

Caracterización y modelado hidrometeorológico en la cuenca del río Atulapa, Guatemala

Characterization and hydrometeorological modeling in the Atulapa River basin, Guatemala

Guillermo Santos¹, Jorge Faustino², Ruperto Quezada²

¹Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

² Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (Docinade), Costa Rica.

*Autor al que se dirige la correspondencia: santos.guillermo@usac.edu.gt

Recibido: 26 de octubre 2016 / Revisión: 16 de noviembre 2017 / Aceptado: 05 de diciembre 2017

Resumen

Los modelos hidrometeorológicos, facilitan el control, monitoreo y planificación del recurso agua en cuencas hidrográficas, representando variables meteorológicas de forma distribuida. El objetivo del estudio, es proponer modelos hidrometeorológicos bidimensionales para cuantificar de forma precisa, las variables básicas que determinan la dinámica del recurso hídrico en la cuenca del río Atulapa, Esquipulas, departamento de Chiquimula, Guatemala. Se generaron y recopilamos datos hidrometeorológicos, con estaciones digitales instaladas y estaciones locales. Para el desarrollo de los modelos se elaboró una correlación entre altitud de las estaciones meteorológicas, como variable explicativa y registros climáticos como variable de respuesta. El modelo de escorrentía es una correlación entre alturas limnimétricas en la estación hidrométrica, como variable explicativa y el caudal óptimo de los aforos como variable de respuesta. La precipitación media de la cuenca obtenida con los modelos generados, es de 1,884 mm/año y la temperatura media de 18.92°C. El cambio de temperatura entre la parte baja y alta disminuye a razón de 1°C por cada 175 m.snm. El caudal medio anual es a razón de 0.5 m³/seg en la estación hidrométrica del Puente. Los modelos hidrometeorológico generados en la cuenca del río Atulapa representaron la variabilidad climática en forma bidimensional, permitiendo un control y monitoreo del recurso hídrico en la cuenca, para la planificación del uso sostenible. La orografía en la cuenca, definió la estrecha relación con las variables meteorológicas precipitación y temperatura obteniendo modelos de regresión lineal precisos.

Palabras claves: Hidrología, correlación, orografía, precipitación, temperatura

Abstract

The hydrometeorological models facilitate the control and monitoring of the water resource in watersheds, representing meteorological variables in a distributed way, for the planning of the water resource. The objective of the study is to propose two-dimensional hydrometeorological models to accurately quantify the basic variables that determine the dynamics of water resources in the Atulapa River basin, Esquipulas, department of Chiquimula, Guatemala. Hydrometeorological data were generated and collected, with installed digital stations and local stations. For the development of the models, a correlation was made between the altitude of the meteorological stations, as an explanatory variable and climatic records as a response variable. The runoff model is a correlation between limnimetric heights in the hydrometric station, as an explanatory variable and the optimum flow of the gauging as a response variable. The average precipitation of the basin obtained with the generated models is 1,884 mm/year and the average temperature is 18.92°C. The temperature change between the low and high part decreases at a rate of 1°C for every 175 masl. The average annual flow is at a rate of 0.5 m³/sec at the Puente hydrometric station. The hydrometeorological models generated in the Atulapa River basin represented the climatic variability in two-dimensional form, allowing a control and monitoring of the water resource in the basin, for the planning of the sustainable use. The orography in the basin, defined the close relationship with meteorological variables precipitation and temperature obtaining accurate linear regression models.

Keywords: Hydrology, correlation, orography, precipitation, temperature

Introducción

En la actualidad la generación de modelos espaciales, juega un papel fundamental en el control y monitoreo del recurso hídrico en cuencas hidrográficas. El análisis de distribución de las diferentes variables meteorológicas, reflejan los cambios en la disminución o aumento de un registro a causa de factores como: la altitud, el relieve del terreno y la presión atmosférica (Mesa, Poveda, Carvajal, & Salazar, 1994).

Los modelos para el análisis hidrometeorológico pueden ser estocásticos o determinísticos. Los primeros toman en cuenta series de registros extensos donde la estadística juega un papel fundamental, mientras los segundos lo principal es, analizar una variable explicativa y de respuesta (Chow, Maidment, & Mays, 1994). En los países con escasos registros hidrometeorológicos donde se dificulta realizar un análisis estocástico, los modelos determinísticos son los más apropiados (Ponce, 1994). Entre los modelos determinísticos se tienen los algoritmos y los modelos de correlación lineal.

Los algoritmos que representan los modelos de elevación digital, facilitan la simulación hidrológica como se utilizó en algunas localidades de Argentina, donde la altitud es relacionada con las variables meteorológicas (Pusineri, Pedraza, & Lozeco, 2010).

Los modelos de correlación lineal se han utilizado para la estimación espacial de la precipitación, como es el caso del valle de la ciudad de México, donde proporcionaron información para la simulación de escenarios y la representación espacial de las isoyetas (Díaz, Herrera, & Valdés, 2009). Muy similar al estudio elaborado por Becerra y Gutiérrez (2006), sobre la modelación hidrológica empleando isoyetas de relieve, una aproximación geoestadística en base a la orografía como barrera natural en los cambios meteorológicos en una cuenca.

En Colombia, se utilizó con series históricas de precipitación y temperatura del aire a 2 m sobre la superficie, registradas en estaciones meteorológicas, se calcularon las normales para el periodo 1961-1990. Los modelos de correlación permiten determinar con una relativa buena aproximación, los valores de temperatura para cualquier sitio ubicado en Colombia con solo obtener su altitud. (Burrough & McDonnell, 1998). Adicionalmente, los modelos permiten establecer la existencia de grandes diferencias entre las regiones, producto de los factores de latitud, topografía y orientación de las cordilleras, demostrado el trabajo realizado sobre la distribución espacial y temporal de la temperatura y la

precipitación en Colombia, evaluado por Pabón, Eslava y Gómez (2001).

El desarrollo de modelos hidrológicos digitales en aproximaciones raster, resulta una alternativa interesante para superar la escasez de datos hidrológicos y climáticos en la región del valle de Lerma, Argentina. Se ensayaron diferentes metodologías en un Sistema de Información Geográfica para definir, en espacios territoriales continuos, las variables: precipitación, temperatura, caudales máximos y pérdida de suelos. Los modelos que resultaron con mayor ajuste, fueron: regresiones con altitud y latitud para las variables climáticas (Belmonte & Núñez, 2006).

Una perspectiva de trabajo futuro es la inclusión de la topografía como variable secundaria, ya que generalmente está correlacionada con la precipitación y serviría de alternativa para los casos donde se cuenta con pocos pluviógrafos o no se posea imágenes de radar (Díaz et al., 2009).

El Servicio Nacional de Estudios Territoriales (Snet) en el 2005 realizó el estudio del Balance hídrico integrado y dinámico en El Salvador, utilizaron modelos para representar la distribución de variables meteorológicas correlacionando altitud y evapotranspiración de referencia que depende de la temperatura media mensual, los resultados fueron satisfactorios observando la dinámica espacial.

En Guatemala a finales de la década de los setenta e inicio de los ochenta, se instalaron equipos para la medición de variables meteorológicas e hidrológicas; actualmente no hay suficiente equipo hidrometeorológico, lo que dificulta la generación de escenarios en un país con gran variabilidad climática (Santos, 2017).

En consecuencia, en la última década, la evolución de los medios de transmisión de datos y representación espacial de registros, permitió la descentralización en los servicios técnicos científicos que el estado prestaba a la población, como la publicación de registros hidrometeorológicos a través de sistemas de información geográfica (Santos, 2017).

El modelo distribuido meteorológico (precipitación y temperatura) obtenido en la presente investigación, sustituye a los métodos de distribución de variables meteorológicas como: polígonos de Thiessen o Isoyetas. El objetivo de la presente investigación, es la generación de modelos hidrometeorológicos para el control y monitoreo del recurso hídrico en la cuenca del río Atulapa. Se instalaron estaciones hidrometeorológicas digitales, y se recopilaron registros de estaciones locales para la generación de los modelos.

Materiales y métodos

El área de investigación abarca la cuenca del río Atulapa, tiene una extensión de 42.72 km², se localiza en el municipio de Esquipulas parte sur-oriente del departamento de Chiquimula, Guatemala, Centroamérica (Figura 1). La cuenca del río Atulapa forma parte de la subcuenca del río Olopa, que a su vez corresponde a la parte alta de la cuenca del río Lempa en El Salvador de interés trinacional (Comisión Trinacional Trifinio, 2007; Instituto Geográfico Nacional, 2009)

El principal río de la cuenca es el Atulapa, tiene una longitud de 17.60 km desde su nacimiento en los caseríos El Duraznal y Plan de la Arada, hasta su punto de aforo donde se une al río Olopa. Sus principales afluentes son: Quebrada Raspada, Quebrada de Piedra, Liquidambar y Paxashtal (García, 2010).

Estaciones hidrometeorológicas

Se instalaron estaciones hidrometeorológicas, para generar registros del 2012 al 2016 en: El Limón, Plan de la Arada y El Puente, por medio de un proyecto del Fondo para el Desarrollo Científico y Tecnológico (Fodecyt). Se recopilaron los registros meteorológicos del 1971 al 2016, para la estación Esquipulas, perteneciente al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh), en Guatemala y registros de la estación Montecristo del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (Snet) en El Salvador (Tabla 1).

Se evaluó la consistencia de los registros climáticos de las estaciones meteorológicas, a través del análisis por el método doblemente acumulativo (Chow et al., 1994). El análisis doblemente acumulativo, determinó la consistencia de los registros a través de un gráfico

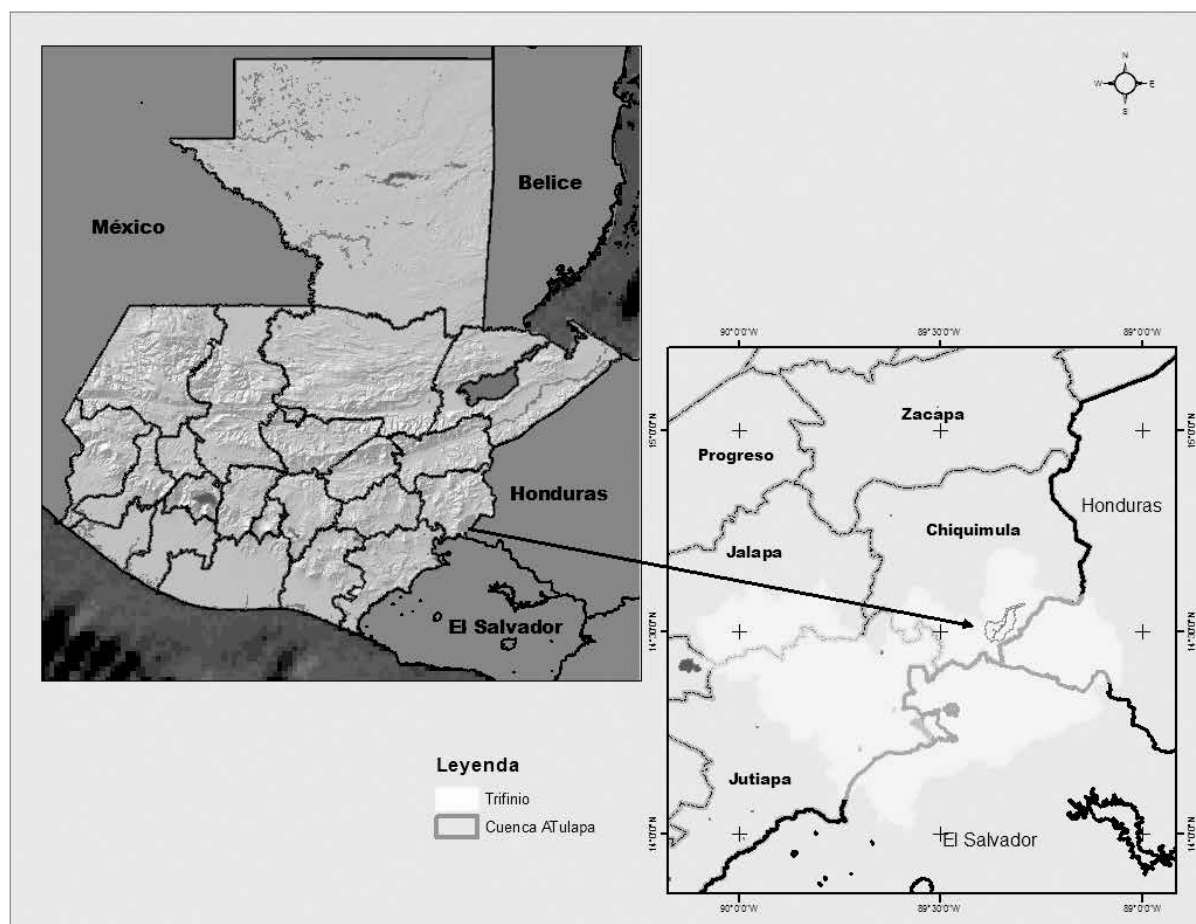


Figura 1. Ubicación geográfica cuenca río Atulapa.

Tabla 1
Listado de estaciones meteorológicas en la cuenca del río Atulapa

Planes de Montecristo A-31 SNET El Salvador año 1973 - 2016	Departamento Santa Ana, El Salvador Meteorológica	Latitud Norte: 14° 24'00" Longitud Oeste: 89° 22'00" Elevación: 1,860 m
Esquipulas INSIVUMEH Guatemala año 1973 - 2016	Departamento Chiquimula, Guatemala. Meteorológica	Latitud Norte: 14° 29' 50.01" Longitud Oeste: 89° 21' 36" Elevación : 950 m
Plan de la Arada FODECYT 47-2011 Guatemala año 2012 - 2016	Departamento Chiquimula, Guatemala Meteorológica	Latitud Norte: 14° 29' 51.9" Longitud Oeste: 89°21'32.8" Elevación: 1,406 m
El Limón FODECYT 47-2011 Guatemala año 2012 - 2016	Departamento Chiquimula, Gua- temala Meteorológica	Latitud Norte: 14° 31' 39.7" Longitud Este: 89°20'47.1" Elevación: 1,298 m
El Puente FODECYT 47-2011 Guatemala año 2012 - 2016	Departamento Chiquimula, Gua- temala Est. Hidrométrica	Latitud Norte: 14°33'45.27" Longitud Este: 89°18'36.31" Elevación: 916 m

cartesiano, llevado sobre el eje de las “x” los valores acumulados de la estación en estudio y sobre el eje de las “y” los valores acumulados de la estación patrón, la fórmula es la siguiente:

$$F_c = S * (\text{Estación índice/Estación Satélite})$$

S = al valor de precipitación a corregir

Análisis de datos meteorológicos

Para evaluar los registros climáticos medios mensuales y anuales en la cuenca se utilizaron modelos de regresión. Los registros climáticos poseen un comportamiento orográfico, es decir que a más elevación se presenta mayor precipitación y menor temperatura. Se elaboró la correlación entre altitud de las estaciones meteorológicas como variable explicativa y registros climáticos de las estaciones como variable de respuesta, generando un modelo local para cada mes.

Simulación de escenarios meteorológicos

En el modelo generado por la regresión en su variable altitud se utilizó el modelo de elevación digital (raster) en un Sistema de Información Geográfica, con

resolución espacial de 30 x 30 m o sea 900 m² cada pixel, como variable explicativa para obtener la distribución de la precipitación y temperatura mensual como variables de respuesta.

Los modelos utilizados son los siguientes:

$$Y = a + b * X \text{ o sea } PP = a + b * MED$$

Donde PP es la precipitación media mensual, “a” el intercepto, “b” la pendiente y MED el Modelo de Elevación Digital

$$Y = a - b * X \text{ o sea } Temp = a + b * MED$$

Donde Temp es la temperatura media mensual, “a” el intercepto, “b” la pendiente y MED el Modelo de Elevación Digital

Determinación de la escorrentía superficial

Se realizó el monitoreo del caudal en la cuenca en una estación de aforo llamada El Puente, se colocó un limnómetro y se realizaron aforos con el método sección-velocidad, generando un modelo para determinar escorrentía a través de la curva de calibración de caudales (Horton, 1933; Linsley, 1967). El modelo, es

una correlación entre altura limnimétrica en la estación hidrométrica como variable explicativa y el caudal del aforo como variable de respuesta, permitió medir el caudal medio diario monitoreando el limnómetro dos veces por día. El método utilizado es el logarítmico, se basa en la experiencia demostrada que la curva de descarga queda representada por una parábola de orden superior, cuya expresión es la siguiente:

$$Q = 1(H-H_0)^{0.5253}$$

Donde:

H_0 : altura de la escala hidrométrica para la cual $Q = 0$;

H : altura de escala hidrométrica para el caudal que se quiere conocer;

n , K : constantes propias de la expresión analítica.

Los valores a obtenerse para el ajuste del método son los de H_0 , K y n

Resultados

Los modelos para la precipitación son regresiones y que poseen valores altos, con excepción en los meses de agosto, septiembre y abril, sin embargo el valor de la regresión es aceptable.

Precipitación media

En la Tabla 2 la precipitación pluvial media anual, constituye el parámetro climatológico más variable y el que posee mayor influencia sobre el ciclo hidrológico de la cuenca; para la estación Planes de Montecristo del Snet en El Salvador, se reportó una precipitación media de 2,174 mm/año durante 1971 a 2016; para la estación Esquipulas de Insivumeh de 1971 a 2016 se reportó una precipitación media de 1,638 mm/año. En las estaciones instaladas por el proyecto Fodecyt, se reportó en la estación meteorológica Plan de la Arada 1,903 mm/año y en la estación El Limón se reportó 1,822 mm/año. La mayor precipitación se representa en la estación Montecristo y la menor es para la estación Esquipulas, se observó una correlación con la altitud de cada estación meteorológica, como se representa en la Tabla 2, a mayor altitud mayor precipitación.

La temperatura media, constituye un parámetro climatológico de gran importancia y determinante en la evapotranspiración potencia y real, como las pérdidas principales en el ciclo hidrológico de la cuenca y se

representa en las Tabla 3. Se analizó información del Insivumeh en la estación Esquipulas, la cual reportó una temperatura media 21.81°C del 1972 al 2016, para la estación Planes de Montecristo de Snet en El Salvador se reportó 16°C del 1971 al 2016 (Snet, 2015). Las estaciones instaladas en el proyecto Fodecyt reportaron lo siguiente: Plan de la Arada, 18.4°C del 2012 al 2016 y la estación El Limón, 19.39°C del 2012 al 2016.

El cambio de temperatura entre Montecristo y Esquipulas es de 5.2°C con una diferencia de 910 m.snm a razón de 1°C por cada 175 m.snm hay una correlación inversa con la altitud y la temperatura media mensual y anual, (Tabla 3).

La Figura 2 representa la consistencia de información de la precipitación acumulada, entre la estación meteorológica Montecristo y Esquipulas del 1971 al 2016, historial adecuado de información meteorológica donde se analizó la variabilidad climática en eventos del fenómeno de El Niño y La Niña.

La Figura 3 representa la consistencia de información de la precipitación acumulada en las estaciones meteorológicas Plan de la Arada y Limón 2012 al 2016 para el proyecto Fodecyt.

Al realizar el gráfico de la precipitación entre las estaciones Esquipulas y Montecristo, se representa los años secos y lluviosos, que corresponden a eventos sobre el fenómeno de El Niño y La Niña, principalmente El Niño extraordinario que se presentó de 1997 a 1998, luego han ocurrido episodios con diferente intensidad (Figura 4).

La Figura 5 representa la precipitación entre la estación Limón y Plan de la Arada, con una disminución por el fenómeno de El Niño para el 2016, la precipitación varía en 125 mm entre las dos estaciones.

Precipitación media mensual de la cuenca

Los modelos de precipitación donde la orografía es determinante como las altas montañas del cerro Montecristo, en la cuenca del río Atulapa muestran altas correlaciones. La Tabla 4 representa el promedio del valor de $r^2 = 0.9575$ para los modelos de precipitación en los 12 meses es 0.9575.

La Figura 6 representa el período lluvioso en la cuenca, se registran dos puntos altos de precipitación, que normalmente ocurren en junio y septiembre, con precipitaciones mensuales de 317 hasta 450 mm, en septiembre, regularmente la mayor precipitación se localiza en la parte alta de la cuenca.

Tabla 2

Registros de precipitación media (desviación estándar) mensual en milímetros por año.

Estación	Alt.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Montecristo	1,860	12.3 (10.5)	11.0 (9.2)	29.6 (37.9)	80.6 (63.4)	245.9 (118.3)	413.5 (130.03)	311.2 (115.2)	332.5 (108.6)	435.6 (121.2)	222.5 (140.4)	57.3 (54.9)	22.3 (19.3)
Plan de la Arada	1,406	11.0 (15.2)	9.0 (8.3)	25.0 (21.1)	75.0 (38.2)	210.0 (82.3)	320.0 (98.2)	300.0 (112.3)	309.6 (99.3)	378.6 (122.5)	197.1 (102.8)	48.0 (29.2)	19.5 (9.8)
Limón	1,298	10.1 (11.3)	7.2 (6.9)	15.0 (21.2)	62.0 (39.8)	180.0 (89.2)	346.Si 2 (101.2)	286.9 (138.8)	290.0 (98.2)	365.9 (112.7)	192.2 (105.6)	47.2 (42.3)	19.2 (11.1)
Esquipulas	950	9.4 (6.8)	6.4 (5.6)	13.6 (18.9)	45.8 (44.3)	160.1 (77.7)	301.6 (103.8)	269.5 (121.2)	280.0 (106.8)	324.4 (123.2)	173.6 (94.5)	36.2 (31.4)	16.9 (12.6)

Nota. Altitud (m.snm) = Alt. Datos del Insivumeh 1972-2016, Snet 1973-2016.

Tabla 3

Datos de Temperatura media mensual en grados centígrados

Estación	Alt.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Montecristo	1860	14.3 (0.69)	15.0 (0.70)	16.2 (0.77)	17.2 (0.60)	17.2 (0.52)	16.8 (0.41)	16.8 (0.96)	16.9 (0.79)	16.4 (0.38)	15.9 (0.52)	15.1 (0.76)	14.4 (0.77)
Plan de la Arada	1406	17.0 (1.02)	17.7 (0.92)	18.2 (0.97)	18.1 (1.09)	20.5 (0.85)	19.8 (0.98)	19.7 (1.21)	19.5 (1.12)	18.9 (1.08)	18.7 (0.86)	16.8 (0.93)	16.9 (0.78)
Limón	1298	18.2 (1.18)	17.9 (1.22)	19.3 (0.89)	19.2 (1.01)	20.9 (0.92)	20.4 (1.08)	20.1 (0.98)	20.8 (1.22)	20.1 (0.92)	19.9 (1.05)	18.3 (0.88)	17.6 (0.91)
Esquipulas	950	19.6 (1.27)	20.5 (1.42)	22.3 (0.98)	23.6 (0.93)	23.7 (0.85)	22.7 (1.05)	22.6 (0.71)	22.8 (1.31)	22.4 (0.86)	21.6 (1.08)	20.3 (1.06)	19.6 (1.08)

Nota. Alt. = Altitud m.snm

Tabla 4

Ecuación mensual de altitud versus precipitación

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
$y = 0.0034x + 5.8985$ $r^2 = 0.9736$	$y = 0.0051x + 1.3213$ $r^2 = 0.9982$	$y = 0.0178x - 4.2177$ $r^2 = 0.9992$	$y = 0.0376x + 11.144$ $r^2 = 0.88$	$y = 0.0996x + 63.418$ $r^2 = 0.991$	$y = 0.1239x + 185.5$ $r^2 = 0.982$
Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
$y = 0.0435x + 230.43$ $r^2 = 0.900$	$y = 0.0611x + 223.6$ $r^2 = 0.899$	$y = 0.1166x + 214.66$ $r^2 = 0.87$	$y = 0.0653x + 105.23$ $r^2 = 0.999$	$y = 0.0244x + 13.642$ $r^2 = 0.9996$	$y = 0.006x + 11.183$ $r^2 = 0.9978$

Tabla 5

Ecuación de regresión mensual altitud versus temperatura

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
$y = -0.0057x + 25.004$ $r^2 = 0.9222$	$y = -0.006x + 26.225$ $r^2 = 0.9112$	$y = -0.0067x + 28.691$ $r^2 = 0.9411$	$y = -0.0071x + 30.387$ $r^2 = 0.8943$	$y = -0.0071x + 30.482$ $r^2 = 0.9056$	$y = -0.0065x + 28.939$ $r^2 = 0.8988$
Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
$y = -0.0063x + 28.629$ $r^2 = 0.8834$	$y = -0.0065x + 29.027$ $r^2 = 0.9028$	$y = -0.0066x + 28.611$ $r^2 = 0.9919$	$y = -0.0062x + 27.466$ $r^2 = 0.9325$	$y = -0.0057x + 25.792$ $r^2 = 0.9220$	$y = -0.0056x + 24.875$ $r^2 = 0.9821$

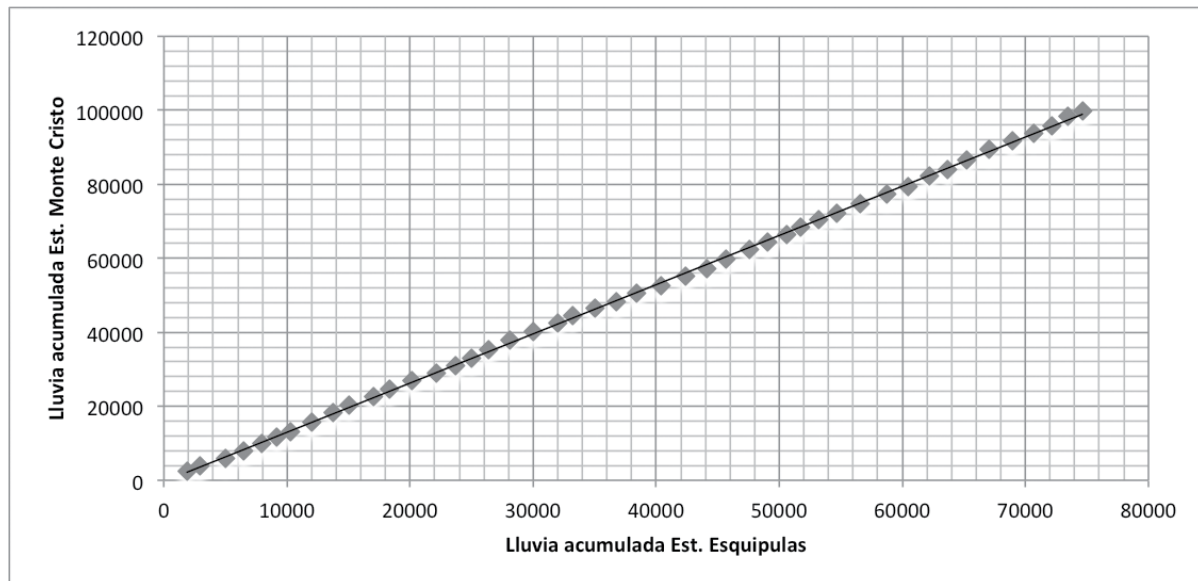


Figura 2. Análisis de consistencia estación Montecristo, Snet y Esquipulas, Insivumeh.

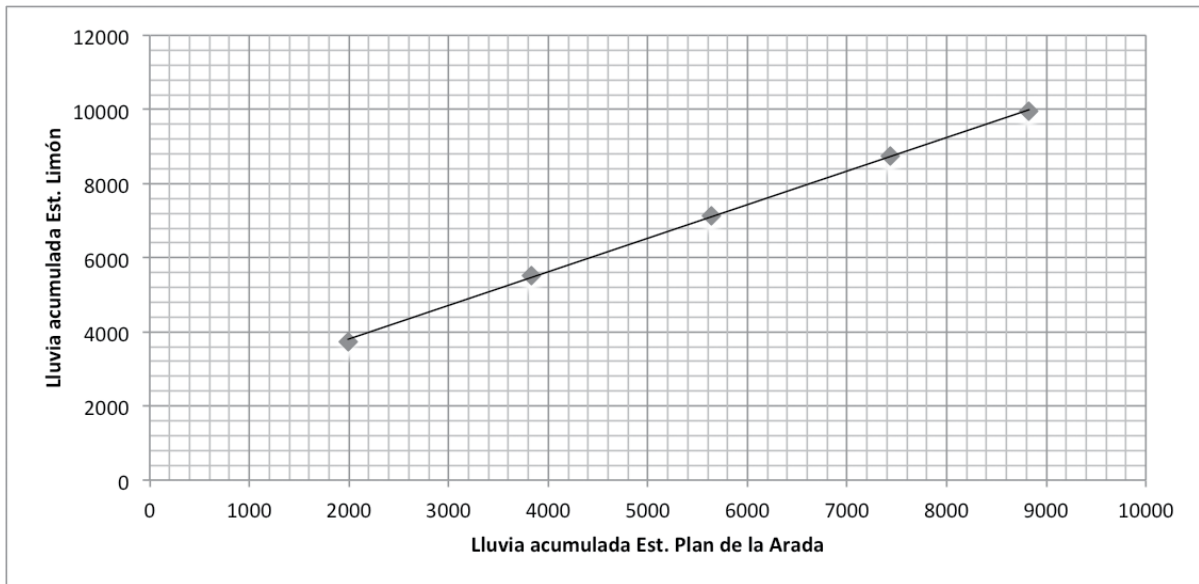


Figura 3. Análisis de consistencia Plan de la Arada y El Limón.

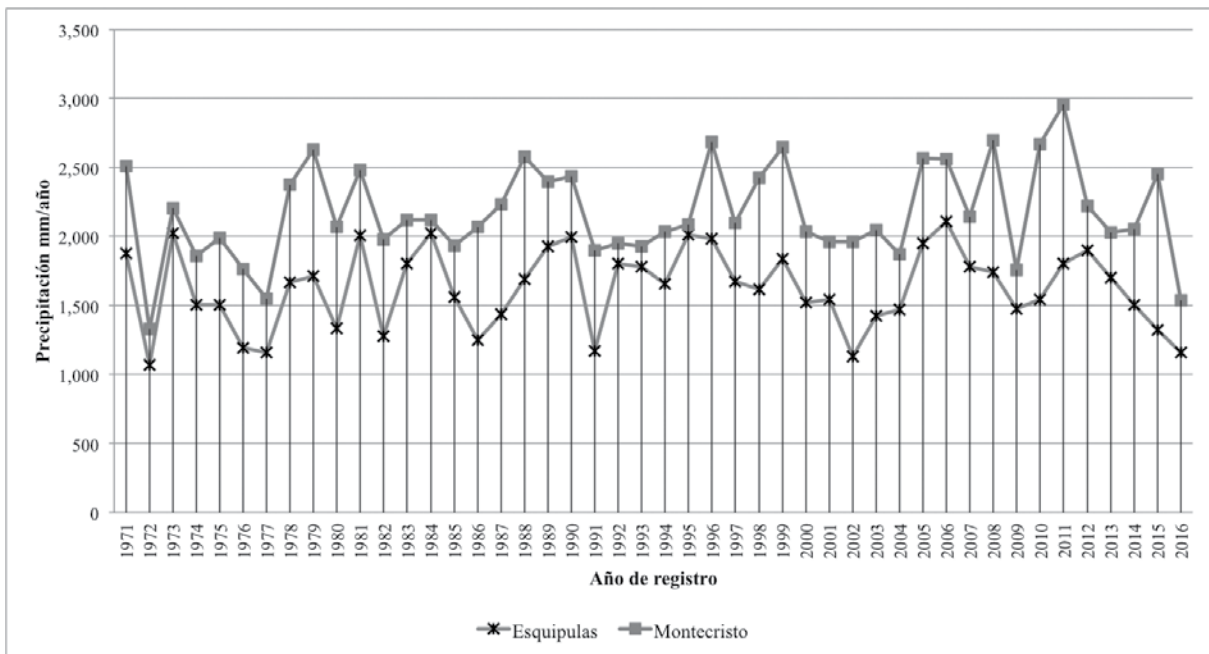


Figura 4. Precipitación media anual Esquipulas (Insivumeh) y Montecristo (Snet).

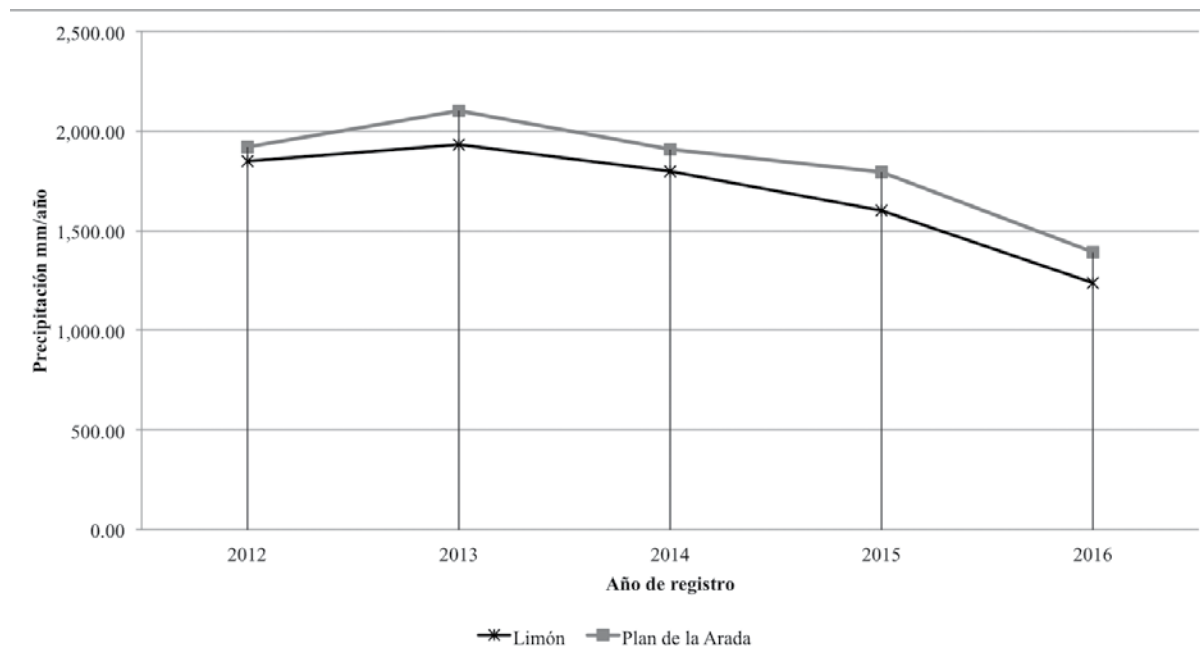


Figura 5. Precipitación media anual El Limón y Plan de la Arada.

Temperatura media mensual de la cuenca

Se generó un modelo matemático con los datos de temperatura promedio en grados centígrados y altitud en metros sobre el nivel del mar obtenidos de las estaciones meteorológicas con influencia en la cuenca.

Los modelos de temperatura dependen de la presión atmosférica y altitud principalmente, el modelo ingresado en un sistema de información geográfica, representó los datos de temperatura versus altitud y luego de analizar su dispersión para los 12 meses del valor de r^2 es 0.93 los datos se describen en la Tabla 5.

La Figura 7, presenta un comportamiento orográfico para la temperatura media mensual, inicia a aumentar en marzo y abril, luego disminuye sustancialmente en la parte alta de la cuenca del río Atulapa por la presencia de las lluvias de mayo, pero en noviembre a febrero se registran las temperaturas bajas principalmente en la parte alta. En la parte media de la cuenca en el Bosque Húmedo Subtropical templado es muy dinámico de temperatura.

Calibración de caudales

Se realizaron mediciones de alturas limnimétricas diarias y aforos de caudales, desde 2012 a diciembre de 2016.

En la Tabla 6 se presentan los cálculos para las épocas seca y lluviosa de mayo a junio de la cuenca del río Atulapa, observándose caudales mínimos de 0.29 m³/seg en enero a marzo y caudal máximo de 6 m³/seg en agosto. La curva de calibración con su respectivo modelo matemático permitió obtener el caudal diario con las lecturas limnimétricas, la curva de duración de caudales y el hidrograma de escorrentía de la cuenca.

En la Figura 8 se representa la curva de regresión con su respectiva ecuación lineal, muestra la relación existente entre el caudal y la altura limnimétrica.

La curva de calibración de caudales en la Figura 9 representa a la cuenca del río Atulapa, la cual es expresada de la siguiente forma: $Q = 3*(H-0)^{1.3131}$

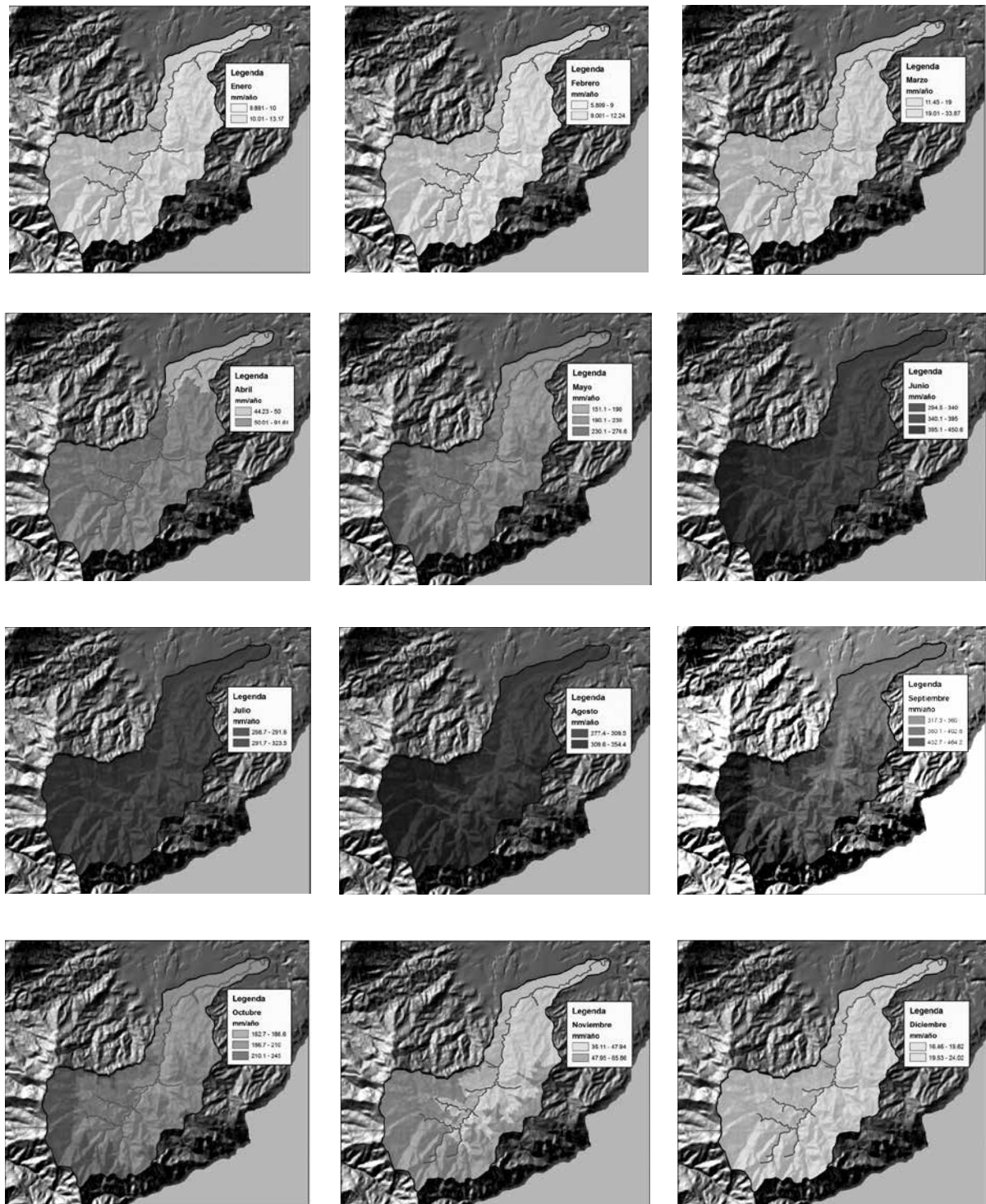


Figura 6. Precipitación media mensual en milímetros para la cuenca del río Atulapa.

Hidrograma de escorrentía

El promedio mensual del caudal en el río Atulapa, durante la época seca (enero a abril) es de $0.5 \text{ m}^3/\text{seg}$, representa un aporte del flujo de agua subterránea principalmente de los acuíferos colgados en la parte alta de la cuenca.

En mayo se presenta un ascenso del caudal de $0.70 \text{ m}^3/\text{seg}$ pero en el mes de junio hay un cambio radical a $2.20 \text{ m}^3/\text{seg}$, lo que permite inferir que la cuenca se encuentra con el suelo saturado y se presenta la escorrentía superficial (Figura 10).

En agosto el caudal medio mensual asciende a $2.89 \text{ m}^3/\text{seg}$, los suelos de la cuenca se encuentran saturados por consiguiente la escorrentía superficial y subsuperficial es mayor. Las corrientes intermitentes representan el suelo y subsuelo saturado, se forman por el flujo hipodérmico en el suelo.

De los registros diarios en octubre el caudal medio es de $1.28 \text{ m}^3/\text{seg}$, luego en noviembre inicia la recesión del hidrograma, con una disminución de $0.70 \text{ m}^3/\text{seg}$ y en diciembre $0.65 \text{ m}^3/\text{seg}$ (Figura 10).

Curva de duración de caudales

La Figura 11 representa la curva de duración de caudales de la cuenca del río Atulapa, resultado del análisis que se realizó de las frecuencias y la serie de caudales medios diarios, de enero a diciembre del 2012 al 2015 en el sitio de aforo. La curva de duración del régimen de caudales medios diarios del río Atulapa se utilizó para pronosticar el comportamiento del régimen futuro de caudales.

Las curvas de duración tienen formas típicas en el caso de la cuenca del río Atulapa es característico de un sistema de drenaje de montaña, la pendiente pronunciada en el tramo inicial de la curva indica que los caudales altos se presentan durante períodos cortos, es una cuenca de régimen torrencial que representa registros en crecidas de $7 \text{ m}^3/\text{seg}$. El 3% de los días en un año se presentan registros de caudales en crecidas instantáneas de 4 a $7 \text{ m}^3/\text{seg}$. Se presentaron caudales menores de $0.5 \text{ m}^3/\text{seg}$ en 60% de los días en el año.

Discusión

Es de especial importancia el monitoreo del recurso hídrico en los países de Centro América. Guatemala

ocupa la cuarta posición en cuanto a disponibilidad de agua superficial, sin embargo no se poseen registros precisos y es el país con mayor población en 80% más que en otros países de la región (Asociación Mundial para el Agua, 2006)

La relación existente entre la temperatura y la altitud en la cuenca del río Atulapa es alta, debido a que la temperatura se relaciona más con el relieve del terreno resultado de la presión atmosférica presenta un r^2 anual de 0.924 (0.93). Un ejemplo claro es el modelo utilizado para la simulación de la temperatura elaborado en España peninsular, a través de regresiones con un modelo digital del elevaciones donde se obtuvo la distribución espacial de temperaturas mensuales (Bustamante, 2003; Pascual, 1997). De igual manera en Colombia se representó la distribución espacial de la temperatura con modelos de esta a partir de producto de los factores de latitud, topografía y orientación de las cordilleras, se representó la distribución espacial de la temperatura (Pabón et al., 2001).

La temperatura resultado de la energía solar es la que dirige el ciclo hidrológico en la cuenca del río Atulapa, principalmente en la evapotranspiración de la cobertura vegetal como una variable de la pérdida de agua en la cuenca. La temperatura media anual de la cuenca para la parte baja es de 18.9°C y en la parte alta de 14.3°C . En la cuenca del río Atulapa se reportan temperaturas promedios anuales de 22.3°C .

El agua en estado líquido presente en la vegetación y ríos de la cuenca, por aumento de temperatura se pierde a través de la evapotranspiración real convirtiéndose en nubes, que se desplazan por los vientos convergente hacia las montañas del cerro Montecristo, cuando baja su temperatura, parte de ellas se condensan para precipitar en el bosque Montano Bajo Subtropical de la cuenca, el resto de nubes continúan su movimiento a precipitar en otras latitudes. En la cuenca, la precipitación media anual es de $1,884 \text{ mm/año}$, en las partes altas de las montañas se registran $2,355 \text{ mm/año}$ y en las partes bajas de la cuenca se registran $1,593 \text{ mm/año}$. En la cuenca del río Atulapa, la relación entre la precipitación y la altitud permite la modelación con correlaciones lineales, debido a sus efectos orográficos en el desplazamiento de la humedad en la cuenca.

Al igual que en la ciudad de México se demostró con modelos de correlación lineal para la estimación espacial de la precipitación en el valle de la ciudad de México, que proporcionaron información para la simulación de escenarios y la representación espacial de

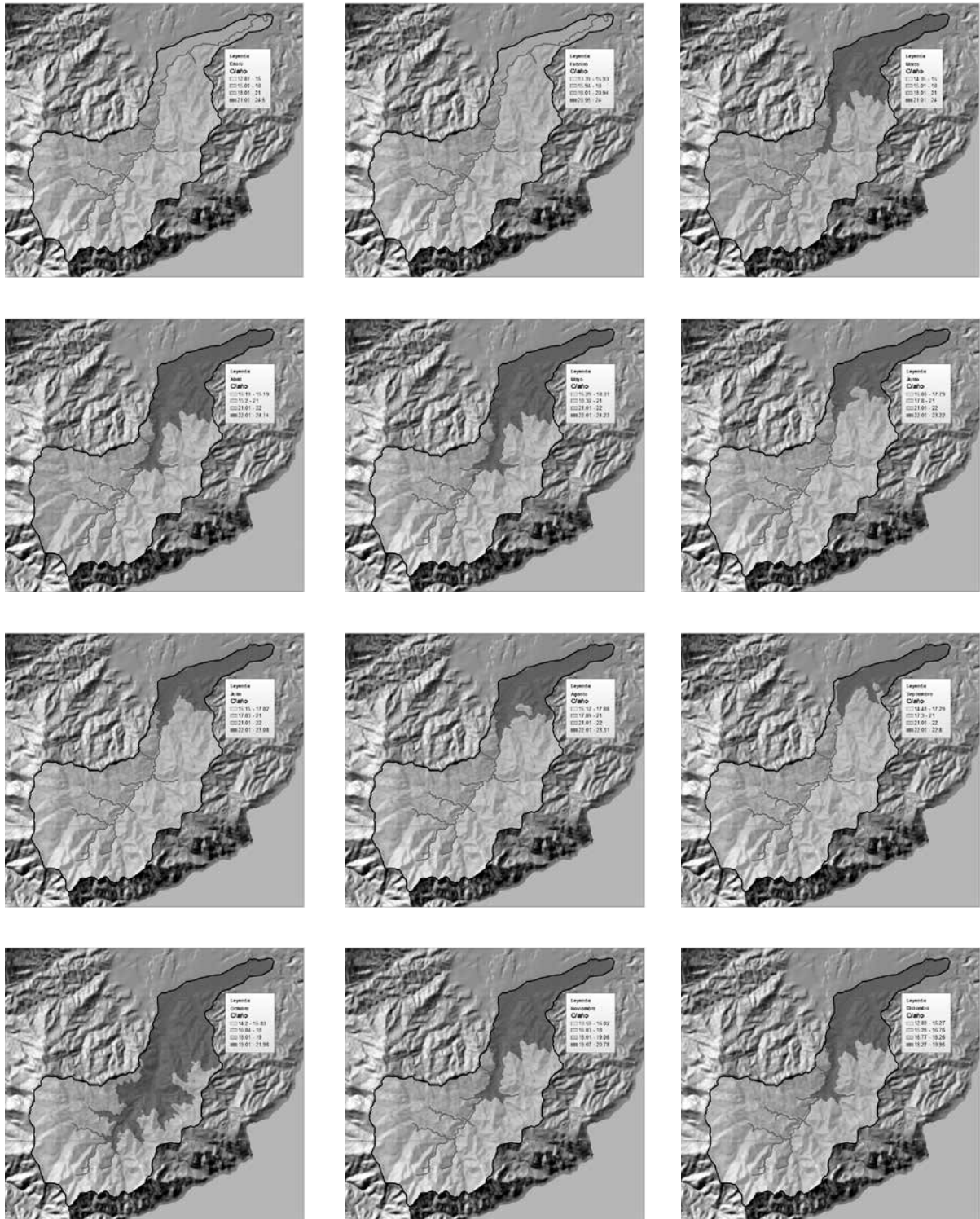


Figura 7. Temperatura media mensual en °C para la cuenca del río Atulapa.

Relación entre Log(Q) y Log (H-Ho)

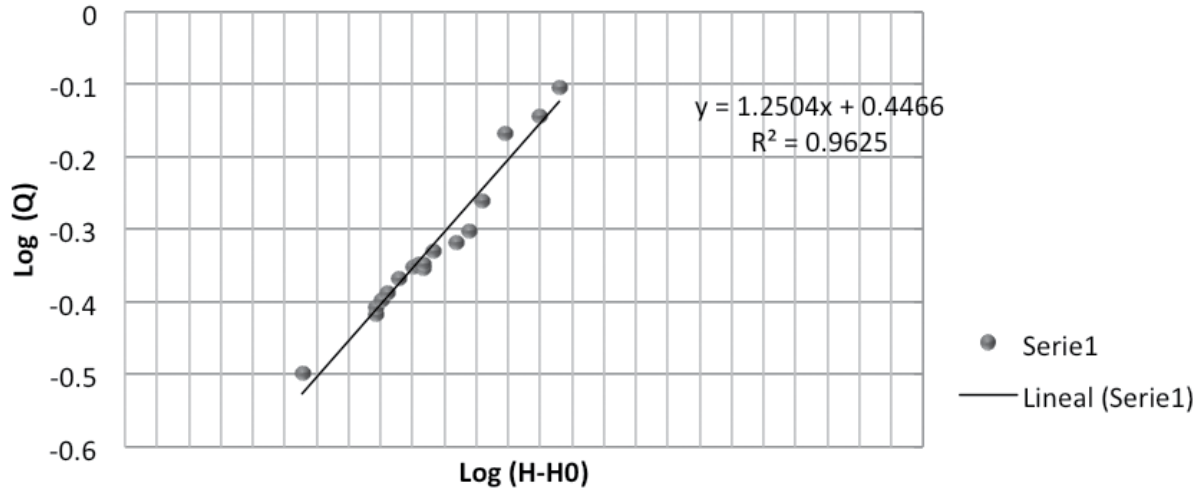


Figura 8. Regresión de log (H-Ho) y log (Q) para aforos año 2012 al 2016.

Curva de calibración de caudales

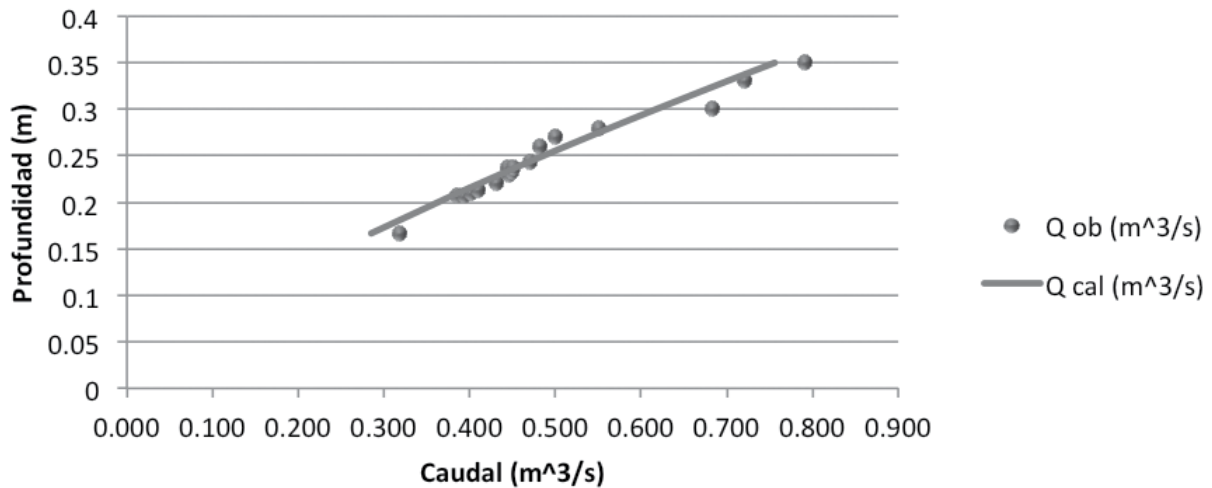


Figura 9. Curva de calibración de caudal (Q) en m³/seg para el año 2012 al 2016.

Tabla 6

Registros de caudales observados y calculados, río Atulapa

Número	H (m)	H-Ho (m)	Q ob (m ³ /s)	Log (H-Ho)	Log (Q)	Q cal (m ³ /s)
1	0.16	0.17	0.318	-0.778	-0.497	0.29
2	0.215	0.21	0.384	-0.685	-0.415	0.38
3	0.216	0.21	0.393	-0.685	-0.406	0.38
4	0.21	0.21	0.402	-0.677	-0.396	0.39
5	0.21	0.21	0.41	-0.671	-0.387	0.39
6	0.22	0.22	0.43	-0.658	-0.367	0.41
7	0.23	0.23	0.445	-0.638	-0.351	0.44
8	0.23	0.23	0.449	-0.632	-0.347	0.44
9	0.24	0.24	0.443	-0.626	-0.353	0.45
10	0.24	0.24	0.45	-0.626	-0.346	0.45
11	0.24	0.24	0.47	-0.614	-0.327	0.47
12	0.26	0.26	0.482	-0.585	-0.317	0.51
13	0.27	0.27	0.5	-0.569	-0.301	0.54
14	0.28	0.28	0.55	-0.552	-0.259	0.56
15	0.3	0.3	0.682	-0.523	-0.166	0.62
16	0.33	0.33	0.72	-0.481	-0.143	0.70
17	0.35	0.35	0.79	-0.456	-0.102	0.76
18	0.4	0.38	0.922	-0.424	-0.035	0.83
19	0.4	0.38	0.936	-0.416	-0.028	0.85
20	0.5	0.46	1.174	-0.334	0.0698	1.09
21	0.5	0.48	1.754	-0.322	0.2439	1.13
22	0.5	0.52	2.11	-0.281	0.3242	1.28
23	0.6	0.57	2.3	-0.247	0.3617	1.42
24	0.6	0.57	2.3	-0.247	0.3617	1.42
25	0.6	0.58	2.45	-0.234	0.3891	1.48
26	0.6	0.6	2.55	-0.222	0.4065	1.53
27	0.7	0.68	2.99	-0.167	0.4757	1.81
28	1.7	1.7	7	0.230	0.845	6.02

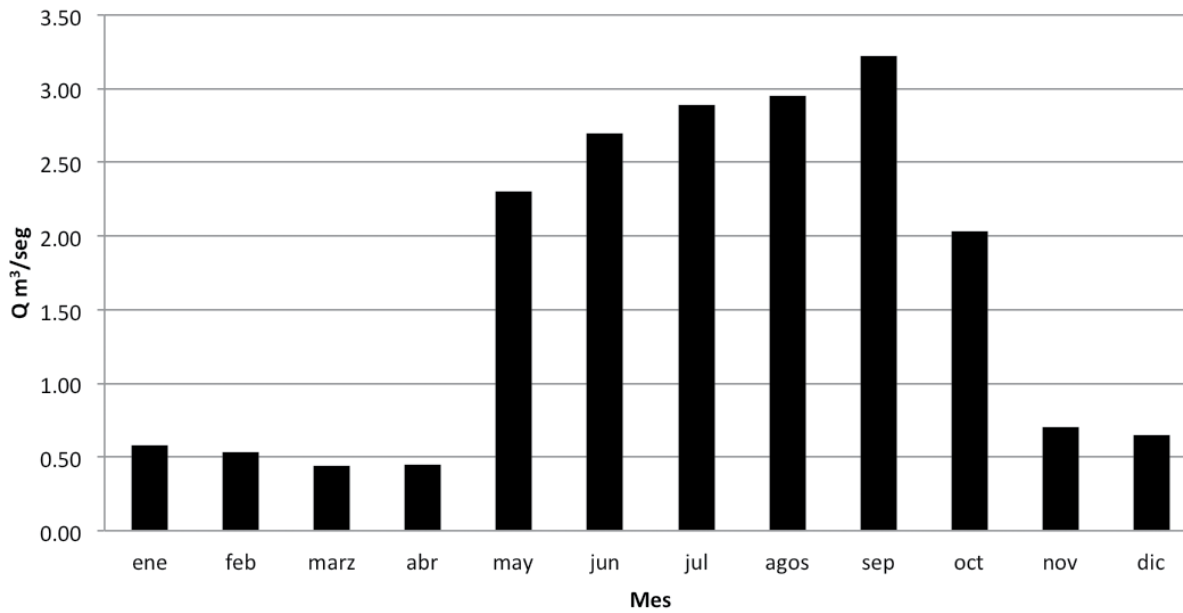


Figura 10. Hidrograma de escorrentía cuenca río Atulapa, caudales medios mensuales para el año 2012 – 2016 en m³/s.

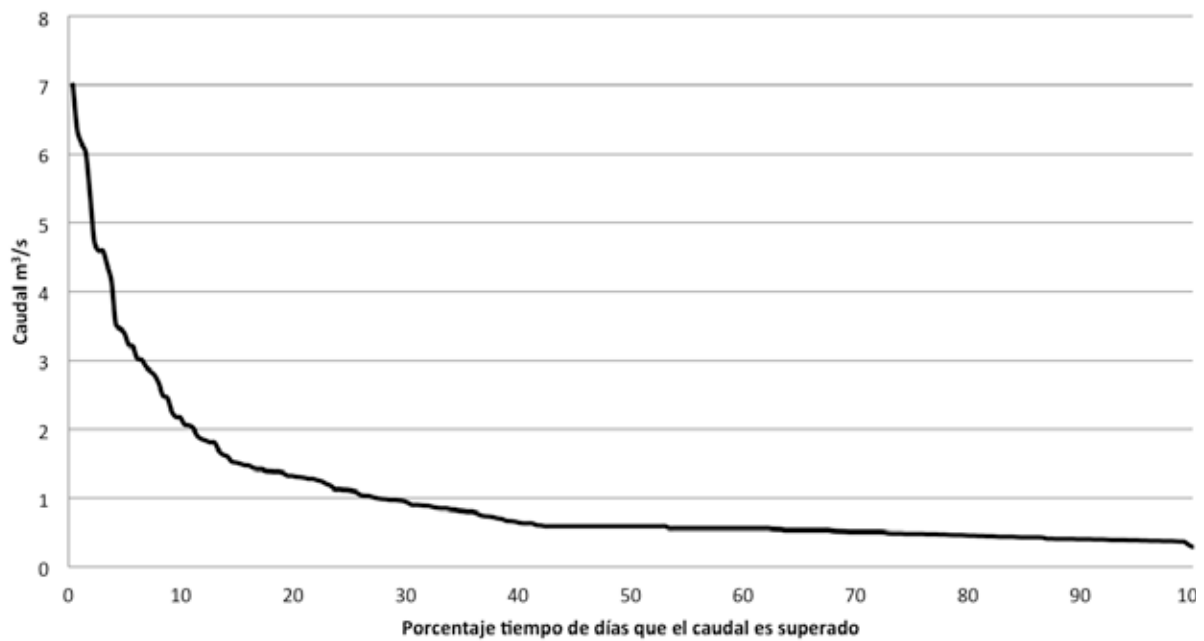


Figura 11. Curva de duración caudal, cuenca río Atulapa, 2012 al 2016.

la precipitación, demostrado por Díaz y colaboradores (2009). A la vez el estudio elaborado por Becerra y Gutiérrez (2006), presentó modelos hidrológicos empleando isoyetas de relieve, para conocer la distribución espacial.

Parte de la infiltración permanece cerca de la superficie de la tierra que a través del flujo hipodérmico emergen en los drenajes intermitentes, acabando como agua superficial (Aguirre, 2008; Linsley, 1967). En la cuenca del río Atulapa algunas aguas subterráneas encuentran grietas en la tierra y emergen como agua superficial, conformando el caudal medio anual de 0.5 m³/seg observándose caudales mínimos de 0.29 m³/seg en los meses de enero a marzo y caudal máximo de 6 m³/seg en agosto.

Las proyecciones de cambios climáticos basados en los registros de temperatura, tienden al ascenso según Anderson y colaboradores (2008), sobre los potenciales impactos al cambio climático describe proyecciones de temperaturas medias para el 2020 de 30.5°C y en el 2080 pueden registrarse datos de 34.5°C. En los registros en la estación de Esquipulas del 1971 al 2015 se observan que la temperatura asciende en un promedio anual aproximadamente 1.5°C en comparación a los registros de los años 70s.

El fenómeno de El Niño y La Niña, han modificado los movimientos de las corrientes marinas por el intercambio de masas de agua cálida y fría, así como el comportamiento de los vientos convergentes en la zona denominada de convergencia intertropical (Instituto de Incidencia Ambiental, 2003). En Centro América y en la zona de El Trifinio, se observan cambios en el comportamiento de la temperatura con tendencia al aumento y precipitaciones con tendencia a la disminución y mala distribución en la cuenca. La Figura 4 representa los eventos El Niño de 1991 y 2016, eventos de intensidad comparable a los de 1982-1983 y 1997-1998. En el siglo XXI hasta el momento, según el Oceanic Niño Index (ONI) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (Noaa), se han presentado cinco episodios El Niño en el Pacífico central: dos de intensidad débil para los años 2004-2005 y 2006-2007 y tres de intensidad moderada para 2002-2003, 2009-2010 y 2015-2016 (Universidad Rafael Landívar a través del Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, 2009). La variabilidad de la precipitación entre Esquipulas y Montecristo es de 536 mm/año debido a la diferencia de altitud en m.

El Insivumeh ha reportado cambios en registros históricos de temperaturas y precipitaciones en el te-

rritorio nacional principalmente en eventos extremos como en las tormentas Stan en 2006, Agatha en 2010, 12E 2011 y Earl en 2016 donde las intensidades de las lluvias fueron altas y después de los eventos se registraron temperaturas hacia el ascenso.

Los modelos hidrometeorológicos generados representaron la variabilidad climática en la cuenca en forma bidimensional, permitiendo un control y monitoreo del recurso hídrico en la cuenca, para la planificación del uso sostenible.

Los modelos representan a los meses de enero a abril y de octubre a diciembre, un déficit hídrico correspondiente a los meses de la estación seca, como es común en Guatemala por su posición geográfica extendiéndose en los años del fenómeno de El Niño en las tres primeras semanas del mes de mayo.

En los meses correspondientes a la época lluviosa existe un exceso de humedad, especialmente en la segunda semana de mayo y la segunda semana de octubre. La mayor cantidad de lluvia, entre septiembre y octubre se debe a la ocurrencia de sistemas de baja presión, tormentas, y ciclones tropicales que afectan al país pero en la parte alta de la cuenca se extiende hasta noviembre.

El modelo de escorrentía superficial o curva de calibración, permitió conocer la dinámica de los caudales durante un ciclo hidrológico a través de los hidrogramas y curvas de duración de caudales. Esto permite la planificación de sistemas de captación para la distribución de agua en el Corredor Seco de la región.

Agradecimientos

Al Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología, (Fonacyt), por el financiamiento otorgado a través de la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (Senacyt) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Concyt) Fodecyt 47-2011. A la Comisión Trinacional Plan de Desarrollo Regional Integral del Trifinio, por apoyo institucional.

Referencias

- Aguirre, I. Y. (2008). *Apuntes de meteorología y climatología para el medio ambiente*. Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid.
- Anderson, E., Cherrington, E., Flores, A., Pérez, J., Carrillo, R., & Sempris, E. (2008). *Potential impacts of climate change on biodiversity in Central America, Mexico and the Dominican Republic*.

- Panamá: Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe.
- Asociación Mundial para el Agua. (2006). *Situación de los recursos hídricos en Centroamérica; hacia una gestión integrada*. San José, Costa Rica: Asociación Mundial para el Agua, Capítulo Centroamérica.
- Becerra, R., & Gutierrez, A. (2006). Modelación hidrológica empleando isoyetas de relieve, una aproximación geoestadística. En S. Demuth, A. Gustard, E. Planos, F. Scatena, & E. Servat (Eds.), *Climate variability and change hydrological impacts* (pp. 52-62). Wallingford: International Association for Housing Press.
- Belmonte, S., & Núñez, V. (2006). Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG. *GeoFocus*, 6, 11-22.
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford, England: Oxford University Press.
- Bustamante, J. (2003). Cartografía predictiva de variables climatológicas: Comparación de distintos modelos de interpolación de la temperatura en España peninsular. *Graellsia*, 59(2-3), 359-376. doi:10.3989/graelisia.2003.v59.i2-3.252
- Chow, V. T, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana.
- Comisión Trinacional Trifinio (2007). *Caracterización y diagnóstico de la cuenca del río Atulapa, municipio de Esquipulas, Chiquimula*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, Manejo de Suelo y Agua.
- Díaz, M., Herrera, G., & Valdés, A. (2009). Un modelo de correogionalización lineal para la estimación espacial de la precipitación en el valle de la ciudad de México, combinando datos de pluviógrafos con imágenes de radar meteorológico. *Ingeniería Hidráulica en México*, 24(3), 55-62.
- García, M. A. (2010). *Cuenca del río Atulapa*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía.
- Guerra V. H., Ferriño A. L., & Cavazos R. A. (2015). *Simulación hidrológica utilizando precipitación asociada a eventos de tipo ciclónico. Caso de estudio cuenca del río La Silla*. Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Facultad de Ingeniería Civil. Centro Internacional del Agua, Departamento de Hidráulica.
- Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Earth & Space Science News*, 14(1), 446-460. doi:10.1029/TR014i001p00446
- Instituto Geográfico Nacional (2009a). *Hoja cartográfica Cerro Montecristo*, (2359-III, Escala 1/50,000). Guatemala: Autor.
- Instituto Geográfico Nacional (2009b). *Hoja Cartográfica de Esquipulas*, (2359-IV Escala 1/50,000). Guatemala: Autor.
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2016). Registros históricos mensuales. Estación Meteorológica Esquipulas, Esquipulas, Chiquimula. Recuperado de: <http://www.insivumeh.gob.gt/meteorología>
- Linsley, R. K. (1967). The relation between rainfall and runoff. *Journal of Hydrology*, 5, 297-311.
- Mesa O., Poveda G., Carvajal L., & Salazar J. (1994). Influencia de variables macroclimáticas en la hidrología. *Boletín Hidrológico de las Empresas Públicas de Medellín, Colombia*, 3, 25-58.
- Pascual, J. A. (1997). *Cartografía hidrológica mediante SIG: La cuenca del Poyo*. Valencia: Universidad de Valencia.
- Pabón, J., Eslava J., & Gómez R. (2001). Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia. *Meteorología Colombia*, 4, 47-59.
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs,.
- Pusineri, G., Pedraza, R., & Lozeco, C. (2010). *Uso de modelos digitales de elevación y de sistemas de información geográfica en la modelación hidrológica*. Santa Fé, Argentina: Universidad Nacional de Litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas.
- Santos, E. G. (2017). *Generación y evaluación de un modelo para determinar la disponibilidad del recurso hídrico superficial y efectos del cambio climático en la cuenca del Río Atulapa, Esquipulas, Chiquimula, Guatemala* (FODECYT No. 047). Guatemala: Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología.