

Pérdidas por intercepción de la vegetación y su efecto en la relación intensidad, duración y frecuencia (IDF) de la lluvia en una cuenca semiárida

• Alvaro Alberto López-Lambraño* •
Universidad Autónoma de Baja California, México
Hidrus S.A de C.V., México

*Autor para correspondencia

• Carlos Fuentes •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• Enrique González-Sosa •
Universidad Autónoma de Querétaro, México

• Alvaro Alberto López-Ramos •
Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

DOI: 10.24850/j-tyca-2017-04-03

Resumen

López-Lambraño, A. A., Fuentes, C., González-Sosa, E., & López-Ramos, A. A. (julio-agosto, 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*, 8(4), 37-56.

Se cuantifica el componente hidrológico de la intercepción en vegetación semiárida y se evalúa el efecto en la relación intensidad-duración-frecuencia de la precipitación. La intercepción se determina mediante la simulación de lluvias a diferentes intensidades sobre muestras con cubierta vegetal herbácea; se obtienen los componentes del balance hidrológico, como lámina precipitada, lámina escurrida, lámina almacenada en un espesor de suelo a un contenido de humedad inicial dado y lámina drenada. A partir de precipitaciones máximas, en 24 horas se obtienen las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) de la precipitación para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, estableciendo cuatro escenarios con diferentes cubiertas vegetales para evaluar el efecto del componente de la intercepción en dichas curvas. De las simulaciones de lluvia que se realizan, se encuentra que el porcentaje interceptado en vegetación herbácea tiene un valor promedio de 2.33% del total de la precipitación incidente. Las curvas IDF son afectadas en un 2.89% para el escenario que se conforma sólo por cubierta vegetal herbácea; para el escenario con cubierta vegetal arbórea se tiene un efecto de 11.15%, y un 19.85% para el escenario que se conforma por vegetación herbácea y arbórea. Lo anterior da origen a que los caudales de diseño o volúmenes de escurrimiento directo en una cuenca disminuyan de manera significativa.

Palabras clave: pérdidas por intercepción, modelación hidrológica, balance hídrico, simulación de lluvias.

Abstract

López-Lambraño, A. A., Fuentes, C., González-Sosa, E., & López-Ramos, A. A. (July-August, 2017). Rainfall-interception loss-runoff relationships in a semi-arid catchment. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 8(4), 37-56.

This study has been developed on a semi-arid catchment located in Mexico; the objective of this research is to measure rainfall interception, and to evaluate the effect of interception in Intensity, Duration, Frequency curves. The rainfall interception was determined from rainfall simulation at several intensity levels on grass vegetation coverage samples taken from experimental zone, where income precipitation, runoff, change in soil water storage and soil drainage were measured, with these, water balance for events of simulated rainfall on vegetation coverage were performed. From maximum rainfall in 24 hours intensity-duration-frequency relationships of rainfall for return period of 2, 5, 10, 25, 50 and 100 years is obtained, evaluating the interception effect on those curves when establishing four sceneries of different coverage. From the rainfall simulations performed it was stated that the intercepted percentage on grass vegetation had an average of 2.33% of the totality of income. IDF curves were affected on approximately 2.89% on the scenery that consists of just grass vegetation coverage; on the scenery that consists of tree vegetation coverage, the effect was 11.15% and 19.85% on the scenery that consists of tree and grass vegetation coverage. Due to the above mentioned, the runoff in a basin decrease significantly.

Keywords: Interception loss, hydrological modeling, water balance, rainfall simulation.

Recibido: 07/03/2016
Aceptado: 16/03/2017

Introducción

La lluvia es un factor importante que regula el crecimiento de la vegetación y ésta, a su vez, es un elemento que determina la composición de la lluvia neta que llega a la superficie terrestre; por lo tanto, la diferencia entre los escurrimientos superficiales y la precipitación está sujeta a la capacidad de intercepción de la vegetación y las pérdidas por evaporación de la lluvia interceptada o retenida.

La intercepción se define como la cantidad de agua retenida por las hojas, ramas y troncos, al igual que por la cantidad de agua retenida por los residuos vegetales sobre la superficie del suelo (Savenije, 2004; Groen & Savenije, 2006; Gerrits, Savenije, Hoffmann, & Pfister, 2006). Esta cantidad se evapora de nuevo a la atmósfera, formando parte, junto con la cantidad de agua evaporada por el suelo y transpirada por las plantas, de la cantidad total que regresa a la atmósfera (Chow, Maidment, & Mays, 1998; Belmonte-Serrato, 1997; Tucci, 2001).

La cantidad y dinámica del proceso de intercepción depende de las características y estructura de la vegetación, y de algunas particularidades de la lluvia, entre ellas: intensidad, duración, forma, dirección, ángulo y distribución del tamaño de la gota; así como de otras variables meteorológicas: temperatura y velocidad del viento (Schowalter, 1999; Crockford & Richardson, 2000; Schellekens, Bruijnzeel, Scatena, Bink, & Holwerda, 2000; Komatsu, Shinohara, Kume, & Otsuki, 2008; Wani & Manhas, 2012; Frasson & Krajewski, 2013).

En un sistema hidrológico, la cantidad de agua interceptada puede ser considerada pérdida o ganancia del recurso, que en la ecuación general de balance hídrico podría tomar signo positivo o negativo, según sea el escenario planteado. En el caso de ser negativa, el agua retenida en la cubierta vegetal se evapora por efecto del viento y la temperatura, y se considera como una pérdida debido a que es resultado de la sustracción de las precipitaciones registradas en los pluviómetros (Navarro, Martínez de Azagra, & Mongil, 2009). Si el agua interceptada procede

de la humedad del aire o de la condensación, la intercepción representa un incremento o ganancia del recurso.

Es importante señalar que la mayor parte de los estudios relacionados con la intercepción se han desarrollado en bosques en zonas de clima frío, templado y tropical (Rodrigo & Ávila, 2001; Loescher, Power, & Oberbauer, 2002; Raat, Draaijers, Schaap, Tietema, & D Verstraten, 2002; Gerrits *et al.*, 2006; Dohnal, Cerny, Votrubova, & Tesar, 2014), mientras que han sido escasos en ambientes semiáridos y áridos debido a la dificultad de aplicar las metodologías para cuantificar el fenómeno en especies arbustivas y herbáceas; estas dificultades han justificado el uso de simuladores de lluvia bajo condiciones controladas para estimar la cantidad de agua interceptada en ambientes áridos y semiáridos (Belmonte-Serrato, 1997; Belmonte-Serrato & Romero-Díaz, 1998; Carlyle-Moses, 2004; García-Estrínaga, Blazquez, & Alegre, 2006; Shachnovich, Berliner, & Bar, 2008; Love, Uhlenbrook, Corzo-Perez, Twomlow, & Van Der Zaarg, 2010).

Las pérdidas por intercepción pueden alcanzar valores importantes a nivel de cuenca hidrográfica (Shuttleworth & Calder, 1979; Schellekens *et al.*, 2000), al igual que en diversas coberturas arbóreas (Vernimmen, Bruijnzeel, Romdoni, & Proctor, 2007; Shachnovich *et al.*, 2008; Xiao & McPherson, 2011; Dohnal *et al.*, 2014; He, Yang, Zhao, Liu, & Chang, 2014). En bosques de coníferas, que están entre las formaciones vegetales con mayor capacidad de intercepción, se han determinado pérdidas de entre 21 y 48% de la precipitación media anual (Carlyle-Moses, 2004).

A partir del contenido de humedad retenida se ha podido cuantificar el porcentaje de intercepción en residuos vegetales (mulch), los cuales son producto de la senescencia natural; según Helvey (1964), retienen un 3% de la precipitación anual. Putuhena y Cordery (1996) reportan láminas de lluvia interceptada en el orden de los 2.8 mm para residuos vegetales correspondientes a pinos y 1.7 mm para residuos de eucaliptos.

En regiones áridas y semiáridas, en donde la cobertura vegetal predominante corresponde a vegetación arbustiva, se reporta en un amplio rango, que comprende valores de intercepción desde 2.5 hasta 56% de la lluvia total registrada (Samba, Camire, & Margolis, 2001; Fang et al., 2008; Navar, 2013; Ringgard, Herbst, & Friborg, 2014; Sadeghi, Attarod, & Abbasian, 2014; Sadeghi, Attarod, Grant-Pypker, & Dunkerley, 2014; Sadeghi, Attarod, Van Stan, Grant, & Dunkerley, 2015); para vegetación herbácea o matorrales se reportan rangos de 3 a 10.9% del total de la lluvia (Carlyle-Moses, 2004; López-Lambrano, 2007).

La estimación de hietogramas e hidrogramas en cuencas hidrográficas se confronta por lo general al problema de la falta de información debido a que no se cuenta con suficientes estaciones meteorológicas e hidrométricas. En la elaboración y planeación de proyectos de infraestructura hidráulica y rural, para aminorar la problemática mencionada, se utilizan diferentes métodos más o menos empíricos para que a partir de información escasa se estimen los hietogramas e hidrogramas, entre los cuales destacan las relaciones intensidad-duración-frecuencia (IDF) de la precipitación y el número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, 1972). Sin embargo, la precipitación considerada en los métodos mencionados no es afectada por la intercepción, lo cual puede resultar en un sobredimensionamiento de la infraestructura hidráulica o incertidumbre en el balance hídrico de una cuenca. Ésta es una de las razones por las cuales es importante evidenciar el efecto de la intercepción en las curvas intensidad-duración-frecuencia de la precipitación y su posterior empleo para la estimación de los escurrimientos directos en una zona o cuenca hidrográfica. De manera adicional, se puede comentar que no existen antecedentes en la literatura que relacionen las pérdidas por intercepción en vegetación con la relación intensidad, duración y frecuencia de la precipitación y su efecto.

Finalmente, este trabajo explica el método para estimar la intercepción de la precipitación

por la vegetación herbácea utilizando el método de simulación de lluvias en una región semiárida y su efecto en las curvas intensidad-duración-frecuencia; posteriormente se presenta una aplicación de dicho efecto a escala global, tomando como escenario la cuenca Peña Colorado ubicada en el estado de Querétaro, México.

Teoría

El estudio sistemático sobre la intercepción comienza con Horton (1919), quien separa la evaporación del suelo de la evaporación —una vez finalizado el evento— del agua almacenada por la saturación de la superficie arbórea. El autor expresa el componente de la intercepción (EI) de la siguiente manera (ver también Gash, 1979; Belmonte-Serrato, 1997; Belmonte-Serrato & Romero-Díaz, 1998):

$$EI = \int_0^{t_T} E dt + S \quad (1)$$

donde E es la evaporación del agua interceptada durante la lluvia; S , la capacidad de almacenaje; t , el tiempo, y t_T es la duración del evento de precipitación. La ecuación no contempla la evaporación desde la superficie de los troncos.

A partir de los planteamientos de Horton (1919) se han desarrollado modelos físicos y analíticos para el estudio y modelación del proceso de intercepción, partiendo de la hipótesis de que la vegetación funciona como un reservorio (Rutter, Kershaw, Robins, & Morton, 1971; Gash, 1979), y otros modelos numéricos y estocásticos (Mulder, 1985; Calder, 1990; Keim, Skaugset, Link, & Iroume, 2004). La vegetación arbórea, herbácea y los residuos vegetales producto de la senescencia natural se consideran como un reservorio de agua, el cual es llenado por la lluvia, y vaciado por la evaporación y drenaje.

La lámina interceptada (EI) durante el evento de lluvia se estima mediante un balance de masa, considerando que la evaporación es despreciable durante el evento. La ecuación resultante es:

$$EI = P - (\Delta S + R + D) \quad (2)$$

donde P es la lámina precipitada; R , la lámina escurrida; ΔS , la lámina almacenada en un espesor de suelo a un contenido de humedad inicial dado, y D es la lámina percolada a sustratos inferiores de suelo o la lámina drenada a la atmósfera por un sustrato de suelo en condiciones controladas.

El análisis de la precipitación en una región requiere de su distribución probabilística a lo largo del tiempo. En especial, se ha argumentado que la precipitación máxima es satisfactoriamente bien descrita por una distribución de Gumbel (Villón-Béjar, 2006). La función de distribución acumulada es la siguiente:

$$F(x) = \exp\left[e^{-\alpha(x-\mu)}\right]; \quad -\infty < x < \infty \quad (3)$$

donde $0 < \alpha < \infty$ es el parámetro de escala; $-\infty < \mu < \infty$ es el parámetro de posición o valor central. La derivada de la distribución proporciona la función de distribución de las probabilidades o función densidad.

En cuanto a las curvas de intensidad-duración-frecuencia es bastante común el uso de la metodología propuesta por Chen (1983) (Campos & Gómez, 1990; Aparicio, 2008). En ésta, la lluvia con duración de una hora y un periodo de retorno de dos años o más se puede evaluar con una relación a la de 24 horas con igual periodo de retorno, denominada cociente lluvia/duración (R). Este cociente se calcula con la fórmula:

$$R = \frac{P_1^{Tr}}{P_{24}^{Tr}} \quad (4)$$

donde P_1^{Tr} y P_{24}^{Tr} corresponden, respectivamente, a la lluvia de una hora y 24 horas con periodo de retorno (Tr) de dos o más años.

La metodología requiere también del cálculo del cociente lluvia/periodo de retorno (X):

$$X = \frac{P_t^{100}}{P_t^{10}} \quad (5)$$

siendo P_t^{100} y P_t^{10} la lluvia de 24 horas y periodo de retorno de 100 años y 10 años, respectivamente.

La ecuación de Chen para estimar la lluvia a diferentes duraciones (t) y periodos de retorno (Tr) es:

$$P_t^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-X} Tr^{X-1}) t}{60(t+b)^c} \quad (6)$$

donde P_1^{10} es la lluvia de duración de una hora y periodo de retorno de 10 años, en milímetros; (a), (b) y (c) son parámetros regionales que dependen del cociente (R).

Materiales y métodos

Para la evaluación de la cantidad de agua interceptada por la vegetación herbácea se seleccionó una región semiárida limítrofe de los estados de Guanajuato y Querétaro, la cual cuenta con la estación climatológica del Centro Experimental Norte de Guanajuato (Cengua) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP). La altitud media es de aproximadamente 2 000 msnm, con una temperatura media anual de 16.7 °C y máxima de 38 °C, y una precipitación media anual de 550 mm. La flora característica es el matorral, donde se observan individuos arbóreos como capulín (*Prunus serotina*), mezquite (*Prosopis spp.*), pirul (*Schinus molle*) y algunos arbustos como huizache (*Acacia spp.*), tullidora (*Karwinskia humboldtiana*) y granjeno (*Celtis pallida*).

Cuantificación de la intercepción en vegetación herbácea

Para cuantificar la lámina de agua interceptada por la vegetación herbácea se utilizó un simulador de lluvias para suministrar el volumen de agua precipitada o equivalente a la lluvia. Asimismo, se extrajeron muestras representativas de esta cubierta vegetal, integrada por hierbas, pastos, matorrales, residuos vegetales y un sustrato de suelo de textura franco arenoso; las muestras en mención son inalteradas y colocadas en cajas de acero con dimensiones de 40 x 50 cm, con un espesor de 10 cm (figura 1).

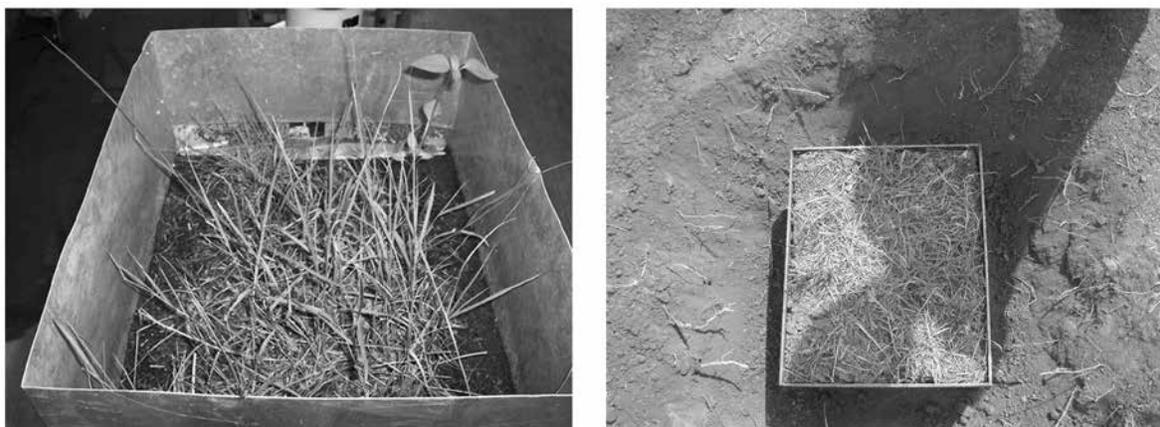


Figura 1. Muestras representativas de cubierta vegetal, integradas por hierbas, pastos, matorrales, residuos vegetales.

Para estimar el volumen interceptado por la vegetación herbácea vía el balance hidrológico, es necesario medir los diferentes componentes del mismo; la precipitación simulada es medida mediante pluviómetros digitales, los cuales se situaron entre las cajas que contenían las muestras de vegetación y para poder verificar que la intensidad simulada fuera aproximadamente igual a la de la región en estudio, la cual se encuentra en un rango de 30 a 50 mm/h; las simulaciones se hicieron en un periodo de una hora.

Cada caja cuenta con un vertedor para cuantificar el escurrimiento superficial o volumen escurrido; de igual forma, se requiere cuantificar el volumen de agua almacenada en el sustrato de suelo, para separar el volumen interceptado por la vegetación y el absorbido por el suelo. La lámina almacenada en condiciones de saturación se calcula con la fórmula:

$$\Delta S = (\theta_s - \theta_0)P \quad (7)$$

Donde P es el espesor del sustrato, θ_0 y θ_s son los contenidos volumétricos de agua inicial y a saturación, respectivamente. Este último se calcula con $\theta_s = (\rho_t/\rho_w)\omega_s$, donde ρ_w es la densidad del agua, ρ_t es la densidad del suelo seco y ω_s es el contenido gravimétrico a saturación, o también

puede ser estimada a partir de la porosidad total del suelo, calculada con la fórmula clásica $\phi = 1 - \rho_t/\rho_s$, donde ρ_s es la densidad de las partículas, considerada generalmente igual a la densidad de las partículas de cuarzo: $\rho_s = 2.65/\text{cm}^3$.

La base o fondo de cada caja es perforada para captar el volumen drenado durante la simulación de la precipitación; el agua drenada se observa aproximadamente a los 50 minutos, razón por la cual se ha seleccionado una hora como tiempo de simulación de la lluvia para medir el volumen drenado durante unos 10 minutos. Por último, la lámina total interceptada en una hora se estima aplicando la ecuación (2).

Curvas intensidad-duración-frecuencia

Para la obtención de las curvas intensidad-duración-frecuencia es necesario el análisis de la información de la estación climatológica del Cengua. En particular, se considera para el análisis la serie de datos de precipitación máxima mensual en 24 horas para conformar la serie de tiempo de eventos máximos de precipitación para cada año. Después se aplica la distribución de Gumbel, a fin de obtener las precipitaciones máximas correspondientes a los periodos de retorno establecidos, en este caso 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Finalmente, las curvas IDF de la precipitación en la región de estudio se estiman siguiendo la metodología de Cheng (1983) ya expuesta, ecuaciones (4) a (6).

Resultados y discusión

Lámina interceptada (EI)

Se hicieron siete simulaciones de lluvia sobre la vegetación herbácea en cuatro cajas. Para el cálculo de la lámina almacenada, la densidad del suelo seco tiene un valor medio de $\rho_t = 1.38 \text{ g/cm}^3$, lo que proporciona una porosidad total de $\phi = 0.479 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. El contenido volumétrico a saturación medio es $\omega_s = 0.342 \text{ g/g}$ y, en consecuencia, $\theta_s = 0.472 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. La diferencia absoluta de $|\phi - \theta_s| = 0.007 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ indica que al final de los eventos de lluvia el suelo estaba prácticamente saturado; por lo tanto, es

razonable asumir que el contenido volumétrico a saturación es igual a la porosidad total. Los valores del contenido de humedad inicial de cada evento de precipitación se reportan en el cuadro 1, así como la lámina almacenada calculada con la ecuación (7); $P = 100 \text{ mm}$ es el valor del espesor del sustrato.

En el cuadro 2 se reportan las láminas precipitadas en cada evento y en cada caja, al igual que las láminas escurridas y drenadas. Las láminas interceptadas correspondientes, calculadas con la ecuación (2), se reportan en el mismo cuadro.

Modelos lineales de interceptación

La relación entre precipitación e interceptación por la vegetación herbácea, en cada evento de lluvia, y por cada caja se muestra en la figura 2; el modelo lineal arroja altos valores del

Cuadro 1. Contenido volumétrico inicial del agua y almacenamiento.

| Caja 1 | | | Caja 2 | | | Caja 3 | | | Caja 4 | | |
|------------|----------------|------------|------------|----------------|------------|------------|----------------|------------|------------|----------------|------------|
| θ_0 | $\Delta\theta$ | ΔS |
| 0.330 | 0.149 | 14.92 | 0.314 | 0.165 | 16.51 | 0.335 | 0.144 | 14.42 | 0.318 | 0.161 | 16.13 |
| 0.290 | 0.189 | 18.93 | 0.278 | 0.201 | 20.14 | 0.310 | 0.169 | 16.92 | 0.265 | 0.214 | 21.42 |
| 0.394 | 0.085 | 8.52 | 0.381 | 0.099 | 9.87 | 0.380 | 0.099 | 9.92 | 0.349 | 0.130 | 13.01 |
| 0.330 | 0.149 | 14.92 | 0.360 | 0.120 | 11.97 | 0.399 | 0.080 | 8.01 | 0.344 | 0.135 | 13.52 |
| 0.295 | 0.185 | 18.46 | 0.334 | 0.145 | 14.51 | 0.389 | 0.090 | 8.98 | 0.310 | 0.170 | 16.97 |
| 0.260 | 0.220 | 21.97 | 0.259 | 0.220 | 22.02 | 0.270 | 0.210 | 20.97 | 0.269 | 0.210 | 21.02 |
| 0.270 | 0.209 | 20.92 | 0.269 | 0.210 | 21.02 | 0.280 | 0.199 | 19.92 | 0.280 | 0.200 | 19.97 |

* ΔS en milímetros.

Cuadro 2. Componentes del balance hidrológico y cálculo de la interceptación.

| P | Caja 1 | | | | Caja 2 | | | | Caja 3 | | | | Caja 4 | | | |
|-------|--------|-------|------------|------|--------|------|------------|------|--------|-------|------------|------|--------|-------|------------|------|
| | R | D | ΔS | EI | R | D | ΔS | EI | R | D | ΔS | EI | R | D | ΔS | EI |
| 30.00 | 11.92 | 2.88 | 14.92 | 0.28 | 10.93 | 2.30 | 16.51 | 0.26 | 4.02 | 11.18 | 14.42 | 0.38 | 3.28 | 10.18 | 16.13 | 0.41 |
| 31.00 | 8.24 | 3.63 | 18.93 | 0.20 | 6.75 | 3.65 | 20.14 | 0.46 | 3.01 | 10.55 | 16.92 | 0.52 | 3.30 | 5.58 | 21.42 | 0.70 |
| 32.00 | 13.71 | 9.40 | 8.52 | 0.37 | 14.79 | 6.70 | 9.87 | 0.64 | 11.05 | 10.50 | 9.92 | 0.53 | 5.48 | 12.90 | 13.01 | 0.61 |
| 34.00 | 13.00 | 5.59 | 14.92 | 0.49 | 13.49 | 7.90 | 11.97 | 0.64 | 9.90 | 15.35 | 8.01 | 0.74 | 4.99 | 14.78 | 13.52 | 0.71 |
| 36.00 | 5.55 | 11.20 | 18.46 | 0.79 | 12.66 | 8.14 | 14.51 | 0.69 | 11.74 | 14.58 | 8.98 | 0.70 | 8.28 | 10.12 | 16.97 | 0.63 |
| 43.00 | 14.50 | 5.50 | 21.97 | 1.03 | 14.00 | 6.10 | 22.02 | 0.88 | 5.35 | 15.50 | 20.97 | 1.18 | 5.95 | 15.00 | 21.02 | 1.03 |
| 48.00 | 16.00 | 9.85 | 20.92 | 1.23 | 15.75 | 9.80 | 21.02 | 1.43 | 10.74 | 16.00 | 19.92 | 1.34 | 10.60 | 16.00 | 19.97 | 1.43 |

*Unidades en milímetros.

coeficiente de determinación R^2 en el rango de precipitación estudiado (cuadro 3). En la figura 2 se puede apreciar que las líneas de tendencia lineal presentan características similares en tres cajas; en la caja 1, aunque la pendiente es similar a las otras tres, la ordenada al origen es un poco menor debido a que en esta caja la densidad de cubierta herbácea, comparada visualmente con respecto a las otras tres, es ligeramente menor.

Debido a la posible variabilidad espacial de la intercepción de la lluvia por la vegetación herbácea en la región en estudio, y también por la falta de estudios extensivos de este fenómeno, la relación obtenida entre intercepción y precipitación puede utilizarse en el análisis regional de la misma. Este análisis puede ser simplificado si se construye un modelo lineal de regresión entre

intercepción y precipitación en el experimento realizado.

Los valores de intercepción obtenidos en cada caja son promediados en cada uno de los siete eventos de precipitación (cuadro 1). Los valores medios de la intercepción correspondientes a cada evento de precipitación y el modelo de regresión lineal se muestran en la figura 3. La ecuación de la recta es:

$$EI = 0.0522P - 1.1681 \quad (8)$$

Con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9867$, mayor que los correspondientes a los modelos parciales, debido al proceso de suavización de los datos. Es importante aclarar que estas ecuaciones se calculan utilizando los

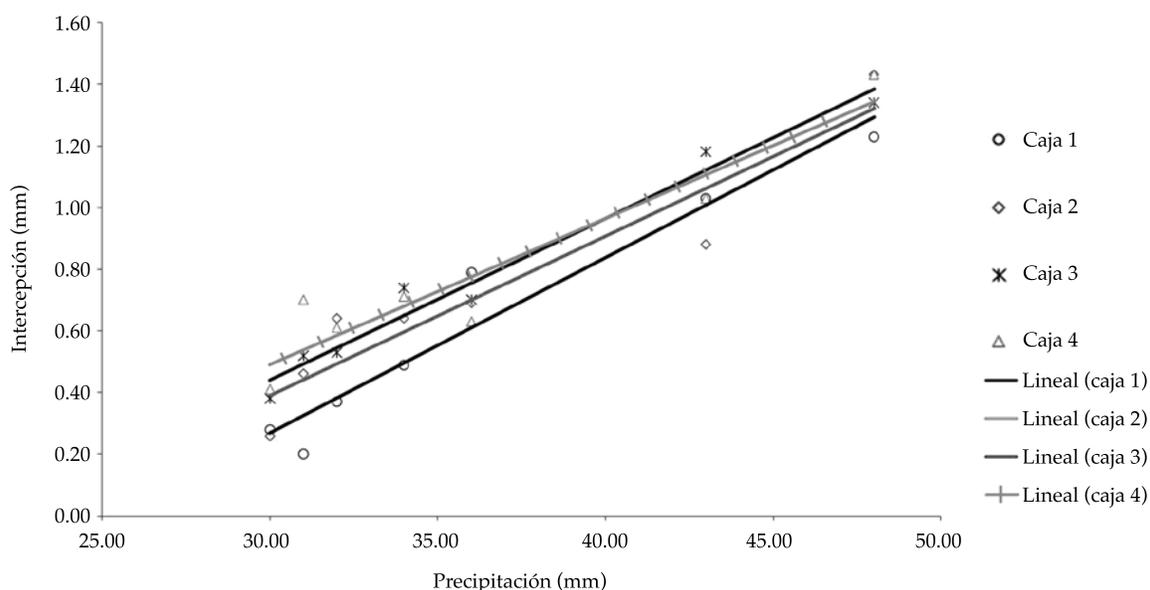


Figura 2. Relación entre la intercepción y la precipitación en los siete eventos de simulación y en cada repetición (cuatro cajas).

Cuadro 3. Ecuaciones para estimar la intercepción en vegetación herbácea.

| Caja | Ecuación | R^2 |
|------|-------------------------|-------|
| 1 | $EI = 0.0564P - 1.4704$ | 0.92 |
| 2 | $EI = 0.0565P - 1.3572$ | 0.94 |
| 3 | $EI = 0.0528P - 1.1968$ | 0.94 |
| 4 | $EI = 0.0495P - 1.0309$ | 0.91 |

valores predominantes de la zona de estudio; por lo tanto, la ecuación propuesta es válida para los valores de precipitación entre 30 y 48 mm. Para predecir los valores de intercepción con el modelo propuesto en la ecuación (8), se recomienda utilizar el rango de precipitaciones antes mencionado, pues las magnitudes pluviales predominantes y las intensidades de los eventos de precipitación máximos en el área estudiada se encuentran en el rango ya mencionado. También se puede notar que la correlación entre precipitación e intercepción es directamente proporcional a (P), y la función por evento establece que la capacidad de almacenamiento de la vegetación herbácea es de 1.16 mm y una intercepción promedio de 5.22%.

Para el análisis del efecto de la intercepción de la cubierta vegetal, herbácea y arbórea sobre la relación IDF de la precipitación, además de la ecuación (8), que relaciona la intercepción de la vegetación herbácea con la precipitación, es necesaria la correspondiente a la intercepción por la vegetación arbórea. La relación obtenida en la región de estudio es la siguiente (Mastachi-Loza, 2007):

$$EI = 0.2005P + 1.2783 \quad (9)$$

Obtención de las curvas IDF y propuesta de escenarios de valoración

Teniendo como base la precipitación máxima observada en 24 horas (cuadro 4), las ecuaciones (8) y (9) se utilizan para estimar la intercepción por la vegetación herbácea (EI_H) y la arbórea (EI_A). Las precipitaciones netas mostradas en el cuadro 4 son calculadas con $P_H = P - EI_H$, $P_A = P - EI_A$ y $P_{H+A} = P - EI_{H+A}$, con $EI_{H+A} = EI_H + EI_A$; también se muestran los porcentajes de intercepción $P_H = (EI_H/P) \times 100$, $P_A = (EI_A/P) \times 100$ y $P_{H+A} = (EI_{H+A}/P) \times 100$; se establecen cuatro escenarios de valoración, en los que se obtienen las curvas IDF a partir de las precipitaciones anteriores; se describen a continuación.

Escenario 1

Las curvas IDF se construyen a partir de la precipitación máxima observada en 24 horas (P), es decir, utilizando el método tradicional.

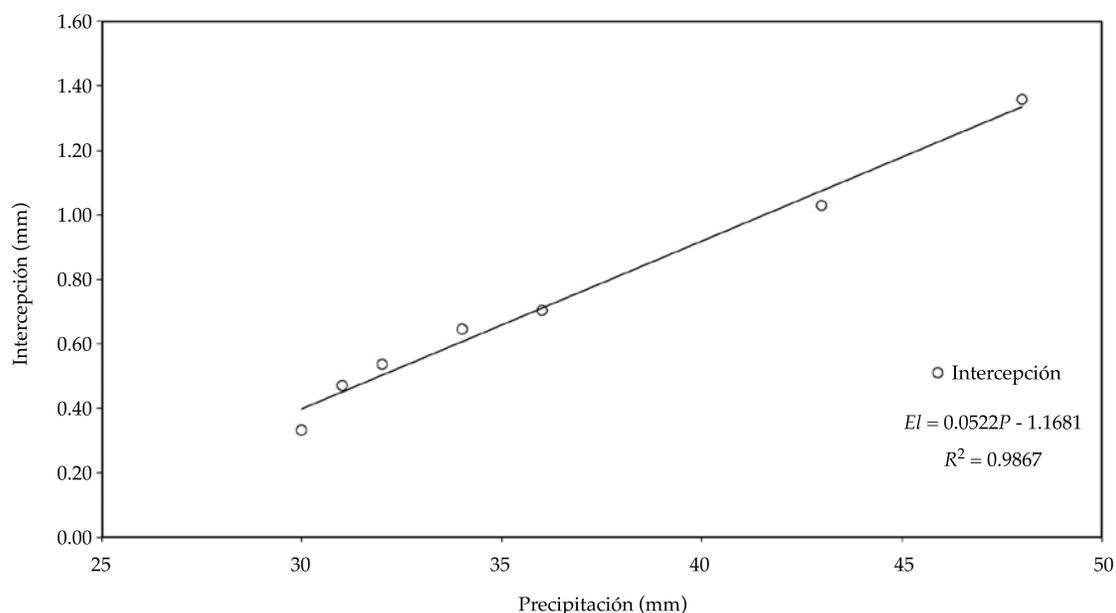


Figura 3. Modelo general del componente de la intercepción en vegetación herbácea.

Cuadro 4. Precipitaciones máximas en 24 horas, precipitaciones netas y porcentajes de intercepción para obtener las curvas IDF.

| Año | Precipitación para las curvas IDF | | | | Porcentajes interceptados por las cubiertas vegetales | | |
|------|-----------------------------------|------------------|-----------------|---------------|---|------------------------|----------------------|
| | P. máxima 24 horas | P. neta herbácea | P. neta arbórea | P. neta H + A | % interceptado herbácea | % interceptado arbórea | % interceptado H + A |
| 1924 | 29.9 | 29.51 | 22.63 | 22.23 | 1.31 | 24.33 | 25.64 |
| 1925 | 44.5 | 43.35 | 34.30 | 33.14 | 2.60 | 22.92 | 25.52 |
| 1926 | 32 | 31.50 | 24.31 | 23.80 | 1.57 | 24.05 | 25.62 |
| 1927 | 35 | 34.34 | 26.70 | 26.04 | 1.88 | 23.70 | 25.59 |
| 1929 | 32 | 31.50 | 24.31 | 23.80 | 1.57 | 24.05 | 25.62 |
| 1930 | 26 | 25.81 | 19.51 | 19.32 | 0.73 | 24.97 | 25.70 |
| 1931 | 23 | 22.97 | 17.11 | 17.08 | 0.14 | 25.61 | 25.75 |
| 1932 | 78.5 | 75.57 | 61.48 | 58.55 | 3.73 | 21.68 | 25.41 |
| 1933 | 31.5 | 31.02 | 23.91 | 23.43 | 1.51 | 24.11 | 25.62 |
| 1934 | 32 | 31.50 | 24.31 | 23.80 | 1.57 | 24.05 | 25.62 |
| 1935 | 31 | 30.55 | 23.51 | 23.06 | 1.45 | 24.17 | 25.63 |
| 1936 | 28 | 27.71 | 21.11 | 20.81 | 1.05 | 24.62 | 25.66 |
| 1941 | 35.5 | 34.82 | 27.10 | 26.42 | 1.93 | 23.65 | 25.58 |
| 1942 | 98 | 94.05 | 77.07 | 73.12 | 4.03 | 21.36 | 25.38 |
| 1943 | 32 | 31.50 | 24.31 | 23.80 | 1.57 | 24.05 | 25.62 |
| 1944 | 27 | 26.76 | 20.31 | 20.07 | 0.89 | 24.79 | 25.68 |
| 1946 | 47 | 45.71 | 36.30 | 35.01 | 2.73 | 22.77 | 25.51 |
| 1947 | 29.4 | 29.03 | 22.23 | 21.86 | 1.25 | 24.40 | 25.65 |
| 1948 | 47 | 45.71 | 36.30 | 35.01 | 2.73 | 22.77 | 25.51 |
| 1949 | 47.5 | 46.19 | 36.70 | 35.39 | 2.76 | 22.74 | 25.50 |
| 1955 | 79.5 | 76.52 | 62.28 | 59.30 | 3.75 | 21.66 | 25.41 |
| 1956 | 74.9 | 72.16 | 58.60 | 55.86 | 3.66 | 21.76 | 25.42 |
| 1957 | 74.2 | 71.49 | 58.04 | 55.34 | 3.65 | 21.77 | 25.42 |
| 1958 | 42.3 | 41.26 | 32.54 | 31.50 | 2.46 | 23.07 | 25.53 |
| 1959 | 31.8 | 31.31 | 24.15 | 23.65 | 1.55 | 24.07 | 25.62 |
| 1961 | 44.1 | 42.97 | 33.98 | 32.85 | 2.57 | 22.95 | 25.52 |
| 1962 | 25.5 | 25.34 | 19.11 | 18.95 | 0.64 | 25.06 | 25.70 |
| 1963 | 52.5 | 50.93 | 40.69 | 39.12 | 3.00 | 22.49 | 25.48 |
| 1964 | 40.1 | 39.17 | 30.78 | 29.86 | 2.31 | 23.24 | 25.55 |
| 1965 | 33.5 | 32.92 | 25.50 | 24.92 | 1.73 | 23.87 | 25.60 |
| 1966 | 32.5 | 31.97 | 24.71 | 24.18 | 1.63 | 23.98 | 25.61 |
| 1968 | 43 | 41.92 | 33.10 | 32.02 | 2.50 | 23.02 | 25.53 |
| 1970 | 32 | 31.50 | 24.31 | 23.80 | 1.57 | 24.05 | 25.62 |
| 1971 | 23 | 22.97 | 17.11 | 17.08 | 0.14 | 25.61 | 25.75 |
| 1974 | 36 | 35.29 | 27.50 | 26.79 | 1.98 | 23.60 | 25.58 |
| 1975 | 32 | 31.50 | 24.31 | 23.80 | 1.57 | 24.05 | 25.62 |
| 1976 | 60 | 58.04 | 46.69 | 44.73 | 3.27 | 22.18 | 25.45 |
| 1977 | 94.9 | 91.11 | 74.59 | 70.81 | 3.99 | 21.40 | 25.39 |
| 1978 | 60 | 58.04 | 46.69 | 44.73 | 3.27 | 22.18 | 25.45 |
| 1979 | 64 | 61.83 | 49.89 | 47.72 | 3.39 | 22.05 | 25.44 |

Cuadro 4 (continuación). Precipitaciones máximas en 24 horas, precipitaciones netas y porcentajes de intercepción para obtener las curvas IDF.

| Año | Precipitación para las curvas IDF | | | | Porcentajes interceptados por las cubiertas vegetales | | |
|------|-----------------------------------|------------------|-----------------|---------------|---|------------------------|----------------------|
| | P. máxima 24 horas | P. neta herbácea | P. neta arbórea | P. neta H + A | % interceptado herbácea | % interceptado arbórea | % interceptado H + A |
| 1980 | 71 | 68.46 | 55.49 | 52.95 | 3.57 | 21.85 | 25.43 |
| 1981 | 30.6 | 30.17 | 23.19 | 22.76 | 1.40 | 24.23 | 25.63 |
| 1982 | 45 | 43.82 | 34.70 | 33.52 | 2.62 | 22.89 | 25.52 |
| 1983 | 24 | 23.92 | 17.91 | 17.82 | 0.35 | 25.38 | 25.73 |
| 1984 | 37 | 36.24 | 28.30 | 27.54 | 2.06 | 23.51 | 25.57 |
| 1985 | 38.3 | 37.47 | 29.34 | 28.51 | 2.17 | 23.39 | 25.56 |
| 1986 | 33 | 32.45 | 25.10 | 24.55 | 1.68 | 23.92 | 25.61 |
| 1987 | 56.5 | 54.72 | 43.89 | 42.11 | 3.15 | 22.31 | 25.47 |
| 1992 | 46.5 | 45.24 | 35.90 | 34.64 | 2.71 | 22.80 | 25.51 |
| 1993 | 86 | 82.68 | 67.48 | 64.16 | 3.86 | 21.54 | 25.40 |
| 1994 | 43 | 41.92 | 33.10 | 32.02 | 2.50 | 23.02 | 25.53 |
| 1995 | 69 | 66.57 | 53.89 | 51.45 | 3.53 | 21.90 | 25.43 |
| 1996 | 40 | 39.08 | 30.70 | 29.78 | 2.30 | 23.25 | 25.55 |
| 1997 | 48 | 46.66 | 37.10 | 35.76 | 2.79 | 22.71 | 25.50 |
| 1998 | 83 | 79.84 | 65.08 | 61.91 | 3.81 | 21.59 | 25.40 |
| 1999 | 47 | 45.71 | 36.30 | 35.01 | 2.73 | 22.77 | 25.51 |
| 2000 | 29 | 28.65 | 21.91 | 21.56 | 1.19 | 24.46 | 25.65 |
| 2001 | 41 | 40.03 | 31.50 | 30.53 | 2.37 | 23.17 | 25.54 |
| 2002 | 50.5 | 49.03 | 39.10 | 37.63 | 2.91 | 22.58 | 25.49 |
| 2003 | 45 | 43.82 | 34.70 | 33.52 | 2.62 | 22.89 | 25.52 |
| 2004 | 43 | 41.92 | 33.10 | 32.02 | 2.50 | 23.02 | 25.53 |
| 2005 | 48 | 46.66 | 37.10 | 35.76 | 2.79 | 22.71 | 25.50 |
| 2006 | 43 | 41.92 | 33.10 | 32.02 | 2.50 | 23.02 | 25.53 |
| 2007 | 44 | 42.87 | 33.90 | 32.77 | 2.57 | 22.96 | 25.52 |
| 2009 | 45 | 43.82 | 34.70 | 33.52 | 2.62 | 22.89 | 25.52 |
| 2010 | 83 | 79.84 | 65.08 | 61.91 | 3.81 | 21.59 | 25.40 |
| 2011 | 55 | 53.30 | 42.69 | 40.99 | 3.10 | 22.38 | 25.47 |

P: precipitación en milímetros

H: vegetación herbácea.

A: vegetación arbórea.

Escenario 2

La precipitación neta herbácea (P_H) se toma en cuenta para obtener las curvas IDF.

Escenario 3

Se elaboran las curvas IDF a partir de la precipitación neta arbórea (P_A).

Escenario 4

La precipitación neta herbácea (P_H) y neta arbórea (P_A) se emplean para construir las curvas IDF; es decir, método que considera la intercepción.

Una vez se obtienen las curvas IDF para cada escenario, se puede evaluar el efecto del componente de la intercepción en dicha

relación y sus implicaciones en la hidrología superficial.

Los datos de las cuatro series de precipitaciones mostradas en el cuadro 4 se ajustan a la distribución de Gumbel, ecuación (3). En el cuadro 5 se muestran los valores correspondientes de los parámetros de la distribución, así como los valores de los parámetros en la prueba de ji-cuadrada (χ^2). Los valores calculados son definitivamente inferiores a los valores teóricos a dos niveles de probabilidad, lo que permite aceptar la distribución de Gumbel para estimar la precipitación a diferentes periodos de retorno.

En el cuadro 6 se muestra la precipitación máxima en 24 horas registrada y las precipitaciones netas correspondientes a seis periodos de retorno, calculadas con la distribución de Gumbel utilizando $1/Tr(P) = 1 - F(P; \alpha, \mu)$.

Los cocientes lluvia/duración (R) y lluvia/ periodo de retorno (X) se obtienen aplicando las

ecuaciones (4) y (5), respectivamente; ambos se reportan en el cuadro 7; también se muestran los parámetros (a), (b) y (c), los cuales son función del lugar y del cociente (R); dichos parámetros se obtienen empleando la gráfica establecida por Chen (1983), llamada relación entre los parámetros (a), (b) y (c) de una tormenta estándar y la razón de la lluvia de una hora con la de 24 horas (ver también Campos & Gómez, 1990).

Efecto de la intercepción en las curvas IDF para cada escenario de valoración

La lluvia para diferentes duraciones (t) y periodos de retorno (Tr) se calcula con la ecuación (6); después, las precipitaciones en milímetros son convertidas en intensidades máximas en (mm/h); por lo general, la relación IDF se representa en forma gráfica, con la duración en el eje de las abscisas y la intensidad en el eje de

Cuadro 5. Parámetros de la distribución Gumbel comparados con la prueba ji-cuadrada a los niveles de probabilidad de 99.5 y 99%.

| P. máx. 24 horas | | | P. neta herbácea | | | P. neta arbórea | | | P. neta H + A | | | Niveles de probabilidad | |
|------------------|-------|----------|------------------|-------|----------|-----------------|-------|----------|---------------|-------|----------|-------------------------|-----------------|
| α | μ | χ^2 | α | μ | χ^2 | α | μ | χ^2 | α | μ | χ^2 | $\chi^2_{0.995}$ | $\chi^2_{0.99}$ |
| 0.14 | 37.78 | 2.52 | 0.14 | 36.97 | 2.33 | 0.11 | 28.92 | 2.09 | 0.11 | 28.12 | 1.89 | 32.80 | 30.60 |

Cuadro 6. Precipitaciones máximas observadas en 24 horas y precipitaciones netas para las cubiertas vegetales y sus respectivos periodos de retorno Tr .

| Tr (años) | P. máx. 24 horas | P. neta herbácea | P. neta arbórea | P. neta H + A |
|-------------|------------------|------------------|-----------------|---------------|
| 2 | 43.05 | 41.97 | 33.14 | 32.06 |
| 5 | 59.34 | 57.41 | 46.16 | 44.23 |
| 10 | 70.13 | 67.64 | 54.79 | 52.30 |
| 25 | 83.76 | 80.56 | 65.69 | 62.48 |
| 50 | 93.87 | 90.14 | 73.77 | 70.04 |
| 100 | 103.91 | 99.65 | 81.80 | 77.54 |

Cuadro 7. Cocientes lluvia/duración (R), lluvia/ periodo de retorno (X) y parámetros (a), (b) y (c), los cuales son función del lugar y del cociente (R).

| P. máx. 24 horas | | | | | P. neta herbácea | | | | | P. neta arbórea | | | | | P. neta H + A | | | | |
|------------------|------|----|------|------|------------------|------|----|------|------|-----------------|------|----|------|------|---------------|------|----|------|------|
| R | X | a | b | c | R | X | a | b | c | R | X | a | b | c | R | X | a | b | c |
| 0.60 | 1.48 | 40 | 11.6 | 0.88 | 0.60 | 1.47 | 39 | 11.4 | 0.87 | 0.63 | 1.49 | 40 | 11.9 | 0.86 | 0.59 | 1.48 | 38 | 11.2 | 0.85 |

las ordenadas, mostrándose una serie de curvas para cada uno de los periodos de retorno (T_r); en las figuras 4, 5, 6 y 7 se observan las curvas IDF para cada escenario establecido anteriormente; en ellas se puede ver la disminución en la intensidad, como resultado de la intercepción de la precipitación. En el cuadro 8 se muestran las intensidades máximas horarias para cada escenario y para periodo de retorno (T_r); también se observa el efecto de la intercepción en la relación IDF a manera de porcentaje; la variación de la intensidad en cada escenario se debe a la lámina de agua interceptada por cada una de las coberturas vegetales en consideración.

En el cuadro 8 se han planteado cuatro condiciones o escenarios en los cuales se podrían utilizar las curvas IDF; para el escenario sin vegetación o suelo desnudo no se tiene ningún efecto; para el escenario conformado por la intercepción en vegetación herbácea se tiene un efecto promedio de 2.89% en la reducción de los valores de intensidad; la intercepción en

vegetación arbórea tiene un efecto de 11.15%; el mayor efecto en las curvas o relación IDF de la precipitación se tiene al considerar un escenario conformado por cubierta vegetal herbácea y arbórea, siendo común en la mayoría de las cuencas hidrológicas; se tiene un efecto de 19.85% en los valores de intensidad.

Aplicación de los resultados

Mediante una aplicación se puede apreciar el efecto del componente de la intercepción en la relación IDF a escala de una cuenca hidrográfica. Se escoge la cuenca correspondiente al área natural protegida Peña Colorada, ubicada entre los municipios de Querétaro y el Marqués; posee un área de 49.84 km², de la cual el 0.11% corresponde a suelo desnudo erosionado; 67.07% está conformado por vegetación arbórea; 27.93% posee una combinación entre vegetación arbórea y herbácea, y 4.89 % corresponde a vegetación herbácea y pastizales. A partir

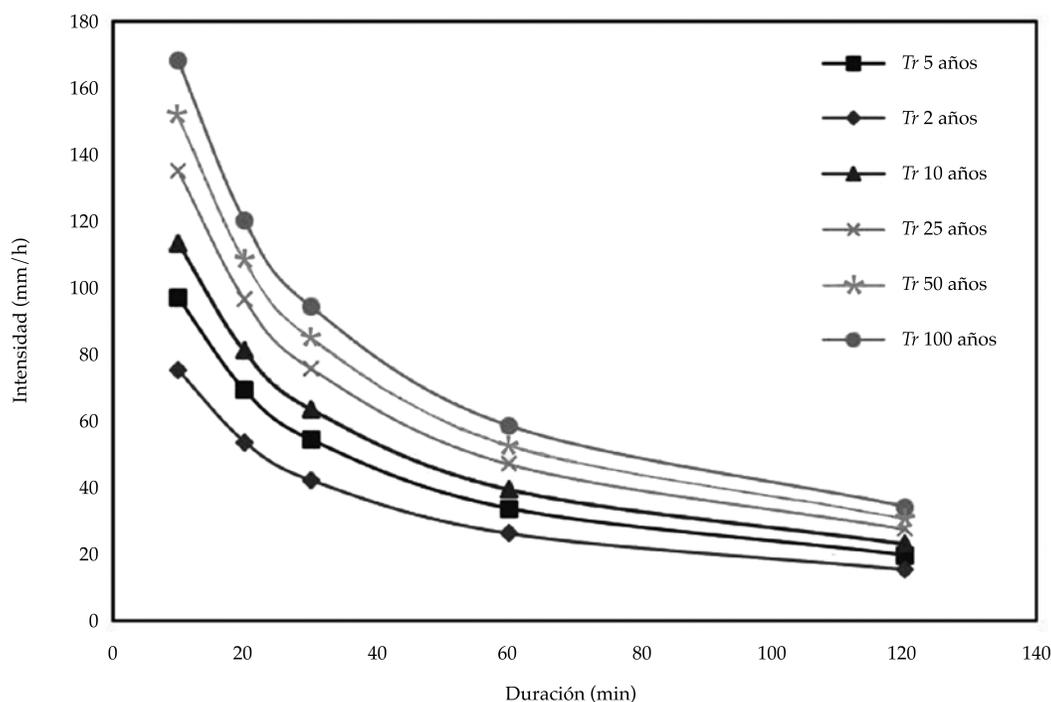


Figura 4. Curvas intensidad-duración-frecuencia sin efecto de la intercepción (escenario 1).

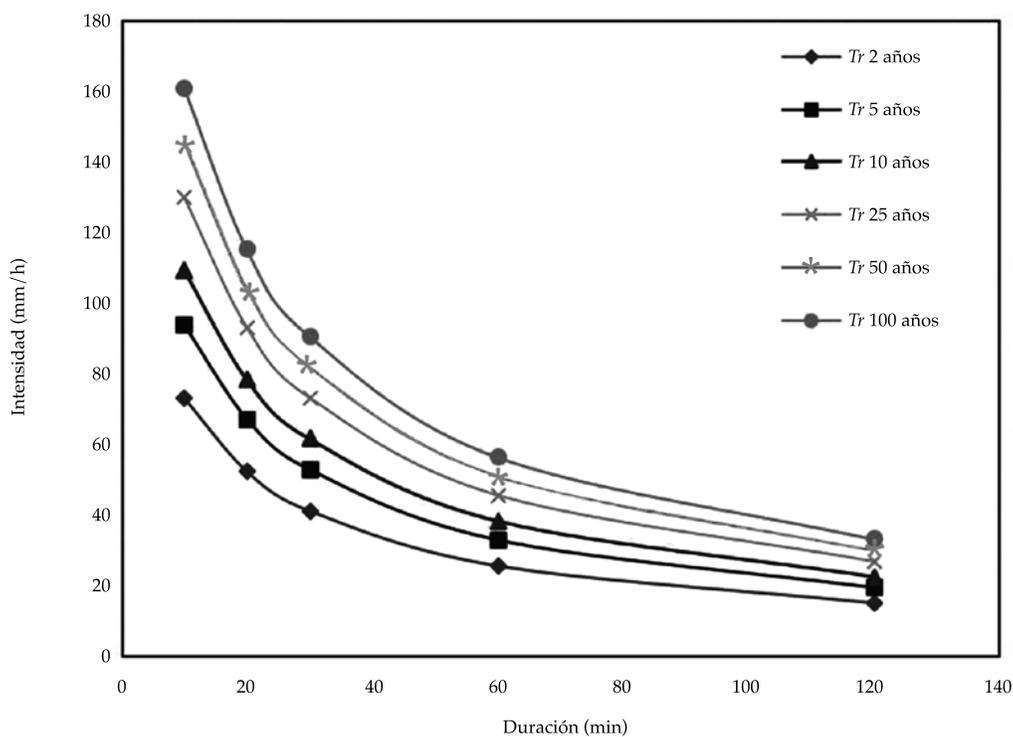


Figura 5. Curvas intensidad-duración-frecuencia con el efecto de la vegetación herbácea (escenario 2).

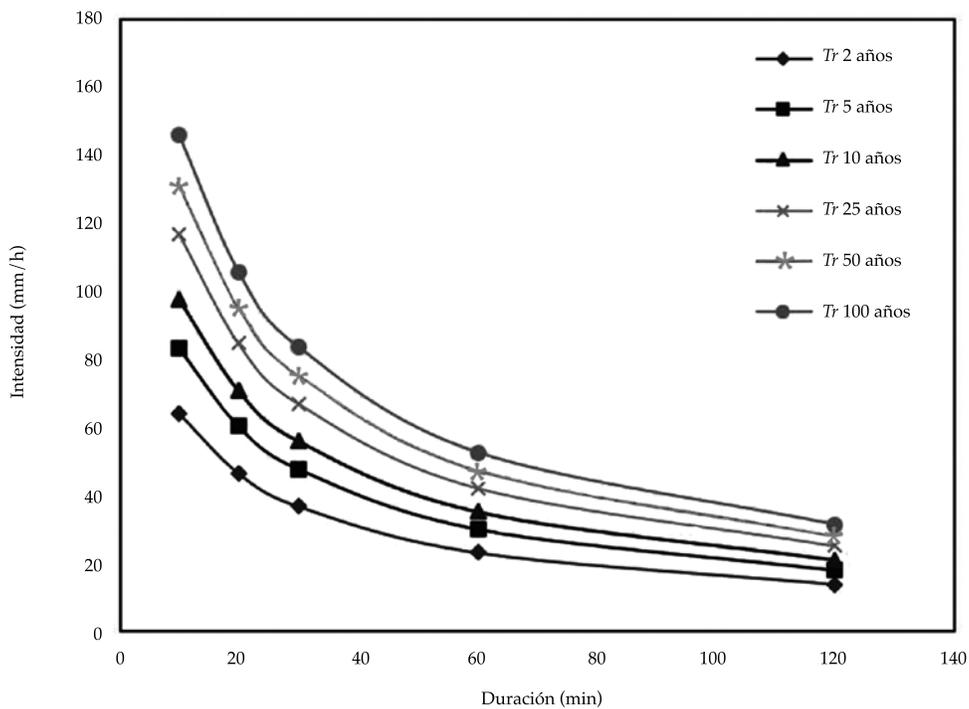


Figura 6. Curvas intensidad-duración-frecuencia con el efecto de la vegetación arbórea (escenario 3).

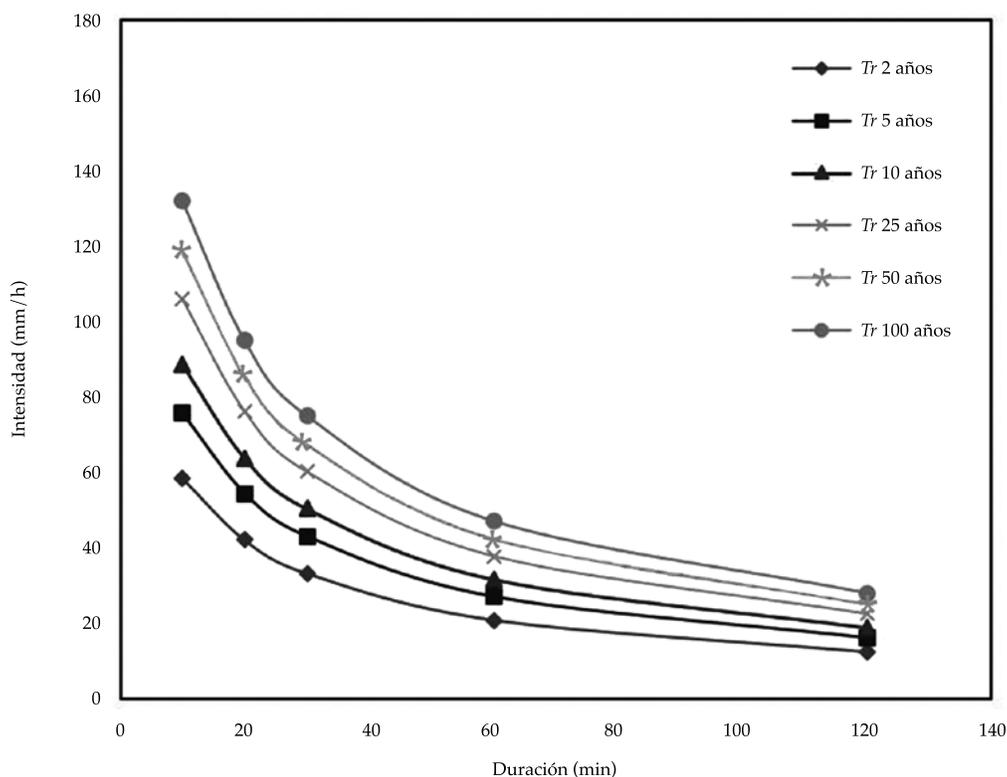


Figura 7. Curvas intensidad-duración-frecuencia con el efecto de la vegetación herbácea y arbórea (escenario 4).

Cuadro 8. Intensidades máximas horarias para cada escenario conformado por las diferentes cubiertas vegetales.

| Tr (años) | Intensidad máxima en las curvas IDF (mm/h) | | | | Efecto (%) | | |
|-----------|--|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 | Escenario 4 | Escenario 2 | Escenario 3 | Escenario 4 |
| 2 | 26.21 | 25.65 | 23.04 | 20.88 | 2.12 | 12.09 | 20.32 |
| 5 | 33.78 | 32.87 | 29.93 | 27.03 | 2.69 | 11.39 | 19.97 |
| 10 | 39.51 | 38.33 | 35.15 | 31.69 | 2.97 | 11.04 | 19.79 |
| 25 | 47.08 | 45.55 | 42.04 | 37.84 | 3.24 | 10.70 | 19.63 |
| 50 | 52.81 | 51.01 | 47.26 | 42.49 | 3.40 | 10.52 | 19.53 |
| | | | | Media | 2.89 | 11.15 | 19.85 |

de la información anterior y considerando la topografía de la cuenca, se ha desarrollado el modelo hidrológico de la cuenca en estudio, con la finalidad de realizar modelaciones hidrológicas que evalúan y consideran los escenarios planteados en el presente trabajo (figura 7). Para el análisis y desarrollo de las modelaciones se ha tomado como herramienta el modelo hidrológico HEC-HMS (*Hydrologic Modeling*

System) (U.S. Army Corps of Engineers, 2016). Este modelo utiliza métodos de transformación del fenómeno lluvia-escorrentía para estimar los hidrogramas de escorrentía directa generados por las precipitaciones en una cuenca durante un periodo especificado.

El modelo meteorológico considera las precipitaciones, intensidades y escenarios planteados según sea la cobertura vegetal (cuadro 6). Para

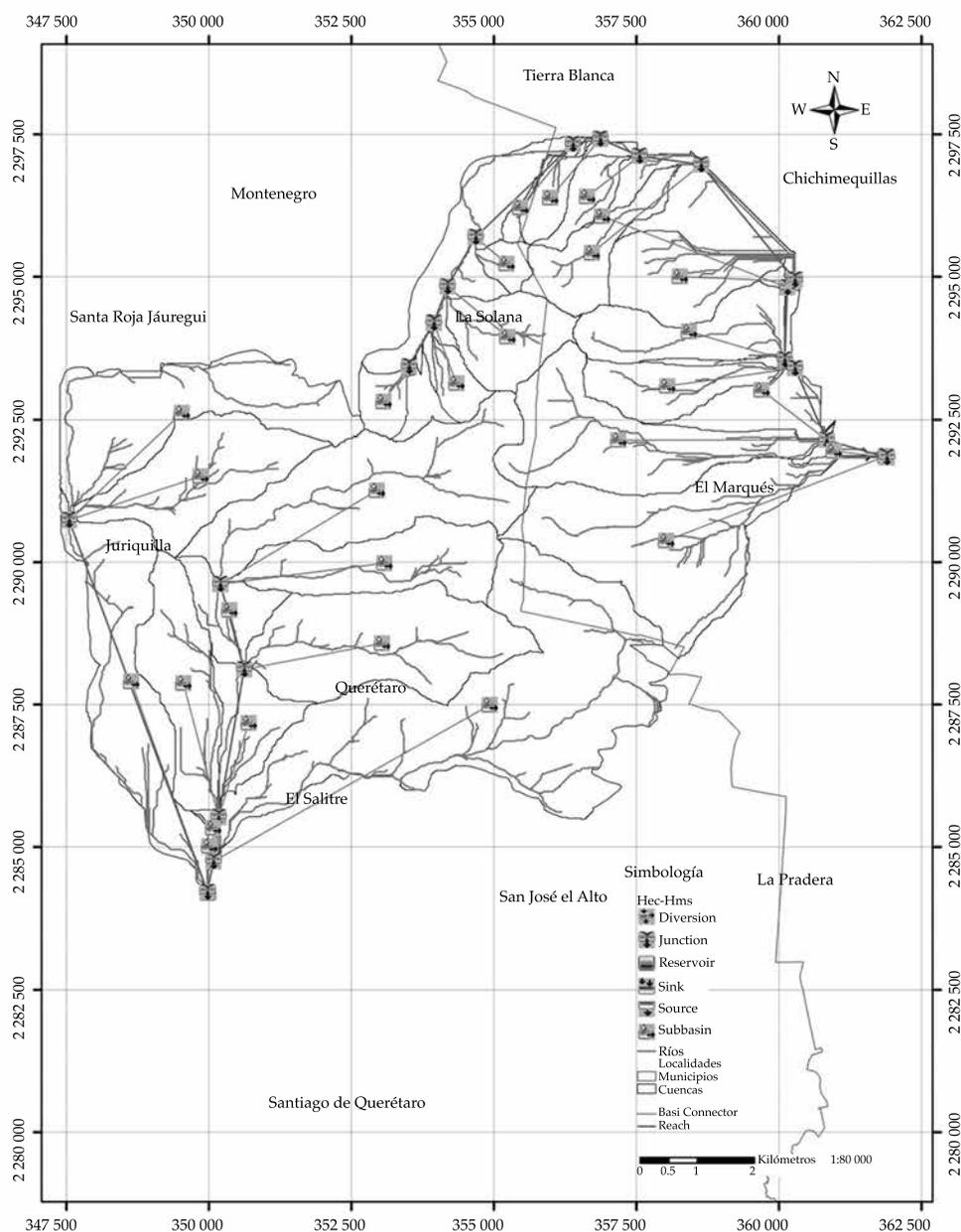


Figura 8. Modelo hidrológico de la cuenca Peña Colorada.

el análisis del fenómeno lluvia-escorrentamiento se ha tomado el método del número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, 1972), considerando periodos de retorno de 2, 25 y 100 años, respectivamente (cuadro 9).

En el cuadro 9 se muestra claramente el efecto del componente de la intercepción en la

intensidad para cada uno de los periodos de retorno establecidos; el mayor impacto ocurre cuando se tiene un escenario compuesto por una cubierta vegetal arbórea y herbácea, donde las intensidades obtenidas a partir de las curvas IDF con esta condición son menores que las que se logran con una condición de suelo desnudo,

Cuadro 9. Efecto de la intercepción en los escurrimientos de una cuenca.

| Superficie o cobertura vegetal | Cobertura % | Área km ² | CN | Período de retorno (Tr) | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------|----------------------|-------|---|---|----------------------------|----------------------------|--|--|----------------------------|----------------------------|--|--|----------------------------|----------------------------|
| | | | | Precipitación sin efecto de la intercepción (mm) 2 años | Precipitación con efecto de la intercepción (mm) 2 años | Caudal (m ³ /s) | Caudal (m ³ /s) | Precipitación sin efecto de la intercepción (mm) 25 años | Precipitación con efecto de la intercepción (mm) 25 años | Caudal (m ³ /s) | Caudal (m ³ /s) | Precipitación sin efecto de la intercepción (mm) 50 años | Precipitación con efecto de la intercepción (mm) 50 años | Caudal (m ³ /s) | Caudal (m ³ /s) |
| Herbácea | 4.89 | 2.44 | 74.19 | 43.05 | 41.97 | 55 | 24.3 | 83.76 | 80.56 | 302.3 | 185.8 | 93.87 | 90.14 | 379.7 | 240.4 |
| Arbórea + herbácea | 27.93 | 13.92 | 77 | 43.05 | 32.06 | | | 83.76 | 62.48 | | | 93.87 | 70.04 | | |
| Arbórea | 67.07 | 33.43 | 70 | 43.05 | 33.14 | | | 83.76 | 65.69 | | | 93.87 | 73.77 | | |
| Sin vegetación o suelo desnudo | 0.11 | 0.05 | 76.11 | 43.05 | 43.05 | | | 83.76 | 83.76 | | | 93.87 | 93.87 | | |

donde no se considera el efecto de la vegetación; esto representa la forma tradicional de empleo y método de elaboración de las curvas IDF. La cuenca de Peña Colorada es drenada por dos grandes subcuencas: una en el municipio de Querétaro, que desemboca al suroeste del mismo; la otra se ubica en el municipio del Marqués y desemboca el noreste del mismo. Debido a la particularidad ya mencionada, se originan dos cauces principales para que la cuenca sea drenada, por tal motivo se realiza y analiza para cada subcuenca su respectivo modelo hidrológico.

Para las subcuencas del Marqués y Querétaro se han efectuado simulaciones, considerando en el modelo meteorológico periodos de retorno de 2, 25 y 50 años, respectivamente, lo que ha permitido estimar los hidrogramas y el caudal máximo en el punto de salida para cada periodo de retorno establecido. En el cuadro 9 se puede observar que la simulación evalúa el escenario con una superficie sin vegetación o suelo desnudo, es decir, no considera la intercepción; el modelo estima un caudal total de 55 m³/s para un periodo de retorno de dos años; para 25 y 50 años se tienen valores de 302.3 y 379.7 m³/s, respectivamente. La situación anterior cambia de manera significativa cuando se evalúa un escenario que sí considera la intercepción en una superficie; en ese caso, el modelo estima caudales totales correspondientes a 24.3, 185.8 y 240.4 m³/s para los respectivos periodos de retorno. Lo anterior representa un 55.81, 38.53 y 36.68% de disminución en los escurrimientos superficiales; porcentajes considerables al momento de dimensionar una estructura hidráulica.

En las figuras 9 y 10 se observan los hidrogramas de caudales máximos estimados para las subcuencas del Marqués y Querétaro, considerando los periodos de retornos ya mencionados. En dichas figuras se puede notar que para el escenario que considera la intercepción, la magnitud de los caudales punta disminuye de forma considerable al ser contrastado con los valores estimados bajo el escenario contrario; por ejemplo, analizando la subcuenca del Marqués y Querétaro para un periodo de retorno de 50 años, se ha podido observar que se tiene

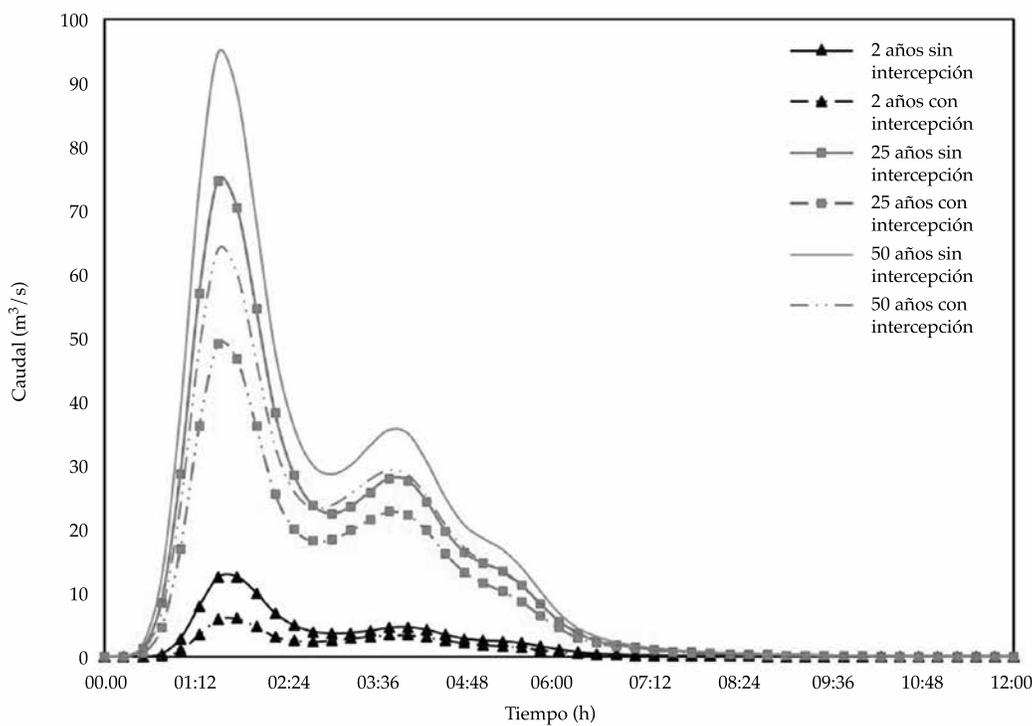


Figura 9. Hidrogramas simulados correspondientes a la subcuenca hidrológica Marqués para las distintas consideraciones del análisis.

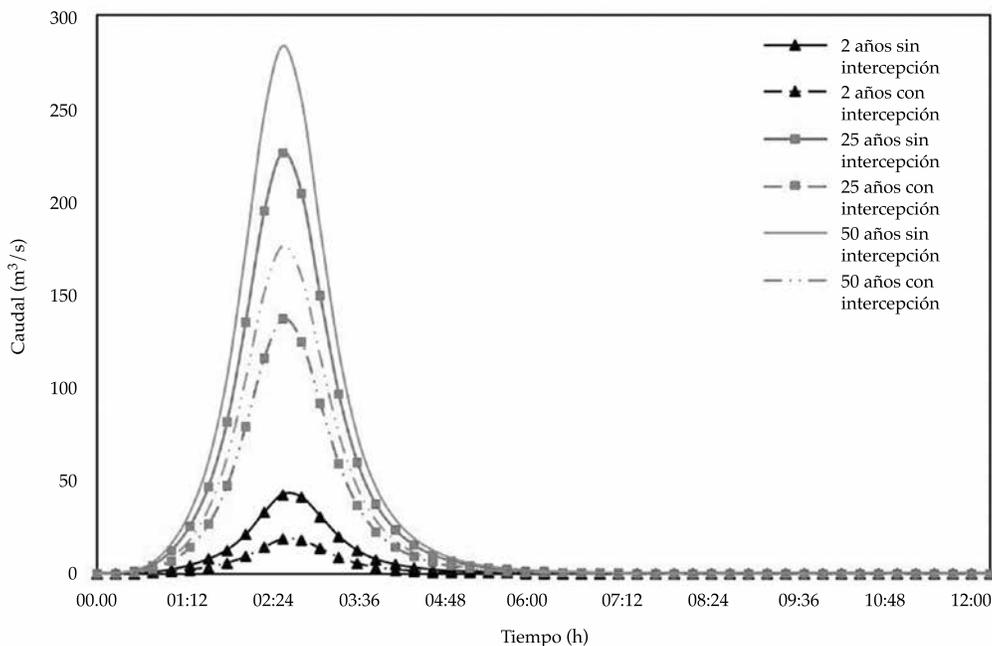


Figura 10. Hidrogramas simulados correspondientes a la subcuenca hidrológica Querétaro para las distintas consideraciones del análisis.

estimado un caudal punta de 63.8 y 176.6 m³/s, considerando un escenario con intercepción; los valores anteriores son significativamente menores a los caudales punta estimados para un periodo de retorno de 25 años no considerando la intercepción, los cuales tienen como magnitud 74.7 y 226.3 m³/s. El análisis anterior, en términos del volumen de escurrimiento directo, significa que se tiene menos volumen escurrido para un periodo de retorno de 50 años considerando la intercepción, que para una simulación con periodo de retorno de 25 años sin considerar el efecto de la intercepción; esto equivale en total a 1,478.4 m³ para 50 años y 1,786.1 m³ para 25 años.

Finalmente, la cobertura vegetal presente en la cuenca hidrográfica de Peña Colorada está conformada por árboles, arbustos, hierbas, mulch, etcétera, de tal forma que origina diversos escenarios de valoración hidrológica que contribuyen a la sostenibilidad del medio ambiente.

Conclusiones

La intercepción de la vegetación herbácea semiárida en proporción de la precipitación representa el 2.33%, valor que favorece el conocimiento a escala global de dicho componente, siendo útil para la calibración y validación de modelos hidrológicos. El valor hidrológico de la intercepción en las cuencas hidrográficas es dependiente del tipo de vegetación y estructura de la misma; lo anterior ha permitido el planteamiento de cuatro condiciones o escenarios de valoración hidrológica del efecto de la intercepción en la relación intensidad, duración y frecuencia de la precipitación, estableciendo que las intensidades de diseño pueden ser diferentes de acuerdo con el escenario o cubierta vegetal presente o considerada en el modelo físico de la cuenca, ocasionando con ello que los caudales de diseño o volúmenes de escurrimiento directo se incrementen o disminuyan, impacto que se refleja en los costos económicos de una obra hidráulica. Por otro lado, las consideraciones anteriores pueden ser importantes en la cuantificación,

gestión, preservación y administración de los recursos hidráulicos de una cuenca o zona, lo cual se puede reflejar en la estimación de volúmenes de agua para el abastecimiento de poblaciones, riego de cultivos, dimensionamiento de drenajes y estructuras hidráulicas en general; asimismo, los resultados pueden contribuir al planteamiento de políticas para contrarrestar los efectos del cambio climático en los recursos hídricos.

Referencias

- Aparicio, M. F. J. (2008). *Fundamentos de hidrología de superficie* (pp. 304). México, DF: Editorial Limusa.
- Belmonte-Serrato, F. (1997). *Intercepción en bosque y matorral mediterráneo semiárido: balance hídrico y distribución de la lluvia neta* (375 pp.). Tesis doctoral. Murcia: Universidad de Murcia.
- Belmonte-Serrato, F., & Romero-Díaz, A. (1998). *Modelos y técnicas en intercepción*. Cuadernos Técnicos de la SEG núm. 11, Geoforma, Logroño: Ediciones Logroño.
- Calder, I. R. (1990). *Evaporation in the uplands*. Chichester: J. Wiley.
- Campos, D. F., & Gómez, D. R. (1990). Procedimiento para obtener curvas I-D-Tr a partir de registros pluviométricos. *Ingeniería Hidráulica en México*, 5(2), 39-52.
- 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.
- Chen, C. L. (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 109(12), 1603-1621.
- Chow, V. T., Maidment, D.R., & Mays, L.W. (1998). *Hidrología aplicada* (584 pp.). Santafé de Bogotá: Editorial McGraw Hill.
- Crockford, R. H., & Richardson, D. P. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrol. Process.*, 14(16-17), 2903-2920.
- Dohnal, M., Cerny, T., Votrubova, J., & Tesar, M. (2014). Rainfall interception and spatial variability of throughfall in spruce stand. *J. Hydrol Hydromech.*, 62(4), 277-284.
- Fang, H., Changqun, D., Zhonghua, J., Chengfei, L., Yucang, S., & Zhixiang, P. (2008). Rainfall-interception effect of vegetation restored region of gully in arid-Hot Valley of Jinshajiang River. *Wuhan Univ. J. Nat. Sci.*, 13(3), 350-356.
- Frasson, R., & Krajewski, W. (2013). Rainfall interception by maize canopy: Development and application of a process-based model. *Journal of Hydrology*, 489, 246-255.
- García-Estrínaga, P., Blazquez, A., & Alegre, J. (2006). *Determinación de la intercepción y la redistribución del*

- agua de lluvia a su paso a través de vegetación arbustiva en traslocación y escorrentía cortical: una modificación de método *Interception Flor Collection Box* (6 pp.). Madrid: Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural Agrario y Alimentario (IMIDRA).
- Gash, J. H. C. (1979). An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105(443), 43-55.
- Gerrits, A. M. J., Savenije, H. H. G., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2006). Measuring forest floor interception in a beech forest in Luxembourg. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(4), 2323-2341.
- Groen, M. M., & Savenije, H. H. (2006). A monthly interception equation based on the statistical characteristics of daily rainfall. *Water Resources*, 42(12), 1-10.
- He, Z., Yang, J., Zhao, W., Liu, H., & Chang, X. (2014). Spatial variability of canopy interception in a spruce forest of the semiarid mountain regions of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 188, 58-63.
- Helvey, J. D. (1964). *Rainfall interception by hardwood forest litter in the southern Appalachians* (8 pp.). Asheville: Paper S. U.S. Forest Serv., Southeastern Forest Experiment Station.
- Horton, R. E. (1919). Rainfall interception. *Monthly Weather Review*, 47 (9), 603-623.
- Keim, R. F., Skaugset, A. E., Link, T. E., & Iroume, A. (2004). A stochastic model of throughfall for extreme events. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(1), 23-34.
- Komatsu, H., Shinohara, Y., Kume, T., & Otsuki, K. (2008). Relationship between annual rainfall and interception ratio for forests across Japan. *Forest Ecology and Management*, 256(5), 1189-1197.
- Loescher, H. W., Power, J. S., & Oberbauer, S. F. (2002). Spatial variation of through fall volume in an old-growth tropical wet forest. *Journal of Tropical Ecology*, 18, 397-407.
- 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* (173 pp.). Tesis de maestría. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Love, D., Uhlenbrook, S., Corzo-Perez, G., Twomlow, S., Van Der Zaag, P. (2010). Rainfall-interception-evaporation-runoff relationships in a semi-arid catchment, northern Limpopo basin, Zimbabwe. *Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques*, 55(5), 687-703.
- Mastachi-Loza C. (2007). *Intercepción de precipitación en dos especies de ambiente semiárido: Acacia farnesiana y Prosopis laevigata* (108 pp.). Tesis de maestría. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Mulder, J. P. M. (1985). *Simulating interception loss using standard meteorological data* (pp. 177-196). Reidel, Dordrecht: The Forest Atmosphere Interaction.
- Navar, J. (2013). The performance of the reformulated Gash's interception loss model in Mexico's northeastern temperate forests. *Hydrol. Process.*, 27(11), 1626-1633.
- Navarro, J., Martínez-De-Azagra, A., & Mongil, J. (2009). *Hidrología de conservación de aguas: captación de precipitaciones horizontales y escorrentías en zonas secas*. Valladolid, España: Universidad de Valladolid, Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial.
- Putuhena, W.M., & Cordery, I. (1996). Estimation of interception capacity of the forest floor. *J. Hydrol.*, 180(1-4), 283-299.
- Raat, K. J., Draaijers, G. P. J., Schaap, M. G., Tietema, A., & Verstraten, J. M. (2002). Spatial variability of through all water and chemistry and forest floor water content in a Douglas fir forest stand. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(3), 363-74.
- Ringgard, R., Herbst, M., & Friborg, T. (2014). Partitioning forest evapotranspiration: Interception evaporation and the impact of canopy structure, local and regional advection. *Journal of Hydrology*, 517, 677-690.
- Rodrigo, A., & Ávila, A. (2001). Influence of simple size in the estimation of mean through fall in two Mediterranean holm oak forest. *Journal of Hydrology*, 243(3-4), 216-227.
- Rutter, A. J., Kershaw, K. A., Robins, P. C., & Morton, A. J. (1971). A predictive rainfall interception in forest: derivation of the model from observations in plantation of Corsican pines. *Agricultural Meteorology*, 9, 367-384.
- Sadeghi, S., Attarod, P., & Abbasian, P. (2014). Rainfall interception loss by a Cupressus arizonica Stand. *Adv. Biores.*, 5(4), 24-29.
- Sadeghi, S., Attarod, P., Grant Pypker, T., & Dunkerley, D. (2014). Is canopy interception increased in semiarid tree plantations? Evidence from a field investigation in Tehran, Iran. *Turkish Journals of Agriculture and Forestry*, 38, 792-806.
- Sadeghi, S., Attarod, P., Van Stan, J., Grant, T., & Dunkerley, D. (2015). Efficiency of the reformulated Gash's interception model in semiarid afforestations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201, 76-85.
- Samba, S., Camire, C., & Margolis, H. (2001). Allometry and rainfall interception of Cordyla pinnata in a semi-arid agroforestry parkland, Senegal. *Forest Ecol. Manag.*, 154(1-2), 277-288.
- Savenije, H. G. (2004). The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary. *Hydrol. Processes.*, 18(8), 1507-1511.
- Schellekens, J., Bruijnzeel, L. A., Scatena, F. N., Bink, N. J., & Holwerda, F. (2000). Evaporation from a tropical rain forest, Luquillo Experimental Forest, eastern Puerto Rico. *Water Resources Research*, 36(8), 2183-2196.
- Schowalter, T. D. (1999). Throughfall volume and chemistry as affected by precipitation volume, sampling size, and defoliation intensity. *Great Basin Nat.*, 59, 79-84.
- Shachnovich, Y., Berliner, P., & Bar, P. (2008). Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid zone. *J. Hydrol.*, 349(1-2), 168-177.

- Shuttleworth, W. J., & Calder, I.R. (1979). Has the Priestley-Taylor equation any relevance to forest evaporation? *Journal of Applied Meteorology*, 18, 639-646.
- SCS (1972). *Section 4: Hidrology. National Engineering Handbook*. Washington DC: Soil Conservation Service, United States Department of Agriculture.
- Tucci, C. E. M. (2001). *Precipitação in hidrologia: ciência e aplicação* (pp. 177-242) (2ª ed.). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- U.S. Army Corps of Engineers (2016). *Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) User's Manual: Version 4.2*. Davis, USA: Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center.
- Vernimmen, R., Bruijnzeel, L., Romdoni, A., & Proctor, J. (2007). Rainfall interception in three contrasting lowland rain forest types in Central Kalimantan, Indonesia. *Journal of Hydrology*, 340(3-4), 217-222.
- Villón-Béjar, M. (2006). *Hidrología estadística* (440 pp.). Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Xiao, Q., & McPherson, E. (2011). Rainfall interception of three trees in Oakland, California. *Urban Ecosyst.*, 14(4), 755-769.
- Wani, M. A., & Manhas R. K. (2012). Rainfall interception in relation to the tree architecture of *Pinus wallichiana*. *Current Science*, 103(7), 821-827.

Dirección institucional de los autores

Dr. Alvaro Alberto López-Lambrano

Universidad Autónoma de Baja California
Laboratorio de Hidráulica
Unidad Ensenada, km 103 Carretera Tijuana-Ensenada
22860 Ensenada, Baja California, MÉXICO
Hidrux, S.A. de C.V. Querétaro, MÉXICO
Teléfono: +52 (442) 1946 654; +52 (646) 1750 707 ext. 64315
alopezl@uabc.edu.mx
alopezl@hidrux.com
altoti@gmail.com

Dr. Carlos Fuentes

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +52 (777) 3293 600
cfuentes@tlaloc.imta.mx

Dr. Enrique González-Sosa

Universidad Autónoma de Querétaro
Cerro de Las Campanas, s/n, Las Campanas
76010 Santiago de Querétaro, Querétaro, MÉXICO
Teléfono: +52 (442) 1921 200 Ext. 6016 y 6015
egs@uaq.mx

M.C. Alvaro Alberto López-Ramos

Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Montería
Montería, Km. 8 Vía a Cereté, Montería, Córdoba,
COLOMBIA
Teléfono: +57 (300) 8148 460
alvaro.lopezr@upb.edu.co