0 . Asimismo, la evapotranspiración de un cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) se interpreta como la evapotranspiración de cualquier cultivo sano, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. La relación ET_c/ET_0 se define como el coeficiente del cultivo (K_c), variable a lo largo de los distintos estadios de crecimiento del cultivo, y se halla tabulado en FAO (2006). La interceptación (I) es una medida de la cantidad de agua retenida por las hojas, ramas, tallos y restos vegetales acumulados sobre la superficie del suelo, cantidad que se evapora de nuevo junto con la evapotranspiración, retornando a la atmósfera. Los estudios para la determinación de I fueron desarrollados mayormente en zonas boscosas de clima frío, templado y tropical, siendo escasos los que se han llevado a cabo en climas áridos o semiáridos con especies arbustivas o herbáceas (López-Lambraño et al., 2017)

En regiones áridas y semiáridas con vegetación herbácea o matorrales los valores de interceptación se han reportado entre 3 y 10,9% del total de la lluvia (Carlyle-Moses, 2004; López-Lambraño, 2007), mientras que otros autores han reportado un valor medio de I de 10% (Ulloa et al., 2001). En zonas con altitud media de 2.000 m.s.n.m., temperatura media anual de 16,7 °C, precipitación media anual de 550 mm y vegetación herbácea-arbustiva, se informan correlaciones lineales entre precipitación e interceptación donde I representa el 2,33% de P (López-Lambraño et al., 2017). Para la cuenca superior del A° Napostá Grande, Carrica & Lexow (2004) utilizaron un valor máximo de I equivalente 5 mm/día para el programa computacional Balshort; mientras que por el método de Horton (1919) I alcanza un valor promedio de 0,16 mm/día por año. La evapotranspiración, por su parte, puede estimarse a partir de diversos métodos: balance hídrico, transferencia de masa, balance energético, método de Penman-Monteith y otros (Rosenberg et al., 1983). Estudios de Carrica & Lexow (2004) reportan valores de ETR, calculados a partir de la fórmula de evapotranspiración potencial de Blaney-Criddle entre 67 y 88% de P , con un promedio de 79% de P para la cuenca superior del A° Napostá Grande.

El estudio de balances hídricos en cuencas superficiales requiere la medición y/o registro simultáneo de series largas de diversas variables dentro de la cuenca: climáticas, hídricas, hidráulicas, etc. Sin embargo, la recopilación de datos de campo de carácter hídrico-hidrológico en países del Tercer Mundo muchas veces representa un desafío debido, por un lado, a los costos asociados a los muestreos y, por otro, a la dificultad de establecer programas oficiales de monitoreo de cuencas que funcionen de manera ininterrumpida y a largo plazo, a fin de contar con información seriada, confiable y continua, para conformar series históricas.

Los registros hídricos-hidrológicos diarios simultáneos intervinientes en una determinada cuenca hidrográfica efectuados a lo largo de periodos de tiempo seriado y continuo, permiten la debida calibración de todos aquellos parámetros y coeficientes que rigen la dinámica de los balances hídricos. En dichos casos, la evapotranspiración puede calcularse por el método de balance hídrico (Ecuación 1), donde Q_{ss} es el caudal subterráneo que drena de la cuenca topográfica cuando esta no coincide con la cuenca hidrográfica y ΔSa es el cambio en el almacenamiento del acuífero.

$$P - Q = ETR + I + Q_{ss} \pm \Delta Sa \quad (1)$$

Las divisorias topográficas superficiales de cuencas en general no coinciden con la divisoria de las aguas subterráneas, aunque en cuencas hidrográficas de gran superficie la magnitud de las diferencias entre ganancias o pérdidas debido a la no coincidencia de dichas divisorias es normalmente pequeña ($Q_{ss} \rightarrow 0$) (Monsalve-Sáenz, 1999). Asimismo, se conoce que, en periodos largos de tiempo, el cambio en el almacenamiento de la cuenca ΔSa resulta despreciable. Por ello y siempre que la divisoria topográfica de la cuenca coincida con la divisoria hidrogeológica y los valores de intercepción resulten despreciables, la evapotranspiración anual media puede entonces determinarse con suficiente precisión como diferencia entre precipitación y caudales superficiales promedios. Esta metodología aplicada en forma continua en el tiempo permite determinar la curva de ETR normal para una cuenca.

Objetivo

El objetivo de este estudio consiste en determinar la curva de evapotranspiración normal para la cuenca superior del A° Napostá Grande a partir de registros hídricos-hidrológicos

históricos continuos, a fin de establecer una herramienta que contribuya a la predicción de la respuesta hídrica durante distintos ciclos hidrológicos de larga duración, así como también a la calibración de modelos hídricos y la detección de cambios climáticos significativos.

Características de la zona de estudio

La cuenca superior del arroyo Napostá Grande está ubicada en el SO de la provincia de Buenos Aires, Argentina, donde el clima según la clasificación de Köppen (1948) es semiárido o de transición entre clima subhúmedo y de estepa. La subcuenca, con cierre en el Cerro del Águila, cuenta con una pendiente media de 4% en sus 25 km de longitud. Abarca un área de 196 km² y se extiende desde la naciente del arroyo Napostá Grande, ubicado al oeste de la cadena montañosa de las Sierras de Ventania (Fig. 1). Sus afluentes en este tramo son el A° del Águila o La Tigra y el A° El Zanjón, ambos de régimen intermitente. La densidad de drenaje es 0,4 km/km² con un índice de compacidad de 1,2 (MOP et al., 1990; Carrica, 1998).

Las precipitaciones representan el único ingreso de agua a la cuenca, siendo la lámina anual media en el periodo 1940-1945 de 652 mm, mientras que para la serie 1888-1987 fue de 721 mm. Las series pluviométricas precipitadas indican la clara alternancia entre periodos secos y húmedos con extensión temporal de 10-14 años hasta la década del '60 y con extensiones mayores, cercanas a los 25 años, en las décadas siguientes. Los registros disponibles permiten identificar dos períodos de precipitaciones bien marcados, de acuerdo a las precipitaciones estacionales. Estas corresponden al período Octubre – Marzo, con valores de precipitaciones más elevadas, y el período Abril – Septiembre, con precipitaciones marcadamente inferiores (Carrica, 1998).

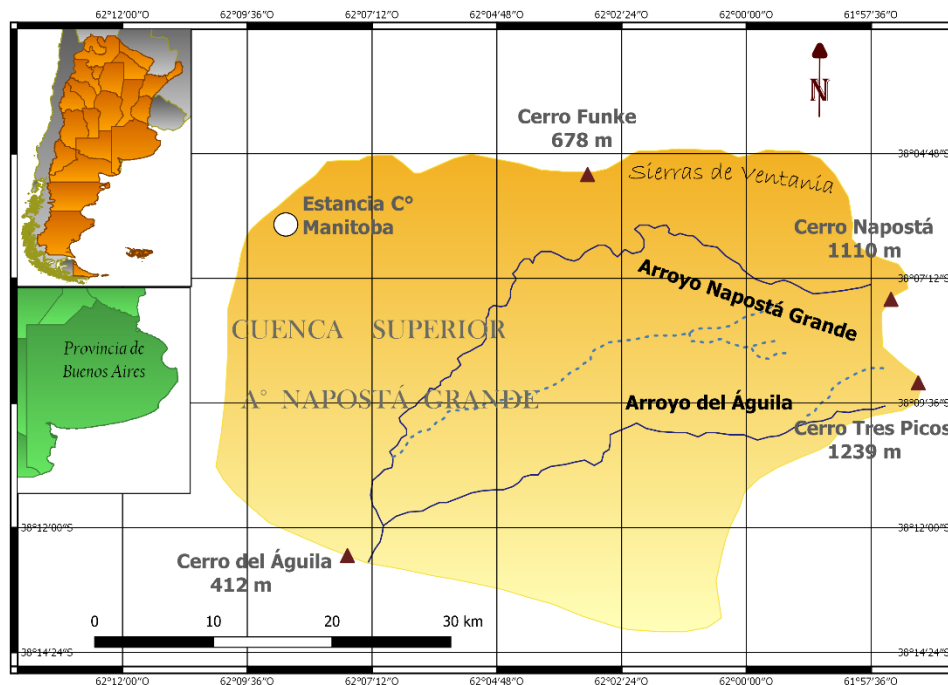


Figura 1. Ubicación de la cuenca superior del arroyo Napostá Grande (Provincia de Buenos Aires, Argentina).

La cuenca está constituida por sedimentos loésicos en afloramientos o sub-afloramientos rocosos, compuestos mayormente por arenas finas, limos y limos arcillosos, cementado por carbonato de calcio. Los afloramientos de roca de cuarcita del sector montañoso de la cuenca superior cubren el 30% del área (Carrica & Lexow, 2004). Del 70% restante, aproximadamente el 10% se encuentra representada por pastizales, 75% por cultivo con manejo desarrollado en terrazas o curvas de nivel, 10% por cultivo sin manejo y 5% por monte (Gaspari et al., 2006).

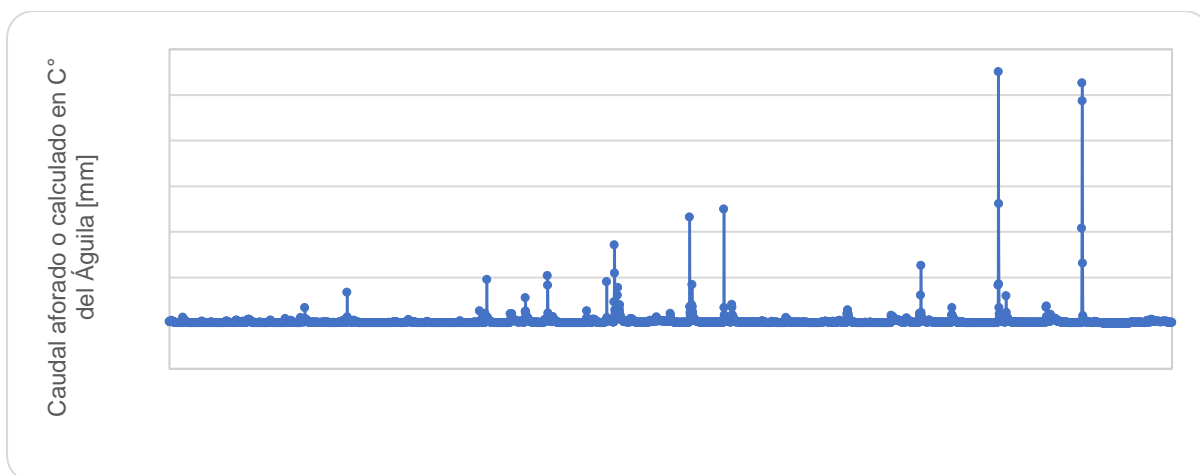


Figura 2. Caudal diario determinado por el Ministerio de Obras Públicas(MOP) en C° del Águila (1936-1945).

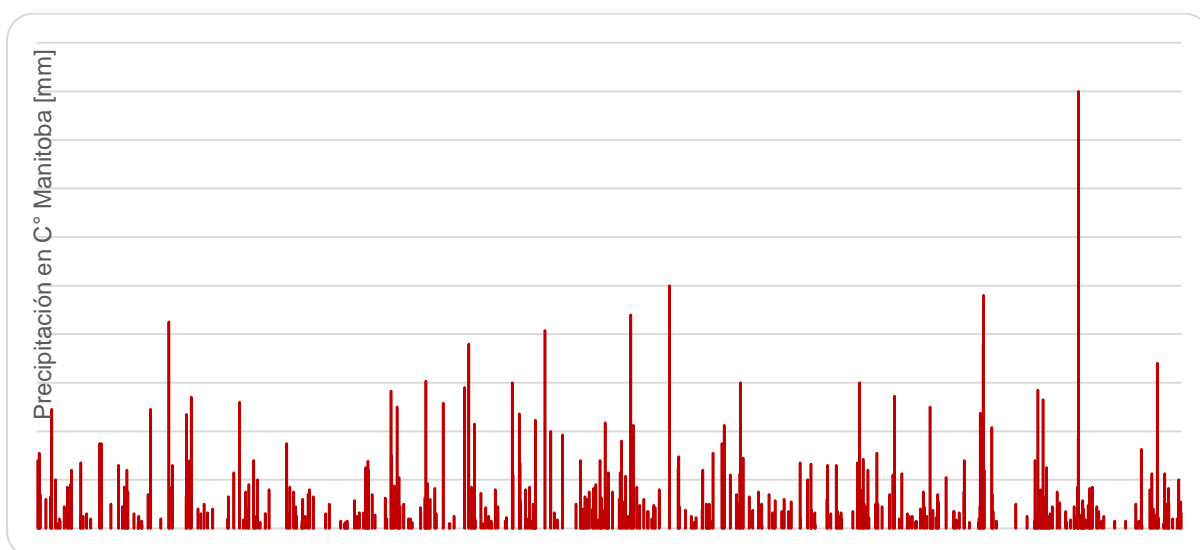


Figura 3. Precipitación diaria en estación C° Manitoba (1936-1945).

Entre ene-1936 y dic-1945, existen registros diarios continuos de aforo del cauce superficial en el cierre de la subcuenca y registros pluviométricos en su zona de influencia, obtenidos por el Ministerio de Obras Públicas de la Nación y por personal perteneciente al casco de la estancia en C° Manitoba, respectivamente (Fig. 2 y 3).

METODOLOGÍA

Para llevar adelante el presente estudio se utilizaron valores acumulados mensuales de lámina precipitada (P) y lámina total escurrida en el cauce (Q) en mm, obtenidos a partir de registros diarios existentes en el periodo 1936-1945 en la cuenca superior del A° Napostá Grande (Fig. 2 y 3) registrada en la Ea. Cerro del Águila por Agua y Energía de la Nación (MOP et al. 1990). La lámina escurrida se obtuvo como el cociente entre el volumen de escurrimiento diario en m³ y la superficie de la cuenca superior en m², multiplicando luego el resultado por 1000 a fin de expresarla en mm.

Para proceder en el estudio de los valores de evapotranspiración real que se generan en la cuenca con el método de balance hídrico (Ecuación 1), se estableció para un cálculo inicial un valor de intercepción vegetal del 10% de las precipitaciones mensuales. Además, se definió un valor nulo para el caudal de infiltración que sale de la cuenca hidrográfica. En efecto, el valor de Qss anual reportado por otros autores para la cuenca en estudio (Carrica & Lexow, 2004) representa solamente entre el 4% y el 7% de la ETR anual. Asimismo, Gaspari & Bruno (2003) afirman que toda infiltración en la cuenca superior del A° Napostá Grande ocurre dentro de los límites de la cuenca, por lo que puede asumirse que la cuenca topográfica coincide con la cuenca hidrográfica. En suma, existe consenso en la literatura respecto a la baja relevancia de Qss para la subcuenca en estudio. En este contexto, la hipótesis de valor nulo para Qss supone una medida del lado de la seguridad para el cálculo de la evapotranspiración real. Así, el estudio de balance hídrico a lo largo de un período relativamente largo de tiempo se ajusta también a la hipótesis de cambio nulo en el almacenamiento de la cuenca (ΔSa).

Con el fin de evaluar la variación entre la evapotranspiración real y las precipitaciones que se producen, se estudió la diferencia entre ambos valores para los mismos períodos. La gráfica de ETR normal mensual se obtuvo como el promedio de los valores mensuales de ETR durante el periodo 1936-1945.

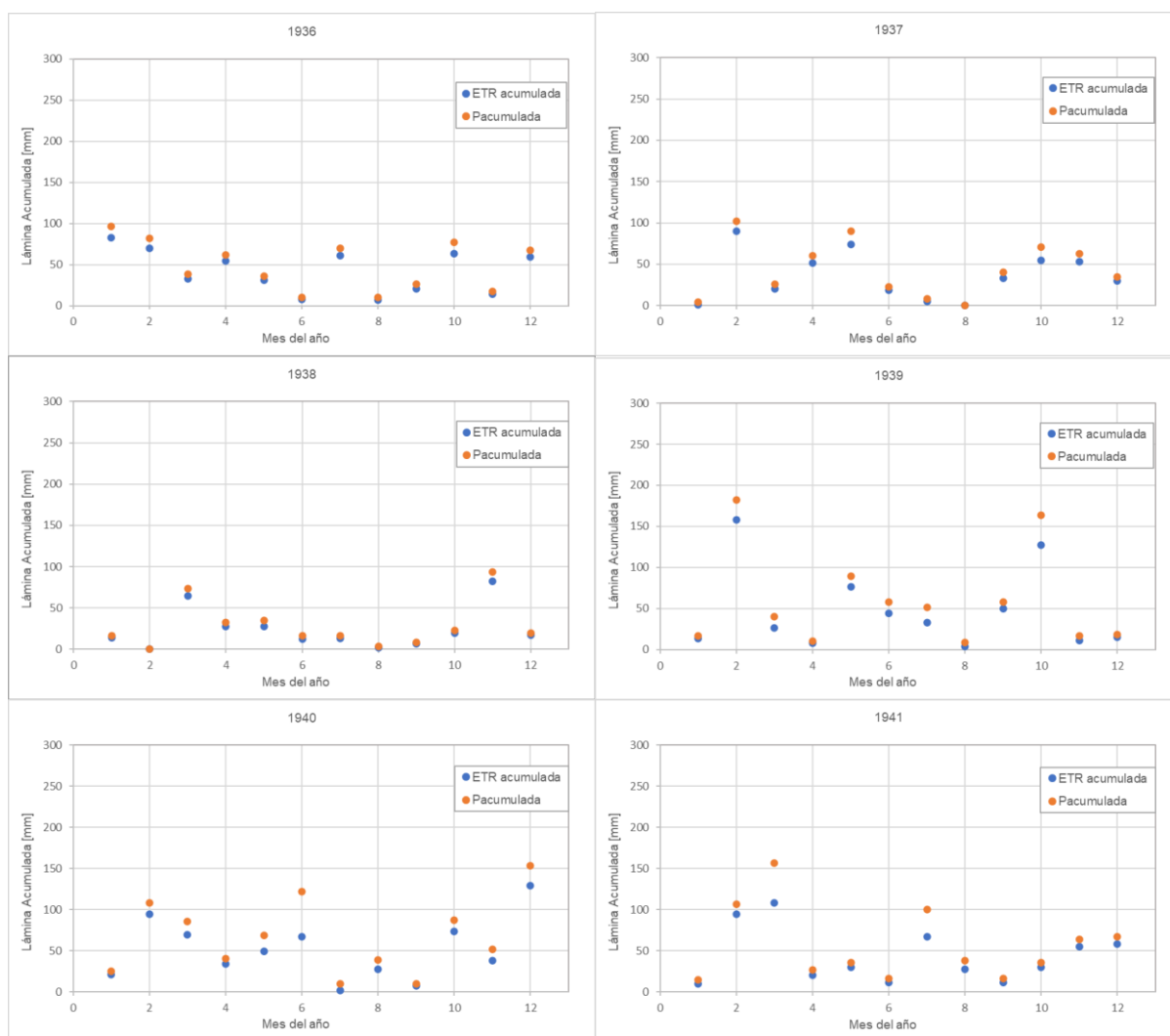
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 4 se reportan los valores de ETR obtenidos a través del método de balance hídrico y la lámina mensual acumulada precipitada correspondiente, para cada año del registro disponible. En general, se observa una marcada correlación entre los valores medidos de P y los valores calculados de ETR, advirtiendo una tendencia general que indica que una parte muy significativa de la precipitación se convierte en ETR. Para evaluarla, en la gráfica de la Figura 5 se reporta, para cada valor de lámina precipitada acumulada

mensual (eje de las abscisas), la diferencia P-ETR (eje de las ordenadas). En esta representación se observa que a medida que la precipitación mensual acumulada aumenta, la diferencia P-ETR también lo hace.

Mediante un análisis de regresión lineal simple se obtuvo la Ecuación 2, que permite establecer una relación funcional entre P y P-ETR ($N = 120$, $R^2 = 0,824$). Si bien la misma resulta espúrea, el análisis, de carácter exploratorio, permitirá detectar las causalidades y el comportamiento de dichas diferencias.

$$P - ETR = 0,2236 P \quad (2)$$



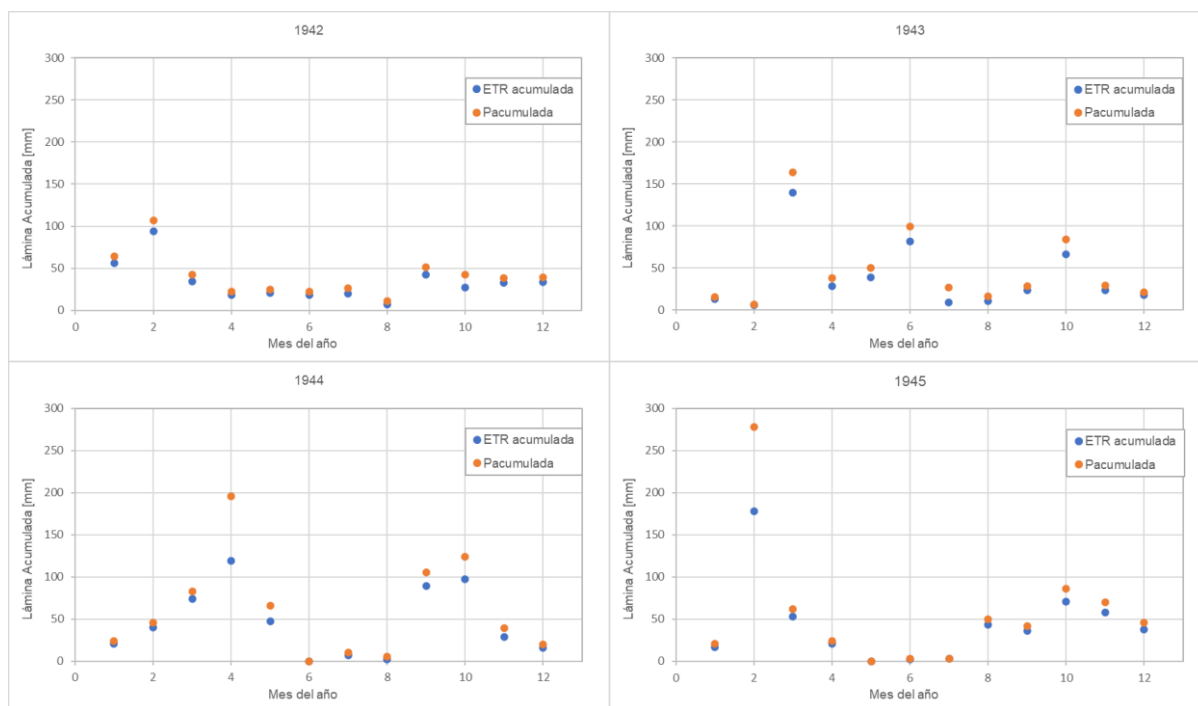


Figura 4. Lámina mensual acumulada en la zona de estudio para el periodo 1936-1945.

La recta de correlación se representa en la Figura 5 como una línea continua de color negro. Las líneas continuas de color verde, indican los intervalos de predicción del 95% de confiabilidad. Las determinaciones que superan la banda de predicción superior corresponden a los registros de jun-1940, abr-1944 y feb-1945 con caudales superficiales máximos aforados de 20,4, 65,6 y 62,7 m³/s, respectivamente. Estos puntos muestran los mayores valores de lámina escurrida mensual acumulada: 42,7, 57,8 y 72,3 mm, respectivamente, indicando la relevancia de los eventos de crecidas importantes en la subcuenca que, potenciados por la pendiente topográfica, reducen de forma significativa la cuantía de la ETR a causa de la alta velocidad de los escurrimientos.

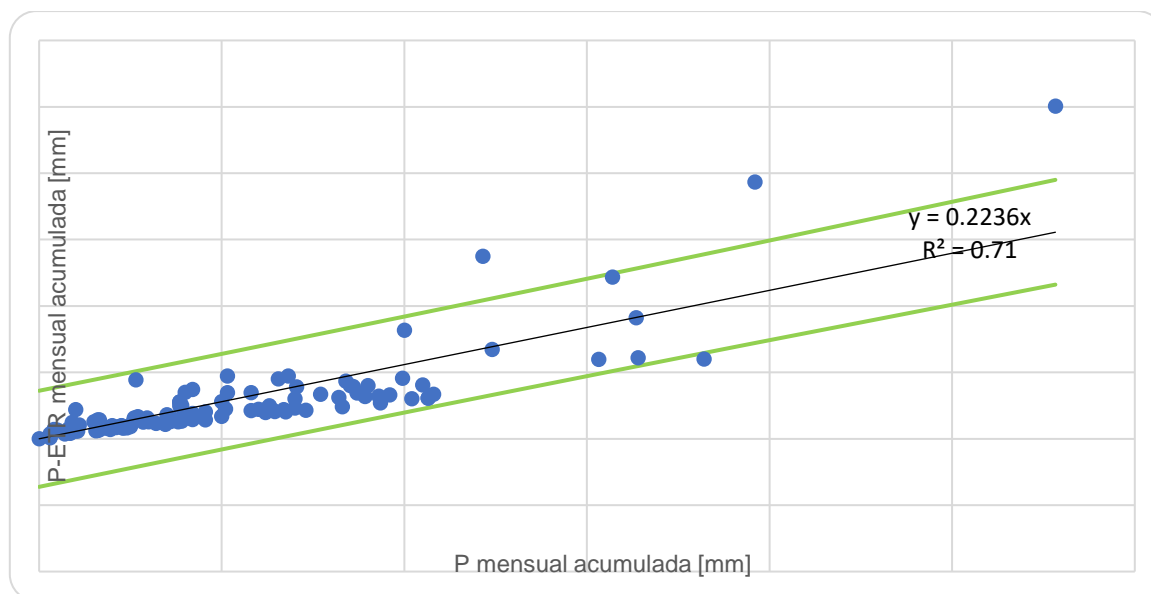


Figura 5. Correlación observada entre P y P-ETR mensual para el periodo estudiado y bandas de predicción del 95%.

En la Figura 6, los puntos de color rojo indican cada uno de los valores de lámina de ETR acumulada mensual durante el período de registro (1936-1945). Las cruces de color negro, por su parte, representan la ETR normal obtenida como promedio de los valores acumulados mensuales. Se incluye, además, en forma de líneas verticales, el desvío estándar de las muestras respecto a la ETR normal. Los resultados muestran para la ETR normal una tendencia de variación a lo largo del año en correspondencia con el régimen de variación de las precipitaciones: valores mayores para los meses entre octubre y marzo, y una disminución para la temporada otoño-invierno entre los meses de abril y septiembre. La mayor dispersión en la obtención ETR normal en el periodo estudiado se obtuvo para los meses de febrero y marzo, en coincidencia con los mayores valores acumulados de P mensuales registrados y ETR mensuales calculados. En ambos meses, la cantidad de eventos de precipitación de varios días de duración está entre 7 y 12, ocurridos con intervalos de no más de 5 días entre ellos, y con P media diaria en dichos intervalos de entre 3 y 60 mm y entre 4 y 20 mm, para febrero y marzo, respectivamente.

En el mes de octubre, si bien los valores acumulados de P mensuales registrados y ETR mensuales calculados resultan similares a marzo, la dispersión es menor. Esto puede deberse a la mayor cantidad de eventos de precipitación con duración de más de dos días o

a estados de humedad antecedente tipo III según la clasificación de NCRS (2004), con P media diaria en dichos intervalos entre 5 y 18 mm.

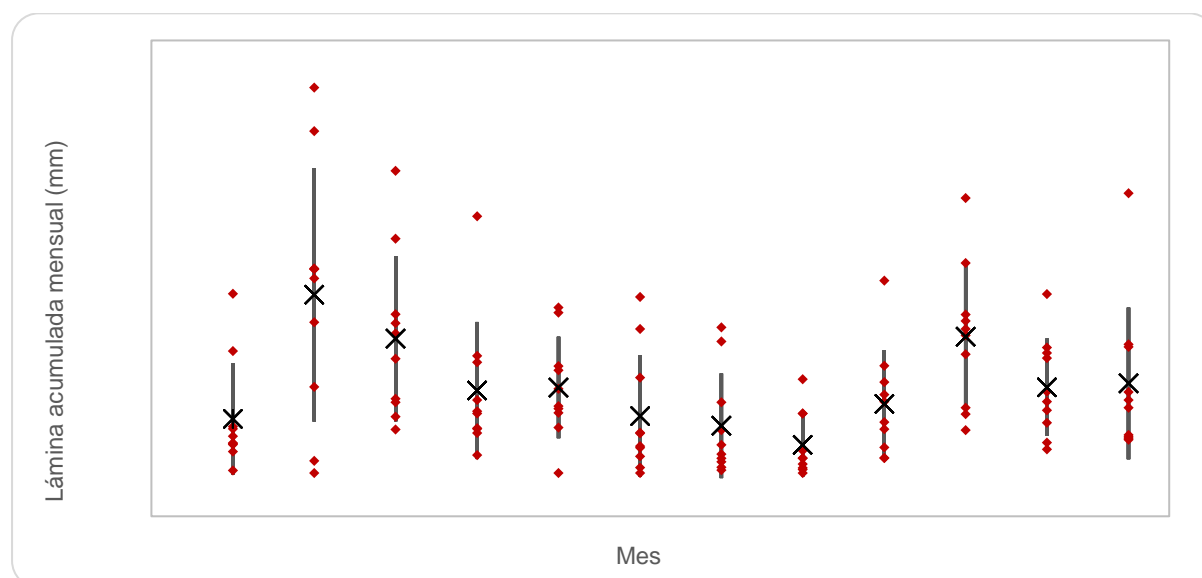


Figura 6. ETR normal y P acumulada mensual promedio para el periodo analizado y desvíos standard para cada mes.

La menor dispersión en la obtención de la ETR normal se obtuvo en los meses de agosto y noviembre. Ambos meses muestran entre 2 y 7 eventos mensuales de precipitaciones (Tabla 1) de varios días ocurridos en intervalos de no más de 5 días entre ellos, con P media diaria en dichos intervalos entre 11 y 13 mm y entre 2 y 9 mm, para agosto y noviembre, respectivamente.

La ETR normal representa entre el 68 y el 85% de P acumulada mensual promedio para el periodo 1936-1945, con un valor medio de 78%. Respecto a porcentajes anuales, se obtiene ETR entre 75 y 85% de P anual acumulada, con un valor promedio de 80%; siendo el intervalo más reducido respecto al obtenido por Carrica & Lexow (2004) (79% en promedio). Mediante la aplicación de la fórmula de Coutagne, Carrica (1998) obtuvo el mismo porcentaje de valor promedio (79%), mientras que con la expresión de Turc obtuvo valores más elevados anuales, con un promedio del 83%.

Tabla 1. Eventos mensuales y precipitaciones medias diarias.

Mes	Cantidad de eventos de duración		P máxima diaria	P media diaria (mm)		ΔPm diaria
	Un día	Varios días	(mm)	Mínima	Máxima	(mm)
Enero	0	1	10.5	10.5	10.5	0.0
Febrero	0	12	60.3	3.7	60.3	56.6
Marzo	2	7	35.0	4.1	17.0	12.9
Abril	0	4	49.0	7.1	49.0	41.9
Mayo	0	7	15.5	6.0	15.5	9.5
Junio	3	1	82.0	4.0	4.0	0.0
Julio	2	1	100.0	11.7	11.7	0.0
Agosto	1	2	38.5	11.2	12.7	1.5
Septiembre	1	4	58.0	5.3	23.0	17.8
Octubre	2	10	52.0	3.5	30.0	26.5
Noviembre	0	7	8.7	2.4	8.7	6.3
Diciembre	1	5	49.0	5.2	11.2	6.0

La definición del porcentaje que representa la componente de interceptación vegetal respecto al total de agua precipitada resulta útil para la calibración y validación de modelos hidrológicos, como expresa López-Lambraño et al. (2017), e incide en mayor medida en el balance hídrico en función del uso del suelo, extensión y tipo de cobertura vegetal. Las limitaciones en el desarrollo de los suelos han definido históricamente el uso de los suelos en la cuenca superior, no detectándose cambios significativos en la superficie sembrada o en el tipo de cultivos sembrados. Este efecto puede conformar otra de las causas del aumento de dispersión observada en la Figura 5 para los valores mayores de lámina precipitada mensual. La aplicación de riego adicional a partir del aprovechamiento del agua tanto subterránea como superficial, si bien ya ha sido observado en algunas campañas de muestreo en zonas puntuales de la cuenca superior, podría llegar a desarrollarse en forma sostenida siempre que a partir de la evaluación de las variables hidrometeorológicas de la zona y su evolución temporal se recomiende su aptitud. Esto resultaría en un potenciamiento del aprovechamiento integral del recurso hídrico con amplios beneficios socio-económicos para la región, y permitiría fortalecer y consolidar el interés de los distintos actores de la cuenca en el desarrollo de redes de monitoreo y registro continuo de las variables hidrológicas que deriven en la materialización de planes oficiales de gestión hídrica para la cuenca.

La componente que mayor error podría aportar al cálculo del balance hídrico, debido a su variabilidad espacio-temporal y a las posibles dificultades de acceso y mantenimiento del equipo requerido, es la precipitación (Dulal et al., 2007; Flerchinger & Cooley, 2000). Esto sugiere que la utilización de los datos provenientes de un único pluviómetro podría introducir errores de estimación de los distintos componentes del balance hídrico, incluyendo ETR.

CONCLUSIONES

En la presente investigación se desarrolló un estudio de balance hídrico en la subcuenca superior del arroyo Napostá Grande. En particular, se aplicó el método de balance para el cálculo de la ETR a partir de registros históricos de precipitación y escorrentía superficial. En ausencia de registros de campo, y de acuerdo a los datos bibliográficos disponibles para cuencas de características similares a la estudiada, se definió a la interceptación vegetal como un porcentaje apropiado de la precipitación. El cambio en el almacenamiento y el caudal de infiltración que sale de la cuenca hidrográfica se consideraron despreciables. El estudio permitió identificar una tendencia de correlación general que sugiere para la cuenca en estudio, que la ETR mensual representa un gran porcentaje de la lámina precipitada. Para los valores superiores de precipitación registrados, sin embargo, esta tendencia presenta mayor variabilidad. En efecto, el porcentaje de precipitación que se convierte en ETR resulta menor para valores extraordinarios de precipitación mensual acumulada. A criterio de los autores, la gran pendiente topográfica característica de la subcuenca provoca una rápida evacuación de las crecidas generadas por las lluvias de mayor magnitud, reduciendo así el tiempo de permanencia del líquido en la cuenca y por lo tanto también la ETR. Estos eventos de grandes láminas precipitadas, además, ocurren en general en períodos de varios días de duración, lo que genera un aumento en el contenido de humedad antecedente que también promueve la escorrentía superficial en detrimento de la ETR. Además, la ETR normal mensual resultó entre el 68 y el 85% de la precipitación acumulada mensual promedio para el periodo de datos disponible, con un valor medio de 78%. Este valor se corresponde aceptablemente con el obtenido por otros investigadores a través de una metodología distinta, para la misma subcuenca. La gráfica de ETR normal obtenida resulta aceptable para la estimación de evapotranspiración mensual en periodos de 10 años o más de registros en la subcuenca de estudio, recomendándose su uso en principio para la comparación de la evapotranspiración normal respecto a otros ciclos hídrico-hidrológicos.

Dado que desde 1945 a la fecha no se ha instalado equipamiento para el registro de variables meteorológicas o altura de pelo de agua en el cauce, ni se han llevado a cabo aforos de caudal de escurrimiento, y hasta tanto no se logre su implementación, los cálculos de ETR para otros lapsos temporales deberían efectuarse a partir de registros pluviométricos que pudieran obtenerse en algunas estancias privadas ubicadas en la subcuenca en los últimos 10 años. Las gráficas de ETR normal que surgieren del análisis de dichos registros permitirían conformar series representativas de la evolución de ETR en distintos ciclos hídricos-hidrológicos.

Ante el sostenido crecimiento de la demanda de agua, tanto para consumo humano como para el desarrollo productivo agrícola e industrial en la cuenca del Arroyo Napostá Grande, es imperativa la instalación, por un lado, de una red de pluviómetros ubicados en sectores representativos de la cuenca superior, que permita efectuar la ponderación de las precipitaciones; y por otro, la disposición de un limnómetro en el cierre de la cuenca superior, que contribuya al monitoreo continuo del escurrimiento superficial. Esas herramientas serán valiosas para la tarea de registro de variables hidrológicas relevantes. Además, en combinación con investigaciones elaboradas en base a datos históricos disponibles, como la que se realiza en este trabajo, contribuirán a detectar variaciones climáticas que afecten el balance hídrico, pudiendo abordar en consecuencia acciones destinadas a controlar sus efectos en beneficio de la preservación del recurso.

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 Históricos”, dirigido por la Mg. Ing. Natalia C. López.

REFERENCIAS

- Carlyle-Moses, D. E. (2004). Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. *Journal of Arid Environments*, 58(2): 181-202.
- Carrica, J. C. (1998). *Hidrogeología de la cuenca del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires*. Tesis Doctoral en Geología. Universidad Nacional del Sur.

- Carrica, J. C. & Lexow, C. (2004). 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* 59(2): 281-290.
- Corredor Rivera, J. L. & Peñaranda Vélez, V. M. (2012). Identificación de los parámetros del modelo del número de curva y su incertidumbre mensual en la cuenca alta del río Bogotá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* 22(1): 75 – 93.
- Dulal, K.N., Takeuchi, K. & Ishidaira, H. (2007). Evaluation of the influence of uncertainty in rainfall and discharge. *Journal of Hydraulic Engineering* 51: 31–36.
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO: Riego y Drenaje N° 56.
- Flerchinger, G.N. & Cooley, K.R. (2000). A ten-year water balance of a mountainous semi-arid watershed. *Journal of Hydrology* 237: 86–99
- Gaspari, F. J. & Bruno, J. E. (2003). Diagnóstico de la degradación ambiental por erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napostá Grande. *Ecología Austral* 13: 109-120.
- Gaspari, F., Bruno, J., Rickfelder, R., Sauri, B., Cornely, I., Oroná, C. & Leonart, M. (2006). *Manejo integral de cuencas hidrográficas serranas del Partido de Tornquist. Estudio de prefactibilidad*. Universidad Nacional de La Plata. 1ª ed. La Plata, Argentina.
- Horton, E. R. (1919). Rainfall Interception. *Monthly Weather Review*, 47: 603-623. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1919\)47<603:RI>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1919)47<603:RI>2.0.CO;2)
- Köeppen, W. (1948). *Climatología, con un estudio de los climas de la tierra*. México: Fondo de Cultura Económica.
- López-Lambrano, A. A. (2007). *Intercepción de la vegetación herbácea de ambiente semiárido y su efecto en la relación intensidad-duración-frecuencia de la precipitación*. Tesis de maestría. Querétaro. Universidad Autónoma de Querétaro. 173 p.
- López-Lambrano, A. A., Fuentes, C., González-Sosa, E. & López-Ramos, A. A. (2017). Pérdidas por intercepción de la vegetación y su efecto en la relación intensidad, duración y frecuencia (IDF) de la lluvia en una cuenca semiárida. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VIII, núm. 4, pp. 37-56. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-03>.
- Monsalve-Sáenz, G. (1999). *Hidrología en ingeniería*. Ed. Alfaomega. 2º Edición. Bogotá, Colombia. 382 p.

- MOP, UNS & CIC (1990). *Plan Integral de Abastecimiento de Agua a Bahía Blanca y Gran Bahía Blanca: Síntesis de los estudios de prefactibilidad*. Convenio MOP, UNS y CIC. Bahía Blanca, Argentina.
- NRCS. 2004. *National Engineering Handbook, Part 630: Hydrology*. Chapter 10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall (210-VI-NEH).
- Rosenberg, N.J., Blad, B.L. & Verma, S.B. (1983). *Microclimate: The Biological Environment*. Ed. Wiley. New York. 495 p.
- Ulloa, A. S., Rivera, S. & Barbier, B. (2001). Intercepción de la lluvia por cuatro tipos de cobertura vegetal, en la cuenca del río Jalapa, Yorito, departamento de Yoro, Honduras. Ed. *Escuela Nacional de Ciencias Forestales. Tatascan, Honduras*. Vol. 13 (2