

ARTÍCULOS

**Comportamiento hidrológico de una mesocuenca de montaña
en el centro oriente de México**

Hydrological behavior of a mesoscale montane catchment
in central-eastern Mexico

Alitzel Guzmán-Huerta ^{a*}, Lyssette Elena Muñoz-Villers ^b

^aAutor de correspondencia: ^aUniversidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Circuito de Posgrados, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México, México, tel.: 55-56-224092, alitzel.guzh@gmail.com

^bUniversidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 04510 México, tel.: 55-56-224089, lyssette.munoz@atmosfera.unam.mx

SUMMARY

Cloud forests are ecosystems with high hydrological value, however, land use change and the modification of climate patterns are increasingly threatening their existence. This study examined the hydrological behavior of the Los Gavilanes river catchment (~ 35 km²) that supplies 90 % of water to the city of Coatepec (Veracruz, México) and surrounding areas. Rainfall was registered using automatic rain gauges and streamflow was measured using water level readings from pressure transducers in combination with stream gauging methods. Annual rainfall (2015-2016) was 2,692 mm distributed in 177 events with mean rainfall amounts and average intensities of 22.6 mm and 6.5 mm hr⁻¹ during the wet season, respectively, and 11.4 mm and 1.6 mm hr⁻¹ during the dry season. Annual streamflow was 1,394 mm, of which 90 % was baseflow with no seasonal differences observed. In general, the catchment's hydrological response shows a clear signal of its high rainfall infiltration and water storage capacity, characteristics preserved by the forest cover allowing to sustain streamflow and the provision of water sources for the region throughout the year. Finally, maximum rain event intensities and amounts were the key variables explaining quickflow and baseflow generation and total discharge in the study catchment.

Key words: precipitation, streamflow, hydrograph separation, baseflow, cloud forest.

RESUMEN

Los bosques de niebla son ecosistemas de alto valor hidrológico, sin embargo, el cambio de uso de suelo y modificación de los patrones climáticos amenazan cada vez más su existencia. Este trabajo examinó el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Los Gavilanes (~ 35 km²) que suministra el 90 % del agua potable a la ciudad de Coatepec (Veracruz, México) y congregaciones aledañas. La precipitación fue registrada con pluviómetros y el caudal fue medido con transductores de presión y aforos. La cantidad de precipitación anual (año hidrológico 2015-2016) fue de 2.692 mm distribuida en 177 eventos con tamaños de lluvia e intensidades promedio de 22,6 mm y 6,5 mm hr⁻¹ durante la época de lluvias, respectivamente, y de 11,4 mm y 1,6 mm hr⁻¹ durante la época de secas. El caudal anual observado fue de 1.394 mm, con una contribución del 90 % del flujo base sin diferencias estacionales. En general, la respuesta hidrológica de la cuenca muestra una clara señal de sus altas tasas de infiltración y almacenamiento de agua en el suelo y subsuelo, características conservadas por la cobertura boscosa, lo que permite sostener caudales y proveer agua para la región a lo largo del año. Finalmente, el tamaño y la intensidad máxima de los eventos de precipitación fueron las variables que más se correlacionaron con el caudal total y la generación de flujos rápido y base en la cuenca estudiada.

Palabras clave: precipitación, caudal, separación de hidrogramas, flujo base, bosque de niebla.

INTRODUCCIÓN

El bosque tropical húmedo de montaña, también referido como bosque de niebla (BN), es un ecosistema mundialmente importante por su biodiversidad y provisión de servicios hidrológicos (Bruijnzeel *et al.* 2011a), tales como el favorecimiento de infiltración, almacenamiento y recarga de agua en el subsuelo, así como la regulación de caudales en ríos con alta calidad de agua (Bruijnzeel *et al.* 2011b, Muñoz-Villers y McDonnell 2012).

Estos bosques cubren menos del 2,5 % (381.166 km²) de las áreas forestales tropicales en el mundo (15.373.235 km²), y una cuarta parte se encuentra en el continente americano (96.394 km²) (Kapos *et al.* 2000). En las últimas décadas la superficie de estos bosques ha disminuido rápidamente debido a procesos de fragmentación y deforestación derivados de los cambios en la cubierta vegetal y uso de suelo (Mulligan 2011).

A pesar de su importancia hidrológica, los estudios en BN han sido relativamente pocos y concentrados en el centro y sur de América, y la gran mayoría se han realizado en microcuencas (< 1 km²) o cuencas relativamente pequeñas (hasta 12 km²). Se ha reportado que los coeficientes de escurrimiento anuales (Q/P ; siendo Q el caudal y P la precipitación) oscilan entre el 35 y 49 % en microcuencas (Brasil: Mello *et al.* 2019, México: Muñoz-Villers *et al.* 2012, Ecuador: Timbe *et al.* 2017). En cambio, en cuencas de mayor tamaño (1-12 km²) se han reportado Q/P más variables (52-107 %, Ecuador: Crespo *et al.* 2011, Timbe *et al.* 2017; Colombia: Ramírez *et al.* 2017). Asimismo, se han observado flujos estables a lo largo del año en cuencas que drenan en suelos de origen volcánico, particularmente en las regiones de Mantiqueira, Brasil (Campos-Pinto *et al.* 2016), Monteverde, Costa Rica (Guswa *et al.* 2007), Filandia, Colombia (Roa-García *et al.* 2011) y en el centro de Veracruz, México (Muñoz-Villers *et al.* 2015), debido a la alta capacidad de infiltración de estos suelos y recarga de agua subterránea.

En cuencas de mayor tamaño (> 30 km²), los estudios en BN son aún más limitados y se han enfocado principalmente en determinar las fuentes de agua que contribuyen a la generación de caudales. Por ejemplo, Clark *et al.* (2014) muestran que en cuencas ubicadas en el Valle Kosñipata, Perú, los caudales se sostienen principalmente por la precipitación durante la época de lluvias. Por otra parte, en la cuenca del río San Francisco, Ecuador, Crespo *et al.* (2012) reportan que las fuentes principales del caudal en la época de lluvias es el flujo subsuperficial producido a poca profundidad en el suelo, y el flujo de agua subterránea durante la época de estiaje.

Además, es importante mencionar que una revisión de investigaciones reciente advierte que estudios publicados en hidrología observacional han disminuido drásticamente en los últimos 50 años y solo un 10 % de ellos incorpora hoy en día información de monitoreo y colecta de datos en campo (Burt y McDonnell 2015). Esto es preocupante,

particularmente para las regiones tropicales, en donde el funcionamiento hidrológico de cuencas y los mecanismos que lo controlan son aún muy poco entendidos y, pese a ello, se parametrizan modelos (Birkel *et al.* 2012, Arnold *et al.* 2015) y se toman decisiones con la poca información existente (Quintero *et al.* 2009). Por tanto, hacemos un llamado a desarrollar investigaciones enfocadas en el estudio de procesos hidrológicos en cuencas, basados en la medición continua de variables en campo con alta resolución de muestreo.

En México, estudios hidrológicos a nivel de procesos han sido también escasos a lo largo de la franja de distribución del BN. Destaca la región central de Veracruz por concentrar la mayor cantidad de investigaciones a nivel de microcuenca (< 1 km²: Muñoz-Villers y McDonnell 2012, 2013), sin embargo, son prácticamente inexistentes estudios a nivel de mesocuenca, lo cual es requerido para entender la generación de caudales estacionales y anuales y, a su vez, la provisión de agua para las partes bajas de la cuenca, la partición de caudal en flujos rápido y base, y las características de la lluvia que los controlan.

Resultados de un solo sitio a escala de mesocuenca (75,3 km²) en la región andina, muestra que la generación de caudales está dominada por flujos subsuperficiales poco profundos, reflejado en tiempos cortos de residencia del agua (0,7-0,9 años: Timbe *et al.* 2014) y un alto Q/P (78 %: Crespo *et al.* 2011). En nuestro caso, estudios previos han reportado tiempos de residencia del agua más prolongados (~ 2 años: Muñoz-Villers *et al.* 2016), por tanto, hipotetizamos que la razón Q/P en la cuenca del río Los Gavilanes será menor y el caudal estará dominado por flujos base principalmente.

En México como en otros países de América Latina, existe poca información hidrometeorológica en cuencas de montaña (< 25 %; ERIC III v.1.0, SEMAR 2020). Esto se debe a la limitada infraestructura de monitoreo en estas regiones, caracterizadas por ser generalmente remotas y poco accesibles. En cuanto a aspectos hidrológicos, se carece de información sobre la dinámica estacional y anual de los afluentes montañosos, los cuales en México conforman los sistemas de grandes ríos que desembocan en el Golfo de México y Océano Pacífico. De las estaciones hidrométricas existentes, menos del 5 % se localiza en microcuencas (0,7 %, < 1 km²) o cuencas relativamente pequeñas (4,1 %, < 15 km²), siendo más monitoreadas las cuencas de mayor área de drenaje (83,6 %, 100-85.000 km²; CONAGUA 2020). Sin embargo, la alta variabilidad microclimática y biofísica del paisaje montañoso hace necesario colocar infraestructura para su monitoreo y estudio (Célleri y Feyen 2009).

Este estudio tiene como objetivo evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Los Gavilanes, a partir de información hidrometeorológica colectada a una alta resolución temporal de muestreo durante el año hidrológico 2015-2016. A partir de ello, se cuantificó la precipitación y el caudal a escala de evento, estacional y

anual, así como métricas de respuesta hidrológica de la cuenca durante eventos de lluvia (tiempo de retraso, de pico, de recesión y pico de descarga), con el fin de conocer los volúmenes de provisión de agua de la cuenca y proporcionar información de referencia para la parametrización de modelos hidrológicos, y desarrollo de políticas públicas locales y regionales.

MÉTODOS

Área de estudio. La cuenca del río Los Gavilanes (~ 35 km²), cuyo afluente es de quinto orden y es a su vez cabecera de la cuenca del río La Antigua, se localiza en el barlovento del sistema volcánico Cofre de Perote, centro de Veracruz, México (19°29'5" N, 97°02'53" O) (Muñoz-Villers *et al.* 2016).

La cuenca presenta una forma alargada con un extenso afluente principal (21 km), siendo los ríos Huehueyapan y Puente Zaragoza los principales tributarios (figura 1) (Muñoz-Villers *et al.* 2016). Esta cuenca abarca un rango altitudinal de ~ 1.200 a 3.000 m s.n.m., y debido a su relieve montañoso posee una densa red de drenaje (1,52 km km⁻²) (Muñoz-Villers *et al.* 2016, Guzmán-Huerta 2019). En conjunto, la cuenca de Los Gavilanes suministra el 90 % del agua que consume la ciudad de Coatepec y congregaciones aledañas (~ 80.000 hab.) (Muñoz-Villers *et al.* 2016), y es también fuente de agua para actividades económicas asociadas a la agricultura, ganadería, pesca y turismo que tienen lugar en la parte baja de la cuenca principalmente.

El clima predominante es templado húmedo y subtropical húmedo (García 2004), identificando tres periodos: 1) Un periodo relativamente seco y frío (noviembre-abril) causado por el ingreso de frentes fríos; 2) Un periodo seco y cálido (abril-mayo), originado por la estabilidad del cin-

turón subtropical y 3) Un periodo húmedo cálido (junio-octubre) caracterizado por lluvias producidas por la humedad proveniente de los vientos alisios (Williams-Linera 2012). La precipitación promedio anual registrada en la parte media-alta de la cuenca (1.400-3.000 m s.n.m.) fue de 3.184 mm y en la parte media-baja (< 1.400 m s.n.m.) fue de 1.386 mm, de la cual el 80 y 67 %, respectivamente, se observa durante la época de lluvias (mayo-octubre) (Muñoz-Villers *et al.* 2012, Holwerda *et al.* 2013). Las temperaturas promedio fueron, respectivamente, de 13,4 y 17,3 °C para la parte media-alta y media-baja durante la época de secas (noviembre-abril) y de 15,4 y 20,2 °C durante la época de lluvias (Holwerda *et al.* 2010). Cabe resaltar que la cuenca de Los Gavilanes no dispone de estaciones hidrometeorológicas oficiales para registros de precipitación y caudal.

Los tipos de vegetación y usos de suelo en la cuenca son bosque de coníferas (1 %), bosque de pino-encino (20 %), BN (51 %), pastizal (24 %), cultivos temporales de maíz (1 %) y plantaciones de café (3 %) (Muñoz-Villers *et al.* 2016). Altitudinalmente el BN está ubicado entre los 1.200 y 2.100 m s.n.m. en esta región, y se caracteriza por especies como *Oreopanax xalapensis* (Kunth) Decne y Planch, *Liquidambar styraciflua* L., *Carpinus tropicalis* (Donn. Sm.) Lundell, *Clethra macrophylla* M. Martens y Galeotti, *Quercus corrugata* Hook, *Quercus lancifolia* Schltld y Cham, y *Hedyosmum mexicanum* C. Cordem (Williams-Linera *et al.* 2013).

El material parental de la cuenca está conformado de brechas andesíticas intemperizadas y saprolita fracturada, con suelo dominante clasificado como Andosol úmbrico. Estos suelos están caracterizados por tener bajas densidades aparentes (0,25-0,45 g cm⁻³) con una secuencia de horizontes A, AB, Bw, Bw/C (Muñoz-Villers *et al.* 2016).

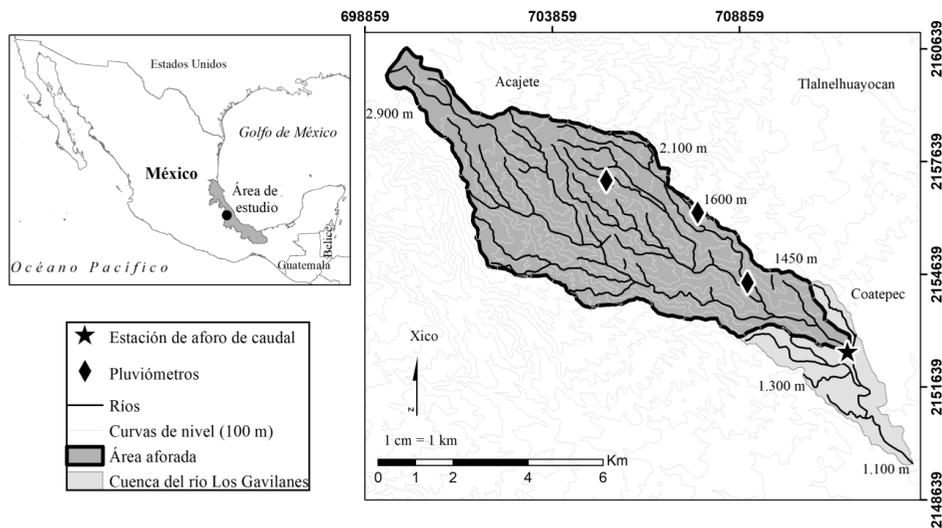


Figura 1. Ubicación del área de estudio e instrumentación en la cuenca.

Location of the study area and instrumentation in the catchment.

Instrumentación y medición de variables hidrometeorológicas. Se instalaron dos pluviómetros automáticos HOBO RGM3 (Onset, resolución de 0,2 mm por golpe), uno en la parte baja (1.450 m s.n.m.) y el otro en la parte media-alta de la cuenca (2.100 m s.n.m.) (figura 1), mientras que en la parte media-baja (1.600 m s.n.m.) se instaló un pluviómetro automático TR-525M (Texas Electronics, resolución de 0,1 mm por golpe). Todos los pluviómetros fueron programados para medir acumulados de lluvia cada 5 min. Los pluviómetros ubicados a los 2.100 y 1.450 m s.n.m. registraron lecturas durante todo el periodo de estudio (año hidrológico mayo 2015-abril 2016), mientras que el pluviómetro ubicado a los 1.600 m s.n.m. solo registró lecturas durante la época de lluvias, y esos datos fueron utilizados específicamente para el análisis de hidrogramas en esa temporada.

Para el monitoreo de caudales, el sitio de aforo se ubicó 6 km² aguas arriba del cierre de la cuenca (figura 1), por tanto, el área aforada fue de 35 km² equivalente al 83 % de la superficie total de la cuenca. El sitio fue instrumentado con un limnógrafo y un barómetro (HOBO U20 Onset), ambos transductores de presión, con una resolución de medición de ± 2 mm. La frecuencia de muestreo del limnógrafo y barómetro fue de 5 y 10 min, respectivamente. A partir de ellos se obtuvo la columna de agua del río (m) convertida posteriormente a valores de caudal (m³ s⁻¹), utilizando la curva de altura de agua-caudal construida con 13 aforos realizados a distintas alturas del río, empleando el método de trazador químico (Moore 2004, 2005). Brevemente, este método consistió en verter de golpe un volumen de agua (15 L) con sal de mesa (3 kg) aguas arriba (26 m) del sitio de aforo. En este sitio, la conductividad eléctrica del río (CE) fue registrada con un multiparamétrico portátil (PC450 Oakton) cada 5 s, hasta que la CE regresó a su valor inicial (Ecuación 1). Cada aforo, consistió en tres ensayos y a partir de ellos, se obtuvo un valor promedio de caudal. Posteriormente, el caudal fue convertido a unidades de mm utilizando el área de la cuenca. Más información sobre los métodos referirse a los trabajos de Guzmán-Huerta (2017, 2019).

$$Q = \frac{V}{k\Delta t \sum (CE(t) - CE_b)} \quad [1]$$

Donde,

Q = caudal (m³ s⁻¹).

V = Volumen de agua vertido (m³).

k = Constante de calibración (cm μs⁻¹).

Δt = Intervalo de tiempo de medición de la conductividad eléctrica (s).

$CE(t)$ = Conductividad eléctrica del agua del río, por intervalo de tiempo (μs cm⁻¹).

CE_b = Conductividad eléctrica inicial del agua del río (μs cm⁻¹).

Posteriormente, las estimaciones de caudal obtenidas con el método de trazador químico fueron corroboradas

con mediciones de caudal, utilizando el método de aforo área-velocidad, las cuales se realizaron de forma simultánea al método de trazador ($n = 8$). Para ello, la velocidad del río fue medida con un molinete marca AquaCal 5000 (JBS Instruments) cada 1,2 m sobre la sección transversal de aforo del río definida. Las mediciones de velocidad se realizaron tanto en superficie (5 %) como a profundidad (60 %) en la columna de agua. Para más información consultar el trabajo de Guzmán-Huerta (2017).

Análisis de datos. Las series de datos de precipitación fueron remuestreadas a escala horaria, diaria y mensual, identificando los eventos de precipitación a partir del remuestreo por hora. Un evento fue definido como aquel acumulado de lluvia ($P \geq 0,2$ mm) y separado uno de otro con al menos 3 horas de diferencia sin lluvia (Holwerda *et al.* 2010). Para cada evento se determinó la intensidad promedio (I_{prom} ; mm h⁻¹) y máxima ($I_{máx}$; mm h⁻¹), así como el tiempo de duración (T_d ; horas). En este caso, la I_{prom} fue calculada dividiendo P entre T_d , y para $I_{máx}$ se utilizó la cantidad máxima de lluvia reportada por evento. Para T_d , se cuantificó el tiempo entre el inicio y fin de cada evento.

Para asociar la respuesta del caudal a las entradas de precipitación, cada hidrograma fue comparado individualmente con los eventos de lluvia observados simultáneamente en las tres alturas (los registros del pluviómetro a 1.600 m s.n.m. abarcaron del 17 de junio al 31 de octubre de 2015). Como criterio, se asoció el hidrograma con la altitud que mostró el primer registro de lluvia, y en todos los casos, el tiempo de inicio de la lluvia siempre fue previo al ascenso del hidrograma.

Para identificar, separar y cuantificar los flujos rápido (Q_r) y base (Q_b) de los caudales en respuesta a eventos individuales de precipitación (hidrogramas), se tomaron en cuenta hidrogramas completos y bien definidos, asociados a eventos de precipitación > 1 mm. Cuando se presentaron dos eventos de lluvia consecutivos o más, estos fueron analizados conjuntamente para cuantificar mejor sus flujos. Además, se determinó el coeficiente de escurrimiento (Q/P ; adimensional) para analizar la proporción de precipitación que contribuyó a la formación del caudal por evento de lluvia.

Para conocer las aportaciones de los flujos (rápido y base) al caudal total del río por los distintos eventos de precipitación, se utilizó el método aproximado de separación de hidrogramas (Hewlett y Hibbert 1967). Con este método se obtuvieron los siguientes parámetros y métricas hidrológicas: caudal total (Q_T ; mm h⁻¹), flujo rápido (Q_r ; mm h⁻¹), flujo base (Q_b ; mm h⁻¹), pico de descarga ($Q_{máx}$; m³ s⁻¹), tiempo de pico (T_p ; horas), tiempo de retraso (L ; horas) y tiempo de recesión (T_r ; horas; figura 2). Asimismo, se determinó la precipitación antecedente (PA) calculado como el acumulado diario de precipitación durante los siete días previos a cada evento estudiado (McGuire y McDonnell 2010), con el fin de conocer las condiciones de humedad antecedentes.

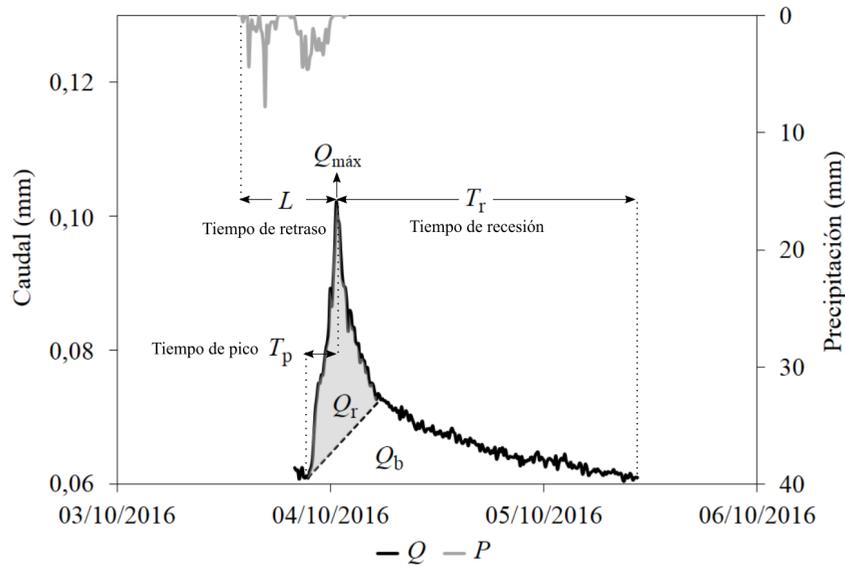


Figura 2. Ejemplo de un hidrograma descompuesto en flujo rápido y base, y representación de distintos tiempos de respuesta del hidrograma a un evento de lluvia dado en el río Los Gavilanes. Figura modificada de Guzmán-Huerta (2019). L es el tiempo de retraso, Q_b es el flujo base, $Q_{m\acute{a}x}$ es el pico de descarga, Q_r es el flujo rápido, T_p es el tiempo de pico y T_r es el tiempo de recesión.

Example of a hydrograph separated into quickflow and baseflow, and representation of different rainfall-runoff event time responses for a given precipitation event in Los Gavilanes river. Modified figure from Guzmán-Huerta (2019). L is the time lag, Q_b is the baseflow, $Q_{m\acute{a}x}$ is the peak discharge, Q_r is the quickflow, T_p is the time to peak discharge and T_r is the recession time.

Para evaluar diferencias significativas de los flujos (Q_r , Q_b y $Q_{m\acute{a}x}$) y los tiempos de respuesta (T_r , T_p y L) en función de la temporada de lluvias, de secas y cambios mensuales, se realizaron pruebas de Kruskal-Wallis de un solo factor, utilizando el método de Dunn's para la comparación múltiple por pares; el nivel de confianza utilizado fue de 0,05. Estas mismas variables fueron correlacionadas con las características de la lluvia (P , I_{prom} , $I_{m\acute{a}x}$ y T_d) y con la precipitación antecedente (PA) mediante pruebas de correlación de Spearman. Los análisis se realizaron en el programa SigmaPlot (versión 13.0, Systat Software Inc).

RESULTADOS

Precipitación. Durante el año hidrológico estudiado (mayo 2015-abril 2016), la precipitación fue mayor en la parte baja de la cuenca con 2.838 mm, mientras que en la parte media-alta fue de 2.545 mm. Durante la época de lluvias (mayo-octubre), la precipitación registrada en ambas altitudes fue en promedio de 1.989 mm, la cual se distribuyó en 177 eventos, aproximadamente. Asimismo, la época de lluvias se distinguió por presentar un patrón bimodal, observándose los máximos de lluvia en junio y septiembre. Para la época de secas (noviembre-abril), los acumulados de precipitación disminuyeron considerablemente, registrando la menor cantidad mensual en diciembre (figura 3).

Caudal. El caudal total observado fue de 1.394 mm, equivalente al 52 % de la precipitación anual. La figura 4 mues-

tra la variación temporal de la precipitación y del caudal del río durante el periodo investigado. Se observa que el caudal mensual fue máximo en septiembre (221 mm) y mínimo en febrero (51 mm).

Durante la época de lluvias, el caudal promedio diario fue de $5,1 \pm 1,5$ (σ) mm día⁻¹; observándose los valores máximos en septiembre (10,8 mm día⁻¹) y mínimos en mayo (2,4 mm día⁻¹) (cuadro 1). En cambio, el caudal promedio diario fue de $2,6 \pm 1,4$ (σ) mm día⁻¹ durante la época de secas, siendo máximo en noviembre (7,8 mm día⁻¹) y mínimo en marzo (0,8 mm día⁻¹).

Eventos de precipitación-escurrimiento: razones Q/P , flujos rápido y base y picos de descarga. En total, se analizaron 165 hidrogramas con $Q/P < 1$, y solo se presentaron cinco casos en los que Q/P fue > 1 , los cuales fueron excluidos del análisis. Para el 63 % de los eventos de precipitación-escurrimiento analizados, las respuestas del río estuvieron asociadas a lluvias registradas en la parte media-alta de la cuenca (2.100 m s.n.m.). Durante la temporada de lluvias, los eventos presentaron cantidades promedio de precipitación (P) de $22,6 \pm 19,2$ (σ) mm con intensidades promedio (I_{prom}) de $6,5 \pm 8,2$ (σ) mm h⁻¹ y máximas ($I_{m\acute{a}x}$) de $11,1 \pm 11,0$ (σ) mm h⁻¹, el tiempo de duración de la lluvia (T_d) fue de $6,2 \pm 5,9$ (σ) horas. En cambio, durante la época de secas la P fue de $11,4 \pm 13,5$ (σ) mm, I_{prom} de $1,6 \pm 1,7$ (σ) mm h⁻¹, $I_{m\acute{a}x}$ de $3,9 \pm 4,8$ (σ) mm h⁻¹ y T_d de $9,4 \pm 8,7$ (σ) horas.

A nivel mensual se observó que el valor promedio de Q/P varió relativamente poco durante la época de lluvias

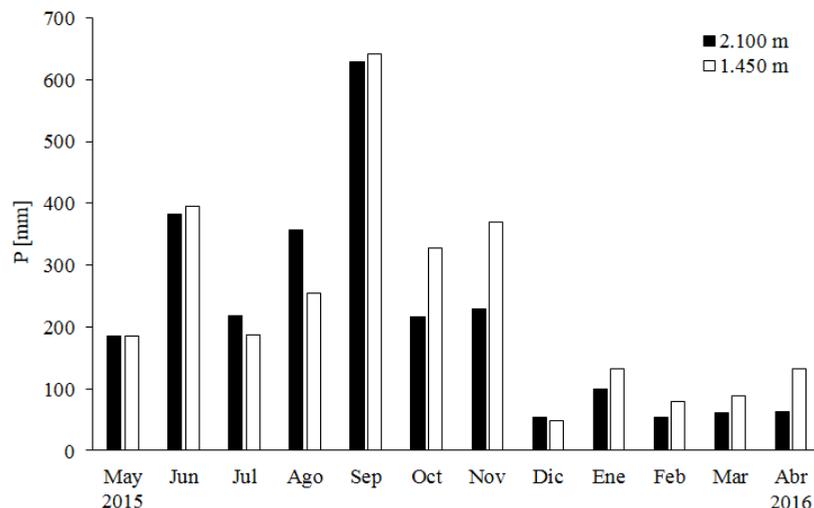


Figura 3. Precipitación mensual observada en las dos altitudes estudiadas.

Monthly rainfall observed at the two studied altitudes.

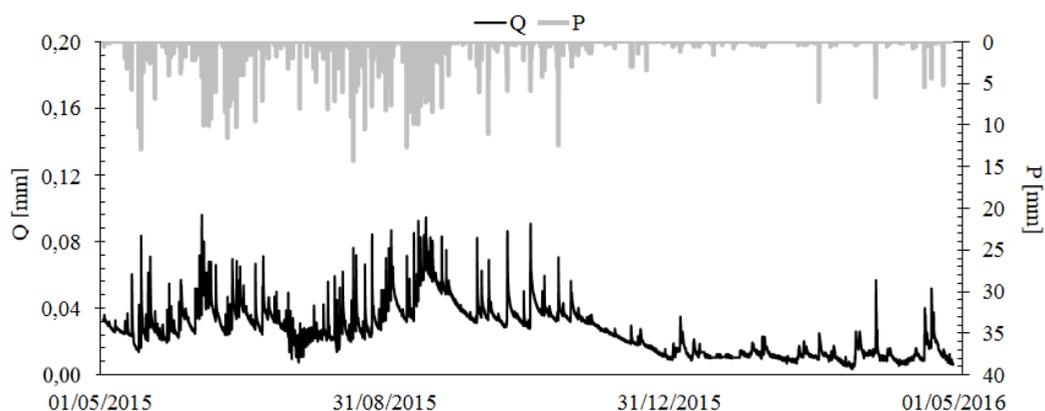


Figura 4. Precipitación (2.100 m s.n.m.) y caudal del río Los Gavilanes durante el año hidrológico mayo 2015-abril 2016. Ambas variables se muestran a una resolución de 10 min.

Rainfall (2,100 m a.s.l.) and streamflow of Los Gavilanes river during the hydrological year May 2015-April 2016. Both variables are presented at 10 min resolution.

($0,3 \pm 0,2 (\sigma)$), mientras que en la época de secas Q/P fue mayor en noviembre, enero y febrero ($0,4 \pm 0,2 (\sigma)$) y menor en marzo y abril ($0,2 \pm 0,1 (\sigma)$).

Del caudal total (Q_T) generado en respuesta a los eventos de lluvia, la aportación del flujo base (Q_b) y flujo rápido (Q_r) fue en promedio de $90,4 \pm 6,7 (\sigma) \%$ y $9,6 \pm 6,7 (\sigma) \%$, respectivamente (figura 5). Esto muestra una clara dominancia de Q_b sobre Q_r . Las mayores contribuciones de Q_b se observaron en julio (94,1 %) y noviembre (94,4 %), mientras que las mayores aportaciones de Q_r fueron registradas en mayo (12,1 %) y marzo (14 %).

Los picos de descarga abarcaron un rango de $0,5-7,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, con un promedio de $3,0 \pm 1,1 (\sigma) \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $1,7 \pm 1,0 (\sigma) \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para la época de lluvias y de secas, respectivamente.

En relación con la precipitación, las razones Q_b/P fueron relativamente pequeñas a nivel de evento y similares entre las temporadas de lluvias y secas ($27,3 \pm 18,4 (\sigma) \%$, y $29,1 \pm 15,3 (\sigma) \%$, respectivamente). Por otra parte, las razones Q_r/P obtenidas fueron en general bajas siendo de $2,4 \pm 1,7 (\sigma) \%$ y $3,2 \pm 3,6 (\sigma) \%$ para la época de lluvias y de secas, respectivamente.

A escala mensual, los valores más altos de Q_b/P se observaron en los meses de julio (31,2 %; promedio), noviembre (38,0 %), enero (31,2 %) y febrero (31,6 %); en cambio las menores aportaciones fueron reportadas al inicio de la época de lluvias (mayo: 22,5 %) y en la transición secas-lluvias (marzo-abril: 16,2-22,2 %). Respecto a las razones Q_r/P , los valores más altos fueron observados en el

Cuadro 1. Promedios diarios de caudal por mes durante el periodo estudiado.
Mean daily streamflow for each month during the study period.

Mes	Caudal mínimo (mm día ⁻¹)	Caudal máximo (mm día ⁻¹)	Caudal promedio ($\pm \sigma$) (mm día ⁻¹)
Mayo	2,4	5,6	3,9 \pm 0,6
Junio	3,5	8,0	5,4 \pm 1,2
Julio	2,5	6,6	4,3 \pm 1,1
Agosto	3,0	5,9	4,2 \pm 0,8
Septiembre	5,1	10,8	7,4 \pm 1,5
Octubre	4,3	7,0	5,3 \pm 0,6
Noviembre	4,2	7,8	5,4 \pm 0,8
Diciembre	1,5	4,0	2,8 \pm 0,7
Enero	1,4	3,6	1,8 \pm 0,5
Febrero	1,2	2,6	1,8 \pm 0,4
Marzo	0,8	3,0	1,8 \pm 0,6
Abril	1,0	3,9	1,9 \pm 0,8

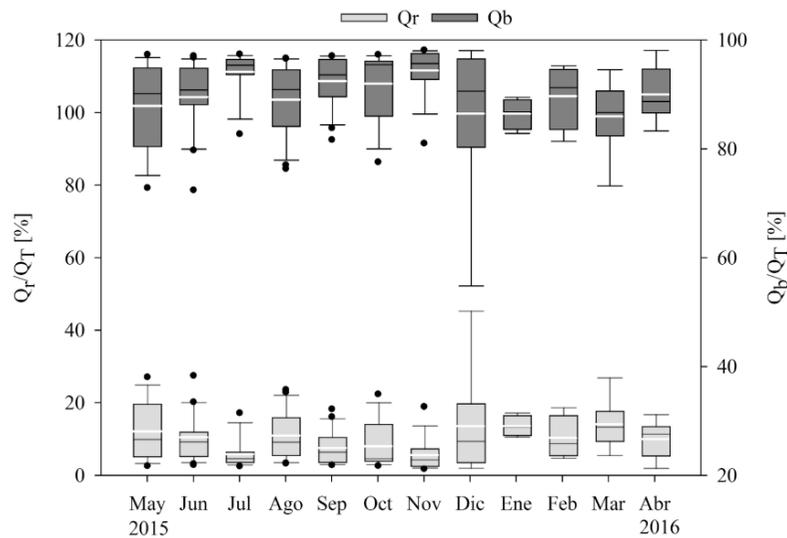


Figura 5. Distribución de las razones Q_b/Q_T y Q_r/Q_T por mes durante el periodo estudiado. La línea blanca representa el valor promedio y la línea negra el valor de la mediana.

Distribution of the Q_b/Q_T and Q_r/Q_T ratios per month during the studied period. The white line represents the mean value and the black line the median value.

periodo diciembre-febrero (4,7 %); mientras que los valores más bajos fueron observados en el mes de julio (1,7 %) y durante el periodo septiembre-noviembre (1,8 %) (figura 6).

Tiempos de retraso, de pico y de recesión del caudal. El análisis de hidrogramas mostró en promedio, un tiempo de retraso (L) de $4,0 \pm 3,0$ (σ) horas, un tiempo de pico (T_p) de $2,2 \pm 1,8$ (σ) horas y un tiempo de recesión (T_r) de

$13,7 \pm 9,5$ (σ) horas para la época de lluvias. En cambio, para la época de secas, el valor promedio de L fue de $7,1 \pm 4,8$ (σ) horas, T_p de $5,4 \pm 4,1$ (σ) horas y T_r de $14,7 \pm 10,9$ (σ) horas. Mensualmente se observaron los valores promedios más altos de L y T_p en febrero, mientras que los tiempos más cortos ocurrieron en mayo y septiembre. Respecto a T_r , los tiempos más prolongados tuvieron lugar en noviembre, enero y abril, y los más cortos en diciembre (cuadro 2).

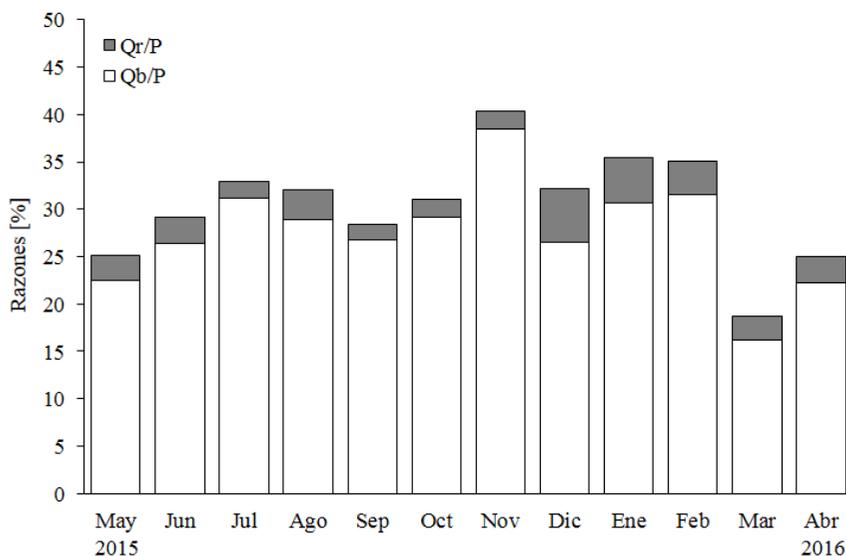


Figura 6. Contribución de la precipitación al flujo base y rápido (Q_b/P y Q_r/P) durante el periodo estudiado.
 Quickflow and baseflow contribution to rainfall (Q_b/P and Q_r/P) over the period study.

Cuadro 2. Estadística básica de las métricas obtenidas de los hidrogramas a nivel mensual durante el periodo estudiado.
 Statistics of monthly stream hydrograph metrics during the study period.

Mes	n (eventos)	Tiempo de retraso (L; horas)			Tiempo de pico (T_p ; horas)			Tiempo de recesión (T_r ; horas)		
		Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)
Mayo	16	1,2	7,3	3,6 \pm 1,7	0,2	4,5	1,7 \pm 1,2	0,5	27,2	12,9 \pm 7,6
Junio	24	1,5	6,2	3,7 \pm 1,4	0,2	5,3	2,1 \pm 1,3	2,2	23,2	12,9 \pm 6,5
Julio	12	1,2	12,8	4,0 \pm 3,0	0,5	9,0	2,9 \pm 2,3	1,7	41,0	15,7 \pm 13,8
Agosto	26	1,8	5,8	3,7 \pm 1,3	0,3	4,7	2,0 \pm 1,2	0,8	46,5	14,5 \pm 11,6
Septiembre	25	1,5	12,3	3,6 \pm 2,4	0,2	3,7	1,6 \pm 0,9	3,0	29,2	13,8 \pm 7,5
Octubre	15	1,8	26,3	6,1 \pm 6,6	0,7	11,5	3,5 \pm 3,6	1,7	43,3	12,7 \pm 11,7
Noviembre	14	1,7	14,0	5,6 \pm 3,2	0,5	8,3	3,8 \pm 1,9	1,2	40,0	16,5 \pm 13,1
Diciembre	6	2,3	7,2	4,1 \pm 1,7	1,7	7,0	3,4 \pm 2,1	2,5	19,3	10,5 \pm 7,5
Enero	4	4,2	8,5	7,2 \pm 2,1	2,7	7,3	5,5 \pm 2,0	9,5	35,7	17,0 \pm 12,5
Febrero	8	5,2	26,2	12,2 \pm 7,7	3,5	25,8	9,3 \pm 7,1	0,3	36,3	13,9 \pm 11,4
Marzo	6	3,2	13,8	7,2 \pm 3,8	2,2	12,0	6,1 \pm 3,5	2,0	21,8	15,2 \pm 8,5
Abril	9	2,5	13,8	6,9 \pm 4,0	1,8	12,3	5,3 \pm 3,5	9,7	41,2	22,4 \pm 16,6

Cambios estacionales en las características de los hidrogramas. Los análisis no sugirieron diferencias mensuales en los valores de Q_r , Q_r , T_r y T_p ($P > 0,05$). En cambio, sí se observaron diferencias mensuales en $Q_{máx}$ y Q_b ($P < 0,05$), siendo $Q_{máx}$ la variable con más cambios a lo largo del año.

A nivel estacional, en la época de lluvias solo mostró diferencias $Q_{máx}$ ($P \leq 0,001$) entre los últimos pares de me-

ses (jul.-ago. y sep.-oct.). En cambio, diferencias fueron observadas en los parámetros Q_b , T_p y L entre los tres primeros meses (nov.-ene.) y los tres últimos (feb.-abr.) de la época de secas ($P < 0,05$). Los parámetros L , T_p y $Q_{máx}$, mostraron diferencias en los primeros dos pares de meses de la época de secas (nov.-dic. y ene.-feb.: $P \leq 0,001$). A nivel estacional, los parámetros T_p , L y $Q_{máx}$ sugirieron

ser estadísticamente diferentes ($P \leq 0,001$), igualmente Q_T ($P = 0,036$) y Q_b ($P = 0,028$).

Influencia de las características de la lluvia y la precipitación antecedente en las propiedades de los hidrogramas. Al evaluar el efecto de las características de precipitación sobre los flujos y propiedades de los hidrogramas, se encontró que la cantidad de precipitación (P) y la intensidad máxima de lluvia ($I_{m\acute{a}x}$) presentaron altas correlaciones ($r_s \geq 0,56$) con los flujos Q_T , Q_r , Q_b , $Q_{m\acute{a}x}$ y el tiempo de recesión (T_p , cuadro 3). También se observaron correlaciones importantes ($r_s \sim 0,5$) entre el tiempo de duración de la lluvia (T_d) y los parámetros Q_T , Q_b , T_r y L ; así como la intensidad promedio de lluvia (I_{prom}) y la precipitación antecedente (PA) con los valores de $Q_{m\acute{a}x}$.

DISCUSIÓN

El presente trabajo es el primero en estudiar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Los Gavilanes, cubierta mayormente por bosque de niebla (51 %) sobre suelo Andosol, para lo cual fue indispensable instrumentarla, debido a la ausencia de estaciones hidrometeorológicas oficiales dentro de la cuenca. De haber utilizado datos de estaciones meteorológicas cercanas, las entradas de precipitación en la cuenca hubieran sido subestimadas en aproximadamente 300 mm para la época de lluvias (Shinbrot *et al.* 2020).

Por tratarse de una cuenca de mesoescala, fue un gran reto e implicó un enorme esfuerzo medir continuamente la precipitación y caudal del río a una alta resolución (5 y 10 min), para así conocer su variación a distintas escalas temporales y cuantificar métricas de respuesta del caudal a la precipitación. Previo a esto, fue necesario contrastar las estimaciones de caudal obtenidas con el método de aforo químico con el método área-velocidad, por tratarse de un río de quinto orden con altos flujos observados particular-

mente durante la época de lluvias. Respecto a los registros de lluvia, se recomienda densificar la red de pluviómetros sobre el rango altitudinal para robustecer aún más las observaciones. Esto debido a que hubo zonas en la cuenca (parte centro y sur) que por su poca accesibilidad no pudieron colocarse pluviómetros. Además, el presente trabajo examinó el comportamiento hidrológico de la cuenca durante un año hidrológico, sin embargo, se considera importante continuar su monitoreo a largo plazo, para así entender su dinámica a través del tiempo y conocer cómo influye la variabilidad climática y los eventos extremos (huracanes, sequías, etc.) en la dinámica de la cuenca.

Dinámica hidrológica de la cuenca del río Los Gavilanes. La dominancia del flujo base (90,4 %) al caudal de la cuenca estudiada, indica un fuerte control de los flujos subsuperficiales en la generación de caudales y, aunado al aumento de la contribución del flujo base conforme la época de lluvias transcurre, sugiere un aumento de la capacidad de almacenamiento y movilización del agua en el subsuelo por procesos de infiltración, percolación y recarga de agua en la cuenca, resultando en una mayor aportación del flujo subsuperficial al caudal total. Esta dominancia del flujo base es consistente con lo reportado por Muñoz-Villers y McDonnell (2012, 2013) en microcuencas de bosques de niebla maduro y secundario (0,1 y 0,3 km²) en la parte media-alta de Los Gavilanes, y también con lo que reporta López-Hernández (2019) en la cuenca vecina, el río Pixquiatic (107,3 km²), lo cual sugiere que los flujos subsuperficiales son los principales mecanismos de generación de caudal en estos ríos a lo largo del año. Por tanto, la provisión de agua en esta región está estrechamente asociada con las características edafológicas y geológicas de las cuencas, en particular, con su alta capacidad de infiltración (1.140-1.352 mm h⁻¹) y recarga de agua subterránea, vinculado a su baja densidad aparente (0,25-0,45 g cm⁻³), alta porosidad (69-89 %) y altas conductividades

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Spearman entre las características de precipitación y las métricas hidrológicas analizadas.
 Spearman correlation coefficients between precipitation characteristics and hydrological metrics.

	P (mm)		I_{prom} (mm h ⁻¹)		$I_{m\acute{a}x}$ (mm h ⁻¹)		T_d (horas)		PA (mm)	
	r_s	P	r_s	P	r_s	P	r_s	P	r_s	P
Q_T	0,84 ^a	< 0,001	0,38	< 0,001	0,66 ^a	< 0,001	0,50 ^b	< 0,001	0,18	0,023
$Q_{m\acute{a}x}$	0,65 ^a	< 0,001	0,54 ^a	< 0,001	0,72 ^a	< 0,001	0,09	0,246	0,51 ^b	< 0,001
Q_r	0,83 ^a	< 0,001	0,47	< 0,001	0,67 ^a	< 0,001	0,39	< 0,001	-0,04	0,616
Q_b	0,82 ^a	< 0,001	0,36	< 0,001	0,64 ^a	< 0,001	0,51 ^b	< 0,001	0,21	0,007
T_p	0,03	0,748	-0,34	< 0,001	-0,25	0,001	0,45	< 0,001	-0,39	< 0,001
T_r	0,76 ^a	< 0,001	0,30	< 0,001	0,56	< 0,001	0,50 ^b	< 0,001	-0,09	0,268
L	-0,07	0,382	-0,46	< 0,001	-0,33	< 0,001	0,49 ^b	< 0,001	-0,37	< 0,001

Se resaltan las mayores correlaciones con los superíndices a para $r_s > 0,5$ y b para $r_s = 0,5$.

hidráulicas del suelo ($615\text{-}777\text{ mm h}^{-1}$) (Muñoz-Villers *et al.* 2012, Muñoz-Villers y McDonnell 2013). El trabajo de Muñoz-Villers *et al.* (2016) cuantificaron también los tiempos de residencia de flujo base empleando técnicas de isótopos estables del agua ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$), en subcuencas ($0,1\text{-}34\text{ km}^2$) de Los Gavilanes. Sus resultados mostraron tiempos de residencia promedio de 1,9 años, lo cual refleja nuevamente la gran capacidad de almacenamiento de este sistema. Además, estos tiempos están correlacionados con la fisiografía, topografía, permeabilidad y tipo de cubierta vegetal de las cuencas. Así mismo, la poca perturbación de la cubierta forestal de la zona podría ser un factor importante, al permitir la interceptación de lluvia, reduciendo la erosión y pérdida de suelo, conservando así sus características hidrofísicas naturales que influyen en el proceso de infiltración (Muñoz-Villers y McDonnell 2013), permitiendo, por consiguiente, la provisión y regulación del caudal a lo largo del año.

La contribución del flujo rápido al caudal total es del 9,6 % en promedio, presentando su máxima aportación en marzo (14 %), mes que además registra las más altas entradas de precipitación e intensidades de lluvia, lo cual podría indicar que escurrimientos por exceso de infiltración y/o exceso de saturación del suelo favorecen la generación de flujo rápido durante esos eventos. En general, la baja aportación del flujo rápido al caudal total sugiere una baja ocurrencia de flujos superficiales, lo cual se atribuye al buen drenaje de la cuenca y a su vez está ligado a las propiedades hidrofísicas del suelo. Comparando estos resultados con otras cuencas de bosque de niebla, la cuenca Zurita ($11,4\text{ km}^2$) localizada al sur de Ecuador con suelo de tipo Histosol (50 %) proveniente de rocas metamórficas, reporta un Q/P del 70 % con contribuciones del 89 y 11 % de flujo base y rápido al caudal total, respectivamente. En este caso la razón Q/P es mayor al contrastar con nuestro sitio de estudio, debido posiblemente a las fuertes pendientes (79 %) de la cuenca Zurita. Sin embargo, la similitud en la partición de los flujos puede deberse al porcentaje de cobertura de bosque de niebla (55 %) y sus suelos permeables (Crespo *et al.* 2011), características compartidas con Los Gavilanes.

El caudal anual observado en el río Los Gavilanes fue equivalente al 52 % de la precipitación anual registrada en la cuenca. Comparando con cuencas del río San Francisco en Ecuador ($35\text{-}75\text{ km}^2$), cubiertas en su mayoría por bosque de niebla sobre suelos Histosoles, Crespo *et al.* (2011) observaron altos valores de Q/P (75-81 %) en ellas, lo cual podría deberse a la rápida movilización del agua en esa región. Los tiempos relativamente cortos de residencia del agua obtenidos en las cuencas de Ecuador (0,7-0,9 años: Timbe *et al.* 2014), lo confirman también. En el caso de Los Gavilanes, los tiempos promedios de residencia del agua fueron de ~ 2 años (Muñoz-Villers *et al.* 2016). Esto sugiere una dominancia de flujos subsuperficiales profundos en la generación de caudales, debido a la profundidad de sus suelos y su alta permeabilidad, reflejado también en menores proporciones de Q/P .

Respuesta de la cuenca a eventos de precipitación: Flujos y métricas de hidrogramas. En general, se observan tiempos de respuesta promedios de los hidrogramas más prolongados durante la época de secas que en la de lluvias, lo cual puede deberse a menores cantidades de precipitación e intensidades de la lluvia combinado con bajos antecedentes de humedad, aplazando así la respuesta de la cuenca. Comparando los tiempos de reacción con la cuenca vecina del río Pixquiac durante la época de lluvias, nuestra cuenca muestra tiempos de pico más cortos (T_p : 2,2 h vs. 3,4 h, López-Hernández 2019), lo cual puede deberse a una mayor intensidad promedio (I_{prom} : $6,5\text{ mm h}^{-1}$ vs. $4,5\text{ mm h}^{-1}$) de sus eventos de lluvia y a su menor área (35 km^2 vs. $72,3\text{ km}^2$). En cambio, en la época de secas, Los Gavilanes registra un prolongado tiempo de retraso (L : 7,1 h vs. 2,8 h), lo cual podría deberse a su mayor cobertura boscosa (71 % vs. 46 %), y a las diferencias edáficas (suelos Acrisoles en el Pixquiac). Además de este estudio, no se encontraron más investigaciones que reporten métricas de hidrogramas con las cuales comparar nuestros resultados.

Por último, el análisis de correlaciones muestra que el caudal, flujos base y rápido están influenciados principalmente por la cantidad e intensidad máxima de los eventos de lluvia. En cambio, los distintos tiempos de respuesta del caudal se relacionaron más con el tiempo de duración de la lluvia. Adicionalmente, el pico de descarga y los tiempos de pico y retraso se asociaron también con la precipitación antecedente. Y el flujo base, aunque no muestra una relación significativa con la precipitación antecedente, sí se observaron aumentos en estos volúmenes a altos antecedentes de humedad.

Proyecciones de cambio climático para 2050 en México, prevén tanto aumentos (6 %) como disminuciones (20 %) en la precipitación durante la época de lluvias; en cambio para la época de secas podrían presentarse reducciones entre el 13 y 18 % (Hernández-Ochoa *et al.* 2018). Para el período 2070-2100 se estiman patrones interanuales de la lluvia más variables (6-47 %, coeficiente de variación), la cual podría reducir la precipitación entre el 33 y 65 % durante la época de lluvias (Fuentes-Franco *et al.* 2015). Por lo cual, los cambios en los patrones de precipitación podrían afectar directamente los mecanismos de generación del caudal, en donde eventos máximos de alta intensidad podrían acelerar la producción de los flujos superficiales, con un mayor impacto en la parte baja de la cuenca. Además, añadiendo la pérdida del bosque de niebla y su reemplazo por otra cubierta vegetal, afectaría directamente la generación de flujos, al alterar la capacidad de infiltración del suelo, su amortiguación a eventos extremos y su provisión de agua durante la época de secas. Por lo que es indispensable preservar y restaurar el bosque en estas regiones de montaña, para mantener el funcionamiento natural del ecosistema (Muñoz-Villers y McDonnell 2013), mitigando así las posibles afectaciones sobre los recursos hídricos y sus beneficios para la sociedad.

CONCLUSIONES

Esta investigación es la primera en reportar la dinámica hidrológica de una cuenca cubierta en su mayoría por bosque de niebla (51 %) sobre suelo Andosol de origen volcánico, la cual es responsable de la provisión de agua en un 90 % a ciudades y poblados situados en las partes bajas. Los resultados mostraron una contribución de la precipitación al caudal (~ 50 %) mucho menor a lo observado en otras cuencas de bosque de niebla (~ 75 %), lo cual se atribuye a la alta capacidad de almacenamiento y lenta movilización del agua a través de flujos subsuperficiales en la cuenca estudiada. En consecuencia, el flujo base fue el componente dominante del caudal a nivel estacional y anual.

Durante el periodo de estudio, los tiempos de recesión del caudal no presentaron cambios importantes a nivel estacional, por el contrario, los tiempos de retraso y pico fueron más cortos en la época de lluvias debido a condiciones antecedentes de humedad más altas, comparado con la época de secas. Las variables que más explicaron las contribuciones de los flujos rápido y base, al igual que los tiempos de retraso, pico y recesión, fueron la cantidad de precipitación, la intensidad máxima y, en menor medida, el tiempo de duración de los eventos de lluvia. Asimismo, la precipitación antecedente mostró una influencia en el flujo rápido y el tiempo de recesión, siendo también importante en la generación de flujos base en condiciones de humedad antecedente alto.

Por último, este trabajo ilustra la importancia de monitorear y estudiar cuencas de mesoescala en regiones tropicales de montaña, las cuales son responsables del suministro de agua para las zonas bajas. En este caso, mostramos que la cuenca del río Los Gavilanes es capaz de sostener caudales durante la época de secas y modular escurrimientos en respuesta a eventos de precipitación durante la época de lluvias, lo cual es resultado del tipo de vegetación y la alta permeabilidad de sus suelos en combinación con altas entradas de precipitación anual. Por consiguiente, conservar y proteger las áreas de bosque de niebla en la cuenca aseguraría la funcionalidad hidrológica de la cuenca y su provisión de agua a largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de la Sra. Refugio y del Sr. Leónides por permitirnos instalar pluviómetros en sus propiedades. Agradecemos también al Dr. Friso Holwerda, por compartirnos la serie de datos de lluvia a los 2.100 m s.n.m. Agradecemos el valioso apoyo en campo de Karol Granados, Rodrigo Gómez, Citlali Guzmán, Julieta Dapa, Friso Holwerda, Julieta López y Paulina Balcázar. Esta investigación fue financiada por la NSF-EUA (No. 1313804) y por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) otorgando esta última una beca para realizar estudios de maestría a A.G.H. (No. 465027) dentro del Posgrado en Ciencias de la Tierra-UNAM.

REFERENCIAS

- Arnold JG, MA Youssef, H Yen, MJ White, AY Sheshukov, AM Sadeghi, DN Moriasi, JL Steiner, DM Amatya, RW Skaggs, EB Haney, J Jeong, M Arabi, PH Gowda. 2015. Hydrological processes and model representation: impact of soft data on calibration. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 58(6): 1637-1660. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.58.10726>
- Birkel C, C Soulsby, D Tetzlaff. 2012. Modelling the impacts of land-cover change on streamflow dynamics of a tropical rainforest headwater catchment. *Hydrological Sciences Journal* 57(8): 1543-1561. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.728707>
- Bruijnzeel LA, M Kappelle, M Mulligan, FN Scatena. 2011a. Tropical montane cloud forest: State of knowledge and sustainability perspectives in a changing world. In Bruijnzeel LA, FN Scatena, LS Hamilton eds. *Tropical montane cloud forests: Science for Conservation and Management*. Cambridge, Reino Unido. Cambridge University Press. p. 691-740. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511778384.074>
- Bruijnzeel LA, M Mulligan, FN Scatena. 2011b. Hydrometeorology of tropical montane cloud forests: emerging patterns. *Hydrological Processes* 25: 465-498. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7974>
- Burt TP, JJ McDonnell. 2015. Whither field hydrology? The need for discovery science and outrageous hydrological hypotheses. *Water Resources Research* 51: 5919-5928. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014WR016839>
- Campos-Pinto L, CR De Mello, PR Owens, LD Norton, N Curi. 2016. Role of Inceptisols in the hydrology of mountainous catchments in southeastern Brazil. *Journal of Hydrologic Engineering* 21(2): 5015017-501501710. DOI: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001275](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001275)
- Cèlleri R, J Feyen. 2009. The hydrology of tropical Andean ecosystems: importance, knowledge status, and perspectives. *Mountain Research and Development* 29(4): 350-355. DOI: <https://doi.org/10.1659/mrd.00007>
- Clark KE, MA Torres, AJ West, RG Hilton, M New, AB Horwath, JB Fisher, JM Rapp, A Robles-Caceres, Y Malhi. 2014. The hydrological regime of a forested tropical Andean catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* 18: 8603-8650. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-18-5377-2014>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua, MX). 2020. Catálogo de estaciones hidrométricas. Consultado 18 mar. 2020. Disponible en <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- Crespo P, A Buecker, J Feyen, KB Vaché, H-G Frede, L Breuer. 2012. Preliminary evaluation of the runoff processes in a remote montane cloud forest basin using Mixing Analysis and Mean Transit Time. *Hydrological Processes* 26: 3896-3910. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.8382>
- Crespo PJ, J Feyen, W Buytaert, A Buecker, L Breuer, H-G Frede, M Ramírez. 2011. Identifying controls of the rainfall-runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology* 407: 164-174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>
- Fuentes-Franco R, E Coppola, F Giorgi, EG Pavia, GT Diro, F Graef. 2015. Inter-annual variability of precipitation over Southern Mexico and Central America and its relationship to sea surface temperature from a set of future projec-

- tions from CMIP5 GCMs and RegCM4 CORDEX simulations. *Climate Dynamics* 45: 425-440. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2258-6>
- García E. 2004. Primera parte Modificaciones al sistema de Köppen. In García E, ed. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México. Instituto de Geografía-UNAM. p. 21-24.
- Guswa AJ, AL Rhodes, SE Newell. 2007. Importance of orographic precipitation to the water resources of Monteverde, Costa Rica. *Water Resources Research* 30: 2098-2112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.07.008>
- Guzmán-Huerta A. 2017. Respuesta hidrológica de una cuenca de bosque húmedo de montaña, centro de Veracruz, México. Tesis Licenciada en Ciencias de la Tierra. Ciudad Universitaria, México. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 54 p.
- Guzmán-Huerta A. 2019. Respuesta hidrológica de una cuenca de bosque tropical húmedo de montaña y su asociación con eventos meteorológicos a diferentes escalas temporales. Tesis Maestra en Ciencias de la Tierra. Ciudad Universitaria, México. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 94 p.
- Hernández-Ochoa IM, S Asseng, BT Kassie, W Xiong, R Robertson, DNL Pequeno, K Sonder, M Reynolds, MA Babar, AM Milan, G Hoogenboom. 2018. Climate change impact on Mexico wheat production. *Agricultural and Forest Meteorology* 263: 373-387. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.008>
- Hewlett JD, AR Hibbert. 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In Sopper WE, HW Lull eds. Forest hydrology. New York, USA. Pergamon Press. p. 275-290.
- Holwerda F, LA Bruijnzeel, LE Muñoz-Villers, M Equihua, H Asbjornsen. 2010. Rainfall and cloud water interception in mature and secondary lower montane cloud forests of central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology* 384 (1-2): 84-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.012>
- Holwerda F, LA Bruijnzeel, VL Barradas, J Cervantes. 2013. The water and energy exchange of a shaded coffee plantation in the lower montane cloud forest zone of central Veracruz, Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology* 173: 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.12.015>
- Kapos V, B Rhind, M Edwards, MF Price, C Ravilious. 2000. Developing a map of the world's mountain forests. In Price MF, N Butt eds. Forests in sustainable mountain development: a state of knowledge report for 2000. Task force on forests in sustainable mountain development. Reino Unido. CABI Publishing in association with The International Union of Forestry Research Organizations (IUFRO). p. 4-8.
- López-Hernández J. 2019. Comportamiento hidrológico a varias escalas temporales de una cuenca periurbana, centro de Veracruz, México. Tesis Licenciada en Ciencias de la Tierra. Ciudad Universitaria, México. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 45 p.
- McGuire KJ, JJ McDonnell. 2010. Hydrological connectivity of hillslopes and streams: Characteristic time scales and nonlinearities. *Water Resources Research* 46: W10543. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010WR009341>
- Mello CR, LF Ávila, H Lin, MCNS Terra, NA Chappell. 2019. Water balance in a Neotropical forest catchment of southeastern Brazil. *Catena* 173: 9-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.046>
- Moore R.D. 2004. Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement part II: Constant-rate injection. *Streamline Watershed Management Bulletin* 8(1): 11-15.
- Moore R.D. 2005. Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement part III: slug injection using salt in Solution. *Streamline Watershed Management Bulletin* 8(2): 1-6.
- Mulligan M. 2011. Modeling the tropics-wide extent and distribution of cloud forest and cloud forest loss, with implications for conservation priority. In Bruijnzeel LA, FN Scatena, LS Hamilton eds. Tropical montane cloud forest: Science for Conservation and Management. Cambridge, Reino Unido. Cambridge University Press. p. 14-38. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511778384.004>
- Muñoz-Villers LE, DR Geissert, F Holwerda, JJ McDonnell. 2016. Factors influencing stream baseflow transit times in tropical montane watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences* 12: 1621-1635. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-20-1621-2016>
- Muñoz-Villers LE, F Holwerda, M Gómez-Cardenas, M Equihua, H Asbjornsen, LA Bruijnzeel, BE Marín-Castro, C Tobón. 2012. Water balances of old-growth and regenerating montane cloud forests in central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology* 462-463: 52-63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.062>
- Muñoz-Villers LE, F Holwerda, MS Alvarado-Barrientos, D Geissert, BE Marín-Castro, A Gómez-Tagle, J McDonnell, H Asbjornsen, T Dawson, LA Bruijnzeel. 2015. Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque* 36(3): 395-407. DOI: <http://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300007>
- Muñoz-Villers LE, JJ McDonnell. 2012. Runoff generation in a steep, tropical montane cloud forest catchment on permeable volcanic substrate. *Water Resources Research* 48: 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011WR011316>
- Muñoz-Villers LE, JJ McDonnell. 2013. Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 3543-3560. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-17-3543-2013>
- Quintero M, S Wunder, RD Estrada. 2009. For services rendered? Modeling hydrology and livelihoods in Andean payments for environmental services schemes. *Forest Ecology and Management* 25 (9): 1871-1880. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.04.032>
- Ramírez BH, AJ Teuling, L Ganzeveld, Z Hegger, R Leemans. 2017. Tropical Montane Cloud Forest: Hydrometeorological variability in three neighbouring catchments with different forest cover. *Journal of Hydrology* 552: 151-167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.023>
- Roa-García MC, S Brown, H Schreier, LM Lavkulich. 2011. The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. *Water Resources Research* 47: W05510. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010WR009582>
- SEMAR (Secretaría de Marina de México, MX). 2020. Red de estaciones meteorológicas. Consultado 20 feb. 2020. Disponible en https://meteorologia.semar.gob.mx/red_emas_ligero_maps.html

- Shinbrot XA, L Muñoz-Villers, A Mayer, M López-Portillo, K Jones, S López-Ramírez, C Alcocer-Lezama, M Ramos-Escobedo, R Manson. 2020. Quiahua, the First Citizen Science Rainfall Monitoring Network in Mexico: Filling Critical Gaps in Rainfall Data for Evaluating a Payment for Hydrologic Services Program. *Citizen Science: Theory and Practice* 5(1): 1-15. DOI: <https://doi.org/10.5334/cstp.316>
- Timbe E, D Windhorst, P Crespo, H-G Frede, J Feyen, L Breuer. 2014. Understanding uncertainties when inferring mean transit times of water trough tracer-based lumped-parameter models in Andean tropical montane cloud forest catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 18: 1503-1523. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-18-1503-2014>
- Timbe E, J Feyen, L Timbe, P Crespo, R Célleri, D Windhorst, H-G Frede, L Breuer. 2017. Multicriteria assessment of water dynamics reveals subcatchment variability in a seemingly homogeneous tropical cloud forest catchment. *Hydrological Processes* 31: 1456-1468. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.11146>
- Williams-Linera G. 2012. El bosque de niebla del centro de Veracruz: ecología, historia y destino en tiempos de fragmentación y cambio climático. Xalapa, México. CONABIO-Instituto de Ecología A.C. 208 p.
- Williams-Linera G, M Toledo-Garibaldi, C Gallardo-Hernández. 2013. How heterogeneous are the cloud forest communities in the mountains of central Veracruz, Mexico? *Plant Ecology* 214: 685-701. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11258-013-0199-5>

Recibido: 08/10/20

Aceptado: 29/03/21

