



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO TORRES, SAN JOSÉ, COSTA RICA Y SU
VARIACIÓN CON RESPECTO AL CAMBIO CLIMÁTICO**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE LA DIVISIÓN DE
EDUCACIÓN Y LA ESCUELA DE POSGRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL GRADO DE**

MÁSTER EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

VIRGINIA ALVARADO GARCÍA

TURRIALBA, COSTA RICA

2020

Este trabajo de graduación ha sido aceptado en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobado por el Comité Asesor de la estudiante, como requisito para optar por el grado de

División de Educación

Máster en Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas



FIRMANTES:

Sergio Velásquez, M.Sc.
Co asesor del Trabajo de Graduación

William Watler, M.Sc.
Co asesor del Trabajo de Graduación

Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.
Decana de la Escuela de Posgrado

Virginia Alvarado García
Candidata

Programa de Posgrado

Agradecimientos

A Dios, por ser mi guía y mi fortaleza en este camino.

A mi familia, por su apoyo y comprensión.

A mis amigos, por estar presentes y animarme.

A mis compañeros de promoción, en especial a la “Banda de los 4”, por tener la dicha de conocerlos y culminar juntos esta etapa.

A mis asesores, Sergio Velásquez y William Watler, por sus aportes en este trabajo.

A Isabel Gutiérrez, Laura Benegas, Silvia Garro y Aranjid Valverde, por su apoyo y compromiso durante la maestría.

A los profesores del CATIE, por sus enseñanzas.

A la Universidad Estatal a Distancia, por su apoyo económico.

Al IMN, ICE, LANAMME, CIEDES y AyA, por brindarme los insumos para el desarrollo de esta investigación.

A Edwin Matarrita, Kenett Masís, Jorge Hidalgo, Sergio Feoli, Pablo Castro, Carlos Andrés Campos, Rodrigo Méndez, Felipe Paniagua, Oldemar Vargas, Wilfredo Segura, Javier Saborío, Francisco Riquelme, Paola Brenes y Luis Vargas, por su solidaridad, consejos, enseñanzas y apoyo.

Fue un gran reto personal y profesional, me siento satisfecha por el trabajo logrado.

Profundamente agradecida,

Vicky

Hay alguien tan inteligente que aprende de la experiencia de los demás
Voltaire

Contenido

LISTA DE CUADROS	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE ANEXOS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS	IX
LISTA DE ACRÓNIMOS	X
1. INTRODUCCIÓN	1
<i>1.1 Antecedentes</i>	1
<i>1.2 Justificación del tema</i>	2
<i>1.3 Importancia</i>	4
<i>1.4 Limitaciones y alcance del estudio</i>	5
<i>1.5 Objetivos</i>	5
1.5.1 Objetivo general	5
1.5.2 Objetivo específicos	6
2. REVISIÓN DE LITERATURA	6
<i>2.1 Abordaje de la investigación</i>	6
<i>2.2 Marco referencial</i>	6
2.2.1 Cuencas hidrográficas y modelos hidrológicos	6
2.2.2 Escenarios de cambio climático	8
2.2.3 Modelos globales y regionales	8
3. METODOLOGÍA	9
<i>3.1 Ubicación del área de estudio</i>	9
<i>3.2 Respuesta hidrológica de la microcuenca</i>	10
3.2.1 Objetivo 1. Caracterización de la microcuenca del río Torres	11
3.2.2 Objetivo 2. Análisis hidrológico con datos observados	11
3.2.3 Objetivo 3. Análisis hidrológico con datos proyectados	13
3.2.3.1 Extracción de datos	13
3.2.3.2 Corrección del sesgo “bias correction”	15
4. RESULTADOS	16
<i>4.1 Objetivo 1. Caracterización de la microcuenca del río Torres</i>	16
4.1.1 Características morfológicas	16
4.1.2 Características de relieve	17
4.1.3 Características de drenaje	20
4.1.4 Características de tipo y uso de suelo	21
4.1.4.1 Tipo de suelo	21
4.1.4.2 Uso de suelo	21
4.1.5 Características geológicas y geomorfológicas	22
4.1.5.1 Geología	22
4.1.5.2 Geomorfología	23
4.1.6 Características climáticas	23
4.1.7 Áreas de drenaje	23

4.2 Objetivo 2. Análisis hidrológico con datos observados	25
4.2.1 Preprocesamiento de datos	25
4.2.1.1 Prueba de datos dudosos	25
4.2.1.2 Análisis de frecuencia	26
4.2.1.3 Distribución Generalizada de Valores Extremos (GVE).....	26
4.2.1.4 Distribución Gumbel.....	29
4.2.1.5 Distribución espacial de precipitación	31
4.2.1.6 Distribución temporal de precipitación	32
4.2.2 Modelo hidrológico	35
4.2.2.1 Número de curva por área de drenaje	35
4.2.2.2 Hidrograma Unitario de Snyder.....	38
4.2.2.3 Elementos del modelo Hidrológico	39
4.2.2.4 Escenario 1: TR 25 años	40
4.2.2.5 Escenario 2: TR 50 años	42
4.2.2.6 Escenario 3: TR 100 años	43
4.3 Objetivo 3. Análisis hidrológico con datos proyectados	45
4.3.1 Preprocesamiento de datos	45
4.3.1.1 Prueba de datos dudosos	45
4.3.1.2 Análisis de frecuencia	45
4.3.1.3 Distribución Gumbel.....	46
4.3.1.4 Distribución espacial de precipitación	47
4.3.2 Modelo hidrológico	48
4.3.2.1 Escenario 1: TR 25 y RCP8.5.....	48
4.3.2.2 Escenario 2 y 3: TR 50 y TR 100, y RCP8.5	50
4.3.3 RCP8.5 con variación del número de curva (N)	52
5. DISCUSIÓN	55
6. CONCLUSIONES	61
7. RECOMENDACIONES	62
8. LITERATURA CITADA	63
9. ANEXOS	75

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Distribución por cantón del área de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.....	10
Cuadro 2. Insumos utilizados para la descripción de la microcuenca del río Torres, Costa Rica	11
Cuadro 3. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.....	12
Cuadro 4. Precipitación total, promedio y máxima para el período de predicción (2006 – 2050), según CORDEX y CMhyd.....	15
Cuadro 5. Caracterización física de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.....	17
Cuadro 6. Clasificación de pendientes en la microcuenca del río Torres, Costa Rica	19
Cuadro 7. Caracterización geológica de la microcuenca del río Torres, Costa Rica. Fuente: Castro Chacón 2019	22
Cuadro 8. Características morfológicas de las áreas de drenaje del río Torres, Costa Rica	24
Cuadro 9. Caracterización de los usos de suelo en las áreas de drenaje del río Torres, Costa Rica.....	25
Cuadro 10. Parámetros para la discriminación del tipo de distribución de valores extremos	27
Cuadro 11. Frecuencia de eventos máximos en la microcuenca del río Torres, Costa Rica	30
Cuadro 12. Hietogramas característicos utilizados en el modelo hidrológico. Fuente: Murillo 1994.....	33
Cuadro 13. Precipitación para diferentes períodos de tiempo de retorno de la estación San Luis, río Torres, Costa Rica.....	34
Cuadro 14. Precipitación para diferentes períodos de tiempo de retorno de la estación Sabana, río Torres, Costa Rica.....	35
Cuadro 15. Grupos hidrológicos asociados a la clase textural del suelo	36
Cuadro 16. Número de curva por condición y el grupo hidrológicos.....	37
Cuadro 17. Número de curva por áreas de drenaje del río Torres, Costa Rica.....	37
Cuadro 18. Parámetros del hidrograma unitario de Snyder por áreas de drenaje, río Torres, Costa Rica	39
Cuadro 19. Elementos del modelo hidrológico en HEC-HMS.....	40
Cuadro 20. Resumen de parámetros hidrológicos para TR = 25 años.....	40
Cuadro 21. Resumen de parámetros hidrológicos para TR = 50 años.....	42
Cuadro 22. Resumen de parámetros hidrológicos del modelo para TR = 100 años	43
Cuadro 23. Frecuencia de eventos máximos para la estación Sabana RCP8.5, río Torres, Costa Rica	47
Cuadro 24. Precipitación para diferentes períodos de tiempo de retorno de la estación Sabana, río Torres, Costa Rica.....	47
Cuadro 25. Resumen de parámetros hidrológicos del modelo para TR = 25 y RCP8.5.....	48
Cuadro 26. Resumen de parámetros hidrológicos del modelo para TR = 50 y RCP8.5.....	50
Cuadro 27. Resumen de parámetros hidrológicos del modelo para TR = 100 y RCP8.5.....	50
Cuadro 28. Uso de suelo y número de curva proyectados en las áreas de drenaje, río Torres, Costa Rica.....	52
Cuadro 29. Resumen del caudal pico para TR = 25, 50 y 100, y RCP8.5 – N.....	53
Cuadro 30. Variación de los parámetros hidrológicos en los datos observados y proyectados por área de drenaje, río Torres, Costa Rica.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.	10
Figura 2. Flujograma del procedimiento de extracción de datos.	14
Figura 3. Variación de la precipitación diaria para el período de predicción (2006 – 2050), según CORDEX y datos corregidos con CMhyd.	15
Figura 4. Modelo de Elevación Digital de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.	18
Figura 5. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.	18
Figura 6. Mapa de pendientes de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.	19
Figura 7. Perfil del cauce principal de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.	20
Figura 8. Red de drenaje de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.	20
Figura 9. Uso de suelo en la microcuenca del río Torres, Costa Rica.	21
Figura 10. Áreas de drenaje de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.	24
Figura 11. Prueba de datos dudosos para la estación de Sabana.	26
Figura 12. Representación gráfica de las distribuciones de Gumbel, Fréchet y Weibull. Fuente: Rodríguez Rodríguez 2016.	27
Figura 13. Ajuste de distribución de valor extremo para las estaciones en estudio.	29
Figura 14. Distribución de Gumbel para las estaciones en estudio.	30
Figura 15. Estimación de precipitación e intervalos de confianza para las estaciones en estudio.	31
Figura 16. Zonas de intensidad de lluvia para la microcuenca del río Torres, Costa Rica.	32
Figura 17. Representación del modelo hidrológico de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.	40
Figura 18. Pérdidas y precipitación en exceso para TR = 25 años.	41
Figura 19. Hidrograma acumulado para TR = 25 años.	41
Figura 20. Pérdidas y precipitación en exceso para TR = 50 años.	42
Figura 21. Hidrograma acumulado para TR = 50 años.	43
Figura 22. Pérdidas y precipitación en exceso para TR = 100 años.	44
Figura 23. Hidrograma acumulado para TR = 100 años.	44
Figura 24. Incrementos en el caudal pico durante TR = 25, 50 y 100 años.	45
Figura 25. Prueba de datos dudosos para la estación de Sabana RCP8.5.	45
Figura 26. Ajuste de distribución de valor extremo para la estación Sabana.	46
Figura 27. Distribución de Gumbel para la estación Sabana.	46
Figura 28. Estimación de precipitación e intervalos de confianza para la estación Sabana RCP8.5.	47
Figura 29. Pérdidas y precipitación en exceso para TR = 25 y RCP8.5.	49
Figura 30. Hidrograma acumulado para TR = 25 y RCP8.5.	49
Figura 31. Pérdidas y precipitación en exceso para TR = 50 y 100, y RCP8.5.	51
Figura 32. Hidrogramas acumulados para TR = 50 y 100, y RCP8.5.	51
Figura 33. Incrementos en el caudal pico durante TR = 25, 50 y 100, y RCP8.5.	52
Figura 34. Incrementos en el caudal pico durante TR = 25, 50 y 100, y RCP8.5 – N con el 10% de incremento en área urbanizable.	53
Figura 35. Pérdidas y precipitación en exceso para TR = 25, 50 y 100, y RCP8.5 – N.	54
Figura 36. Hidrogramas acumulados para TR = 25, 50 y 100, y RCP8.5 – N.	55
Figura 37. Variación del caudal pico por escenario, área de drenaje y tiempo de retorno.	56
Figura 38. Variación de la escorrentía superficial por escenario, área de drenaje y tiempo de retorno.	57
Figura 39. Variación del coeficiente de escorrentía por escenario, área de drenaje y tiempo de retorno.	58
Figura 40. Cambios en el ciclo anual de precipitación en la serie histórica y proyectada.	59
Figura 41. Cambios en el ciclo anual de precipitación en la serie histórica y proyectada para San José, Costa Rica. Fuente: Imbach et al. 2018.	60

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Registro final de precipitación máxima diaria anual del período 1987-2019, de las estaciones en estudio	75
Anexo 2. Registro final de precipitación máxima (P_{\max}) diaria anual del período 1992-2005 y 2006-2050, extraído por CORDEX	76
Anexo 3. Scripts de R utilizados para el pre-proceso de las series de tiempo y el análisis de distribuciones de eventos extremos	77
Anexo 4. Registro final de precipitación máxima (P_{\max}) diaria anual del período 2006-2050 con corrección del sesgo, CMhyd.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS

A - área
AD - Área de drenaje
bh-P - Bosque húmedo Premontano
bmh-MB - Bosque muy húmedo Montano Bajo
bmh-P - Bosque muy húmedo Premontano
 C_p - coeficiente al pico
 C_t - coeficiente regional
D - densidad de drenaje
 E_{max} - elevación máxima
 E_{min} - elevación mínima
h - hora
hh:mm - hora: minutos
 I_G - índice de compacidad
kf - factor de forma
kg - kilogramo
km - kilómetro
 km^2 - kilómetro cuadrado
L - longitud de cauce principal
 L_s - longitud total de los cauces
m.s.n.m. - metros sobre el nivel del mar
 m^2 - metro cuadrado
 m^3 - metro cúbico
min - minuto
mm - milímetro
N - número de curva
P - perímetro
s - segundo
S - pendiente media de la cuenca
 S_c - pendiente media del cauce
 t_{lag} - tiempo de retardo
TR - Tiempo de retorno
% - porcentaje

LISTA DE ACRÓNIMOS

AMC - condición de humedad antecedente
ASCII - American Standard Code for Information Interchange
CIEDES - Centro de Investigaciones y Estudios en Desarrollo Sostenible
CIGEFI - Centro de Investigaciones Geofísicas
CMhyd - Climate model data for hydrologic modeling
CMIP5 - Proyecto Inter-Comparación de Modelos Acoplados-fase 5
CNE - Comisión Nacional de Atención de Emergencias y Prevención de Riesgos
CORDEX - Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
CRTM05 - Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica
ECW - Enhanced Compression Wavelet
FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
Fevd - ajuste de distribución de valor extremo
GAM - Gran Área Metropolitana
GCM - Global Climate Model
GIS - Geographic Information System
GVE - Distribución Generalizada de Valores Extremos
GWHAT - Ground-Water Hydrograph Analysis Toolbox
HEC-HMS - Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System
ICE - Instituto Costarricense de Electricidad
IGN - Instituto Geográfico Nacional
IMN - Instituto Meteorológico Nacional
JPG - Joint Photographic Experts Group
MED - Modelo de Elevación Digital
NetCDF - Scientific data Network Common Data Format
NRCS - National Resources Conservation Service
PRECIS - Providing REgional Climates for Impacts Studie
PRUGAM - Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana
QGIS - Quantum GIS
RCM - Regional Climate Model
RCP8.5 - Representative Concentration Pathway 8.5
SCS - Servicio de Conservación de Suelos
SNIT - Sistema Nacional de Información Territorial
TIF - Tagged Image File Format
TIN - Red de Triángulos Irregulares
USDA - Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

RESUMEN

Los sistemas hidrológicos se ven directamente afectados por la magnitud y la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos. Esta investigación se basó en evaluar la respuesta hidrológica de una microcuenca urbana ubicada en Costa Rica, y su variación con respecto al cambio climático. Para ello, se subdividió la microcuenca en tres áreas de drenaje (AD1, AD2 y AD3) para detallar el análisis a nivel de morfometría, relieve, red de drenaje, suelo y clima; los cuales fueron insumos para el análisis hidrológico. Se realizó un análisis hidrológico con datos máximos anuales históricos observados (1987-2019) y datos máximos anuales proyectados RCP8.5 (2006-2050), para la estimación de caudales extremos a 25, 50 y 100 años de período de retorno.

Los valores de precipitación máxima anual observada se obtuvieron de seis estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). El registro venía incompleto, por lo que, se realizó un rellenado de datos con el método de los promedios con verificación de curva de doble masa para obtener la serie de 33 años. Se trabajó únicamente con los hietogramas de la estación Sabana y San Luis, debido a la distribución espacial y temporal de las lluvias para la zona de estudio.

Para el segundo caso, se trabajó con datos diarios acumulados de las estaciones Sabana, Colima y San Luis; ya que el registro venía incompleto, se realizó un llenado de datos faltantes con un modelo de regresión lineal con ajuste de mínimos cuadrados, con el programa GWHAT 0.3.4. Se trabajó únicamente con el hietograma de la estación Sabana por ser la más robusta.

Una vez obtenidos los datos diarios históricos observados, se extrajeron los datos diarios históricos simulados para los años 1992 – 2005, y los datos diarios proyectados a futuro simulados (RCP8.5) para los años 2006 – 2050. Esto se hizo a través de la plataforma CORDEX, con el modelo climático general MOHC-HadGEM2-ES y el modelo climático regional ICTP-RegCM4-7. Finalmente, se realizó una corrección del sesgo a la serie datos, con el programa CMhyd, para ser utilizada en HEC-HMS.

En lo que respecta a datos máximos históricos observados, el caudal máximo osciló entre 43 – 188 m³/s, con volúmenes de escurrimiento de 74 – 115 mm y coeficientes de escorrentía del orden de 0.47 – 0.79; mientras que, en los datos máximos proyectados (RCP8.5), el caudal máximo varió entre 84 – 327 m³/s, con volúmenes de escurrimiento de 98 – 200 mm y coeficientes de escorrentía del orden de 0.54 – 0.85. Por otro lado, a partir del incremento del 10% del área urbanizable de la microcuenca, se dio una variación del caudal pico en las tres áreas de drenaje; de modo que, si la parte alta llega a estar impermeabilizada, puede presentar serios problemas a causa del aumento en la velocidad y volumen del escurrimiento.

A nivel general, los valores proyectados fueron mayores que los observados. El RCP8.5 indica que un escenario de alta emisión podría ser inaceptable para la microcuenca. Esto puede dar una idea de dónde se debe prevenir (parte alta de la microcuenca) y dónde mitigar (parte media-baja); sin dejar de intervenir en el manejo del suelo de toda la microcuenca. Así, el plan hidrológico de la microcuenca debe contemplar la dinámica de ésta y el ordenamiento territorial que los actores involucrados establezcan en ella.

Palabras clave: modelo hidrológico, caudales extremos, cambio climático, RCP8.5, río Torres

ABSTRACT

Hydrological systems are directly affected by the magnitude and occurrence probability of extreme events. This research was based on evaluating the hydrological response of an urban micro-basin located in Costa Rica, and its variation in relation to climate change. For this, the micro-basin was subdivided into three drainage areas (AD1, AD2 and AD3) to detail the analysis at the morphometry, relief, drainage network, soil and climate level; which constituted inputs for the hydrological analysis. A hydrological analysis was performed with historical records of annual maximum values (1987-2019) and projected annual maximum values RCP8.5 (2006-2050) to estimate extreme flow at return periods of 25, 50 and 100 years.

Observed maximum annual precipitation values were obtained from six meteorological stations of the National Meteorological Institute (IMN) and the Costa Rican Electricity Institute (ICE). The records were incomplete, therefore, missing data were filled by means of the averaging method with double-mass curve verification to obtain the 33-year series. Only the hyetographs of the Sabana and San Luis stations were included in the analysis, due to the spatial and temporal distribution of rainfall in the study area.

For the second case, cumulative daily data from the Sabana, Colima and San Luis stations, missing data filling were performed with a linear least squares regression model, using the GWHAT 0.3.4 program. Only the Sabana station hyetograph was utilized, as it is the most robust.

Once the observed historical daily data were obtained, the simulated historical daily data for the years 1992 - 2005, and the simulated projected daily data (RCP8.5) for the years 2006 - 2050 were extracted. This was done through the CORDEX platform, with the general climate model MOHC-HadGEM2-ES and the regional climate model ICTP-RegCM4-7. Finally, a bias correction was made to the data series, with the CMhyd program, in order to use it in HEC-HMS.

Regarding the observed historical maximum values, the maximum flow ranged between 43 - 188 m³/s, with runoff volumes of 74 - 115 mm and runoff coefficients in the order of 0.47 - 0.79. Meanwhile, in the projected maximum data (RCP8.5), the maximum flow varied between 84 - 327 m³/s, with runoff volumes of 98 - 200 mm and runoff coefficients in the order of 0.54 - 0.85. On the other hand, starting from a 10% increase in the micro-basin urban-developable area, there was a variation in peak flow in the three drainage areas; therefore, if the upper part becomes waterproofed, it may present serious problems due to an increase in runoff speed and volume.

In general, the projected values were higher than those observed. RCP8.5 indicates that a high emission scenario may be unacceptable for the micro-basin. This can give an idea of where to prevent (upper part of the micro-basin) and where to mitigate (lower-middle part); while continuing land management interventions in the entire micro-basin. In this way, the hydrological plan of the micro-basin must contemplate its dynamics and spatial organization that parties involved establish in it.

Key words: hydrological model, extreme flow, climate change, RCP8.5, Torres river

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Los eventos extremos son producto de la combinación de un fenómeno, su magnitud y su consecuencia. Involucran cualquier elemento del clima, desde la precipitación hasta la temperatura o el viento. Los eventos hidrometeorológicos extremos están asociados a alguna forma de precipitación (líquida o sólida) con sus respectivos valores umbrales (Retana 2012). Los eventos máximos son los causantes del desbordamiento de los ríos. Cuando el volumen de agua excede la capacidad de infiltración en la cuenca, el escurrimiento superficial aumenta, y a su vez, el caudal del río; esto provoca las inundaciones (Rivera Torres 2002).

A nivel mundial, en los últimos 20 años (entre 1998 y 2017) se han reportado 7,255 eventos, de los cuales, el 91% corresponde a desastres de origen climático. Dentro de esta cifra, las inundaciones han sido las más frecuentes con 3,148 eventos equivalentes al 43% de todo el registro. Éstas afectaron a 2,000 millones de personas aproximadamente. Para el 2015, se reportó un promedio anual de 335 fenómenos climáticos, lo cual representó un 14% más que el decenio anterior (entre 1985-1995) (CRED y UNISDR 2018).

En América del Norte son más frecuentes los desastres meteorológicos (sequías y tormentas); mientras que, para Centroamérica y América del Sur, lo son los desastres hidrológicos. Para el 2016, los desastres hidrológicos tuvieron la mayor proporción de ocurrencia a nivel mundial, con 164 eventos de inundaciones; y tan solo en Centroamérica, 500,000 personas se vieron afectadas por ello (Guha-Sapir *et al.* 2017).

En Costa Rica, los eventos hidrometeorológicos extremos que producen exceso de lluvia y desencadenan en inundaciones, son producto de frentes fríos, tormentas locales o efectos indirectos de sistemas ciclónicos (Retana 2012). Durante el periodo comprendido entre 1998 y el 2017, las inundaciones han sido las más frecuentes con 7,399 registros, con relación a los deslizamientos, temblores y actividad volcánica (3,436; 207 y 22 eventos, respectivamente) (DesInventar 2019).

Durante los últimos 15 años se han presentado un total de 5,614 eventos de inundación. Esto representa, en términos económicos, 17,006 millones de colones y el 0.3% del Producto Interno Bruto (PIB) (Cubero Alpízar y Carvajal Sánchez 2014). San José es la provincia con la mayor cantidad de registros (2,105) y es la segunda con más personas afectadas (3,407) después de Puntarenas con 13,877 personas (DesInventar 2019).

Sólo en tres décadas (1980-2010), la superficie del área urbanizada de la Gran Área Metropolitana (GAM) aumentó en un 30.1% llegando a 17,907 hectáreas (MINAE 2017); mientras que, la densidad poblacional pasó de 59.2 habitantes/km² en 1990 a 95.6 habitantes/km² en el 2016 (SINIA 2019). Más específicamente, la subcuenca del río Grande de Tárcoles y el río Virilla aumentaron su densidad urbana durante el periodo 2008-2013, lo que resultó en 2,366 hectáreas. Por ello, esta transformación en el uso

del suelo asociado al cambio climático, han ocasionado graves eventos de inundaciones en las principales ciudades del país (Hidalgo León *et al.* 2015).

En general, se han disminuido los periodos de recurrencia de inundaciones a un año o menos, sobre todo por procesos de urbanización (Rojas Morales 2011) y se preveé que en un futuro, los eventos hidrometeorológicos extremos lluviosos aumenten su frecuencia y magnitud como producto del calentamiento global (Retana 2012). A la fecha, se han identificado las afectaciones hidrometeorológicas y geológicas de los 81 cantones del país. La Comisión Nacional de Atención de Emergencias y Prevención de Riesgos (CNE) se encuentra haciendo un monitoreo de deslizamientos y modelación de inundaciones, con el fin de ejecutar acciones de mitigación y adaptación al cambio climático (Castro Chacón 2019).

Propiamente en la microcuenca del río Torres, se han registrado eventos de lluvia máximos desde 1964 hasta la actualidad. En el cantón de San José se han reportado 16 eventos desde 1960 a la presente década; en Goicoechea se han reportado 13 eventos desde 1960 hasta el 2000; mientras que en Montes de Oca, se tienen cinco datos desde 1970 hasta el 2000 (Castro Chacón 2019). Esto se replica para otras microcuencas cercanas como el río Ocloro, Tiribí y María Aguilar (Solano Quintero y Villalobos Chacón 2017).

Los estudios sobre deslizamientos e inundaciones en el río Torres, son escasos (Mora 2004; Cordero 2015; Fallas Cordero 2015; Castro Chacón 2019) y específicamente en temas de simulación hidrológica no hay registros de estudios académicos; a lo sumo, consultorías para proyectos hidráulicos (Jiménez García 2014; Marín-Aguilar *et al.* 2011). Es por ello, que esta investigación marca un precedente como línea base y es un buen ejercicio para ser replicado.

1.2 Justificación del tema

Los efectos del cambio climático repercuten significativamente en la disponibilidad, la estabilidad y la accesibilidad al recurso hídrico; lo cual, en conjunto, dificultan enormemente la prestación satisfactoria de los servicios de abastecimiento del agua (Herrera 2017). Los patrones de temperatura y de precipitación afectan la dinámica hidrológica de una cuenca y con ello, la ocurrencia de eventos extremos aumenta; por lo que, los impactos del cambio climático se deben abordar bajo una perspectiva territorial con un enfoque de cuenca y con una visión de prevención (SEMARNAT 2013). La cuenca hidrográfica es la unidad básica de planificación, manejo y gestión, por lo que su enfoque, se fundamenta en la reducción de la vulnerabilidad y el riesgo a desastres, sobre todo hidroclimáticos, tales como inundaciones, deslizamientos, avalanchas, sequías, entre otros (Salgado Montoya 2005).

A nivel mundial y durante toda la historia humana, se han dado inundaciones. En la actualidad, los asentamientos humanos siguen presentando problemas de desbordamientos por causas meteorológicas y/o antrópicas (Paniagua-Hernández, 2016). Costa Rica no escapa a ello. Por su ubicación geográfica, el clima y sobre todo las precipitaciones lo posicionan como uno de los países con mayor oferta de agua

dulce del mundo. Solo en la región Centroamericana es el tercero en oferta hídrica (112.4 km³) y el primero en oferta per cápita de agua con 29,579 m³/año por habitante (Varela Rojas 2007).

En términos anuales, se estima que la precipitación promedio sobre el país es de 3,200 mm, de la cual escurren 2,200 mm equivalentes a 110 km³, aproximadamente. De esta lluvia neta, el 66.2% corresponde a escorrentía superficial y 33.7% recarga acuífera (Aguilera-Chaves 2010). Por lo tanto, la gran cantidad de cuerpos de agua sumado a fuertes lluvias durante todo el año vuelve a Costa Rica un foco de inundaciones, y sobre todo en zonas urbanas (Paniagua Hernández 2016).

En Centroamérica, y en particular Costa Rica, el aumento de la población y la falta de regulación sobre las actividades humanas han causado un deterioro en los cuerpos de agua (Buzolich *et al.* 2007). Según el artículo 33 de la Ley Forestal 7575, se establece una franja de protección de 15 metros en zona rural y 10 metros en zonas urbanas cuando el terreno sea plano; mientras que, en terrenos quebrados, esa franja debe ser de 50 metros (La Gaceta 1996). Pese a ello, esta normativa no se cumple a cabalidad y se enfocan más en el aprovechamiento de los recursos naturales y no en su conservación (Ureña Retana 2004).

La GAM es un ejemplo de ello, donde las malas estrategias de ordenamiento territorial provocan hacinamiento y exclusión social, al igual que una mayor demanda de recursos y problemas ambientales asociados (Castro Chacón 2019). Durante las últimas décadas, la incidencia de eventos naturales ha ido en ascenso constante. La recurrencia en áreas afectadas y la aparición de nuevos sitios sin antecedentes de deslizamientos o inundaciones, son el reflejo de alteraciones antrópicas (Arroyo González 2011).

El cantón central de San José ocupa únicamente el 0.08% del territorio nacional; desde el 2000 y hasta el 2006 se han reportado 29 eventos de inundaciones. Este mismo comportamiento es similar en otros cantones de San José tales como, Coronado, Curridabat, Goicoechea, Alajuelita, Montes de Oca, Tibás, Aserrí, Santa Ana y Escazú, los cuales no presentan una gran cantidad de desastres, pero conforme pasa el tiempo, muestran una tendencia hacia el aumento del impacto en función del urbanismo. Esto debido a que las transformaciones de uso urbano carecen de infraestructura de ajuste en las nuevas condiciones (Arroyo González 2011).

Se sabe que el río Torres, al igual que otros cauces urbanos de la Meseta Central de Costa Rica, son altamente vulnerables desde el punto de vista meteorológico, geomorfológico y social (Fallas Cordero 2015; Castro Chacón 2019), por lo que este estudio pretende emplear una metodología descriptiva mediante simulaciones hidrológicas, con insumos relativamente accesibles y de gran aplicación en otros cauces con características similares.

Así mismo, la aplicación de metodologías predictivas basadas en modelos, son claves para obtener una mayor aproximación del comportamiento y del efecto de eventos máximos ocasionados por tormentas típicas (Acón-Araya 2013); lo que, a su vez, permitirá conocer las características espacio-temporales y sus consecuencias, y establecer planes de gestión de cuencas y generar proyectos más acordes a la realidad en la zona de estudio.

1.3 Importancia

Según los objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, las inundaciones y las sequías se ven favorecidas por el cambio climático, el cual ejerce mayor presión a los recursos naturales. En este contexto, es una meta el poder asegurar la sostenibilidad de los sistemas de producción y de los ecosistemas, en tanto que se fortalezca la resiliencia al cambio climático y se procure minimizar la degradación del suelo y del agua (Naciones Unidas 2018).

La ciudad es una localidad donde tienen lugar la producción, el consumo, la distribución y la innovación. Desde la perspectiva ambiental, los planificadores ven a la ciudad como un consumidor de recursos y productor de desechos; la ciudad representa una amenaza para la naturaleza; mientras que, desde la perspectiva social, la ciudad es un espacio de conflicto en la distribución de los recursos, servicios y oportunidades. Por lo tanto, la sustentabilidad social urbana es una condición para alcanzar el equilibrio ecológico (Rivas Torres 2005). Según del Caz Enjuto (2017), una ciudad que cuente con un espacio libre más naturalizado es mucho más saludable, sostenible, habitable y resiliente; por lo que, a escala global, contribuye en mayor medida a la mitigación y adaptación al cambio climático.

Éste, conlleva cambios en la frecuencia y severidad de eventos extremos. Aguilar *et al.* (2005) evaluaron los cambios en las variables climáticas extremas en Centroamérica y concluyen que, que las precipitaciones y temperaturas máximas extremas diarias han venido aumentando; e indican una tendencia al calentamiento en la región, así como en la intensidad de los aguaceros.

Los eventos extremos se ven afectados por la influencia antropogénica, en especial por la emisión de gases de efecto invernadero y uso de la energía de la Tierra; lo cual aumenta la temperatura ambiental y distorsiona el ciclo hidrológico. Por ello, es necesario disponer de herramientas precisas para la evaluación y proyección climática futura, que permitan planificar y establecer estrategias de adaptación al cambio climático (IMN 2008).

Los escenarios de cambio climático, más que predicciones o pronósticos del clima futuro y sus posibles impactos, deben considerarse como una herramienta de evaluación de la sensibilidad ante condiciones climáticas nuevas (Benioff *et al.* 1996), como la posibilidad de un mayor caudal en cuencas, o el impacto potencial de ese cambio. En Costa Rica, se han desarrollado escenarios climáticos nacionales; a partir de modelos globales y climatología base (1961-1990) de estaciones meteorológicas. Desde el 2006, se está trabajando en aumentar la resolución espacial de las proyecciones, con el fin de mejorar los escenarios regionalizados, analizar los riesgos y sus posibles impactos, y determinar medidas de adaptación (IMN 2008).

Este tipo de investigaciones descriptivas constituyen una herramienta para que tanto actores políticos, sector privado y la sociedad civil, tomen acciones y decisiones oportunas; a fin de adaptarse al cambio climático y minimizar los impactos negativos que éste pueda desencadenar. Así mismo, contar con planes de manejo para el gobierno local y programas nacionales que tengan una visión integral de manejo de cuencas a corto, mediano y largo plazo.

Con esto también, se busca actualizar la información disponible, crear la necesidad de realizar monitoreos hidrometeorológicos con equipos aptos y estandarizados, de forma que no sea una limitante el acceso al dato. Otros beneficios que se obtendrán serán los pronósticos del flujo, las simulaciones de crecientes dependiendo del uso actual y otros hipotéticos y cómo serán las afectaciones en determinadas áreas.

Estos insumos no solo involucran a actores políticos para la toma de decisiones; sino que su aplicabilidad trasciende a las empresas privadas, al utilizar seguros en base a índices climáticos para el desarrollo y la emergencia, como herramientas de gestión del riesgo (Hellmuth *et al.* 2009). Predecir con mayor certeza la ocurrencia de eventos en áreas prioritarias, y ser ciudades sostenibles.

1.4 Limitaciones y alcance del estudio

Un aspecto positivo es que se cuenta con datos de seis estaciones meteorológicas en la microcuenca; lo negativo, es que el registro no es completo, son de instancias diferentes (ICE e IMN) y la frecuencia de observación es distinta (cada hora y cada cinco minutos). Los intervalos de tiempo en el estudio hidrológico de cuencas urbanas deben ser de 5 a 10 minutos como norma general, o incluso menores según el tamaño de la cuenca; lo cual se convierte en un registro detallado sobre la evolución de la lluvia en el tiempo (Gómez Valentín 2007), que no todas las estaciones logran tener.

Con respecto a los datos de predicción, obtenidos a partir de la plataforma CORDEX, fue necesario un procesamiento complejo para poder descargar, leer, rellenar y exportar la serie histórica y simulada completas. A pesar de que, el acceso es libre, este trabajo implica un gasto de tiempo y conocimiento en programación, que limita su funcionalidad. Pese a ello, los datos fueron descargados, a partir de un modelo de escala regional de 25 por 25 km de píxel, una resolución amplia para el estudio de una microcuenca. Además, se trabajó con el escenario de cambio climático más pesimista, por lo que, aunado a lo anterior, los datos de salida del modelo hidrológico pudieron ser sobreestimados; a pesar de la corrección del sesgo que se realizó.

Por otro lado, en el río Torres nunca ha existido una estación hidrométrica y la más cercana, se ubica a 16 km, aproximadamente, de la desembocadura sobre la subcuenca del río Virilla. Si bien, para efectos del estudio, no es necesario contar con registro de caudales; el contar con esta información hubiera permitido calibrar el modelo y comparar los caudales extremos con escenarios históricos y futuros.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar la respuesta hidrológica de la microcuenca del río Torres, San José, Costa Rica, y su variación con respecto al cambio climático.

1.5.2 Objetivo específicos

- Caracterizar las condiciones ambientales de la microcuenca del río Torres.
- Realizar un análisis hidrológico y la estimación de caudales extremos con datos observados para diferentes períodos de retorno, mediante el programa HEC-HMS.
- Realizar un análisis hidrológico y la estimación de caudales extremos con un escenario de cambio climático a futuro.
- Realizar un análisis comparativo entre los resultados de la modelación actual y futura.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Abordaje de la investigación

El presente estudio es producto de una investigación cuantitativa de tipo descriptivo (Monge Álvarez 2011), en la cual, se realizaron simulaciones hidrológicas, a partir de datos de precipitación observada de estaciones meteorológicas, correspondientes al ICE e IMN. Además, se utilizaron datos proyectados, con un escenario de cambio climático (RCP8.5), para luego realizar comparaciones entre los datos históricos reales y los simulados. Se utilizó el programa computacional HEC-HMS, en conjunto con otros, tales como, CORDEX, GWHAT, R Studio, Excel, CMhyd y QGIS como herramientas para obtener los insumos necesarios para el modelaje.

2.2 Marco referencial

2.2.1 Cuencas hidrográficas y modelos hidrológicos

El clima define la hidrología de una región. Los procesos meteorológicos que lo determinan son esenciales para el conocimiento del balance hídrico (García-Marín *et al.* 2014). Uno de los componentes básicos del ciclo hidrológico es la precipitación y para estudiarla; es necesario definir la unidad básica de análisis, la cuenca hidrográfica.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO (1990) lo expresa como una unidad territorial formada por un área geográfica drenada por un río y sus afluentes, la cual está definida por límites naturales. En ellas están contenidos los recursos naturales, que permiten el desarrollo de las diversas actividades humanas. Por su parte, Cruz Romero *et al.* (2015) menciona que una cuenca se asemeja a un colector que transforma la precipitación en escurrimiento, en función de las condiciones climáticas y biofísicas, lo cual determina su respuesta hidrológica.

Básicamente, la cuenca hidrológica es un sistema dinámico, con entradas y salidas. La lluvia, por ejemplo, es la señal de entrada, la cual sufre una modificación debida a las características de la cuenca en el proceso lluvia–escorrentía, para luego transformarse en una señal de salida como es el caudal (Gómez Valentín 2007).

La escorrentía directa, es la porción de lluvia de una tormenta que drena sobre la superficie del suelo. Los métodos para estimarla se hacen a partir de las pérdidas por infiltración, la evapotranspiración, la interceptación y el almacenamiento superficial. Uno de los más sencillos y generalizados es el método del número de curva, el cual estima a partir de características del suelo y su uso. El rango de valores varía de 1 a 100, donde 100 representa el escurrimiento total de la precipitación (Gaspari *et al.* 2007).

Los principales factores que intervienen en la escorrentía son los agroclimáticos, como la cantidad, intensidad duración y distribución de las lluvias; la interceptación de la cubierta vegetal, densidad y especies presentes; época del año; radiación solar, humedad atmosférica y del suelo; entre otros. Así mismo, están los factores fisiográficos, tales como la extensión, forma y pendiente media de la cuenca; geología, tipo de suelo y permeabilidad; cultivos presentes; red hidrológica y capacidad de evacuación de ésta (Robredo Sánchez 2014).

La influencia de la morfometría en las características fisiográficas proporciona información clave para comprender los patrones de drenaje. Los factores geomorfológicos de una cuenca pueden afectar directa o indirectamente la hidrogeología de la zona; en tanto que, el relieve y la pendiente, influyen en la escorrentía e infiltración (Avinash *et al.* 2014).

Según Bocel Chiroy (2016), la modelación hidrológica es una descripción matemática de la respuesta de una cuenca ante la ocurrencia eventos de precipitación, con el fin de simular las entradas y salidas que permitan predecir fenómenos físicos a corto, mediano y largo plazo. Es una herramienta útil para el manejo y gestión de cuencas, ya que la modelación es aplicable para cuencas de cualquier tamaño; a la vez que permite conocer su dinámica hidrológica, estimar la erosión hídrica y la producción de sedimentos para una zona dada.

El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) es un programa creado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (Scharffenberg 2016); diseñado para simular el proceso de precipitación-escorrentía en cuencas dendríticas. Parte de los postulados clásicos de la hidrología analítica, por lo que es una excelente herramienta para el análisis hidrológico alrededor del mundo (Umaña Quirós 2014).

HEC-HMS cuenta con siete distintas funciones de transformación de precipitación en escorrentía directa; tres de ellas comprenden los hidrogramas unitarios sintéticos del SCS, de Snyder y de Clark (Chow *et al.* 1994). Un hidrograma unitario es un hidrograma de escurrimiento, donde la precipitación unitaria en exceso se reparte uniformemente sobre toda la superficie de la cuenca a una intensidad constante en cierto intervalo de tiempo. Para ello, es requerido datos de caudales y precipitación; sin embargo, ya que esto es difícil de conseguir, se recurre al uso de un hidrograma unitario sintético, el cual se genera a partir de información general de la cuenca (Villón Béjar 2004).

Tanto el SCS, como el de Snyder y el de Clark se utilizan para modelar eventos, son de origen empírico y sus parámetros son ajustables (Umaña Quirós 2014). El hidrograma unitario sintético de

Snyder utiliza solamente dos parámetros en el HEC-HMS, el tiempo de retardo en horas y el coeficiente al pico (Umaña Quirós 2014).

2.2.2 Escenarios de cambio climático

Conceptualmente, el cambio climático es utilizado para caracterizar cambios sistemáticos sostenidos en las medias de los elementos o variables climáticas, a largo plazo. Puede verse afectado por mecanismos externos, como las emisiones de radiación solar; o internos, propios del sistema climático. En cuanto al concepto de escenario climático, éste denota un estado probable (normalmente simplificado) del sistema climático ante algún tipo o tipos de forzamientos; por lo que, un escenario de cambio climático responde a la diferencia entre un escenario climático y uno actual o línea base (Amador y Alfaro 2008).

La evaluación de los impactos del cambio climático en cuencas hidrológicas ha sido pilar de muchas investigaciones enfocadas en la planificación y prevención de inundaciones, dadas las afectaciones en los flujos de los ríos y recursos hídricos, producto de los gases de efecto invernadero. Para comprender el impacto potencial del cambio climático en la hidrología, se emplean escenarios a escala de cuenca creados a partir de las predicciones de modelos globales. Estos modelos permiten simular y predecir a corto, mediano y largo plazo, diferentes componentes del ciclo hidrológico; lo cual permite entender mejor la dinámica de los sistemas hidrológicos (Orozco *et al.* 2018). El IPCC (2013) expone cuatro escenarios de cambio climático; desde el RCP2.6 (el más optimista); hasta el RCP8.5 (el más desfavorable, sin cambios en las emisiones).

2.2.3 Modelos globales y regionales

Un Modelo Global del Clima (GCM, por sus siglas en inglés) se basa en los procesos físicos fundamentales de la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie de la tierra (Bonilla-Ovallos y Mesa Sánchez 2017). El Proyecto Inter-Comparación de Modelos Acoplados-fase 5 (CMIP5) integra 18 modelos globales, lo cual resalta su robustez en las predicciones (Orozco *et al.* 2018).

En Costa Rica se ha utilizado el modelo regional PRECIS (Providing REgional Climates for Impacts Studie); el cual comprende precipitación, temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima, entre otras. Así mismo, la resolución original es de 50 km con opción de 25 km, la frecuencia de los datos es diaria, y se ha utilizado en conjunto con otros modelos globales como HadGEM1 y HadCM3 (Alvarado *et al.* 2012).

Las variables climatológicas, como la precipitación y la temperatura, pueden presentar errores en el modelo, por lo que, deben ser corregidos para ajustarse con mayor aproximación al futuro (Orozco *et al.* 2018). Se han desarrollado metodologías de corrección del sesgo para modelos climáticos regionales; los cuales incluyen principalmente métodos lineales y no lineales. En el caso del método lineal, los factores climáticos se ajustan en función de las diferencias entre las medias observadas y las medias del modelo (Luo *et al.* 2018).

El programa CMhyd es una herramienta utilizada para extraer y corregir datos obtenidos a partir de modelos climáticos globales y regionales. El procedimiento de corrección del sesgo identifica los sesgos entre los datos históricos observados y simulados, para luego, parametrizar el algoritmo de transformación y ajustar la serie simulada. Uno de los supuestos del método es que son estacionarios; por lo que, la corrección y parametrización del algoritmo son válidas tanto para las condiciones climáticas actuales, como futuras (Rathjens *et al.* 2016).

Debido a la limitada resolución espacial de los modelos globales, y a la necesidad de evaluar y planificar en detalle los impactos del cambio climático; los modelos climáticos regionales (RCM, por sus siglas en inglés) proporcionan información a escala menor para aumentar la resolución espacial de los escenarios climáticos (Gaertner *et al.* 2012).

La técnica de *downscaling* (o de regionalización, o de reducción de escala), permiten proyectar de forma más detallada, la información disponible a gran escala sobre la escala regional. La reducción de escala proporciona un valor agregado para el estudio del cambio climático y sus posibles impactos, ya que las simulaciones hidrológicas a escala regional pueden ser significativamente diferentes de las proyectadas a escala global (Fowler *et al.* 2007).

CORDEX es una plataforma que permite explorar el potencial del modelado regional, de forma que sea accesible, y permita generar perspectivas analíticas, y aplicaciones de reducción de escala (Giorgi y Gutowski 2015). Posee una base de datos climáticos en alta resolución espacial, combinando modelos globales, regionales y escenarios de cambio climático; esto permite que sus datos sean más adecuados para evaluar incertidumbres en estudios regionales (Gericke *et al.* 2019).

Para mitigar el impacto de los eventos extremos, se requiere una mejor comprensión de la influencia que el cambio climático pueda ejercer sobre ellos. Bai *et al.* (2019) combinaron el uso de HEC-HMS y el Proyecto Inter-Comparación de Modelos Acoplados-fase 5 (CMIP5) para evaluar el impacto del cambio climático ante eventos de inundaciones en Estados Unidos; y aseguran que ambas herramientas, son eficientes y fáciles de utilizar. De igual forma, el programa HEC-HMS se ha utilizado en la India para determinar la influencia del cambio climático en los procesos hidrológicos (Meenu *et al.* 2012); y en Etiopía, para simular cambios de flujo a futuro (Yimer *et al.* 2009).

3. METODOLOGÍA

3.1 Ubicación del área de estudio

La microcuenca del río Torres se ubica en el Valle Central de Costa Rica. Forma parte de la subcuenca del río Virilla, la que, a su vez, pertenece a la cuenca del río Grande de Tárcoles, y finalmente, drena sus aguas al océano Pacífico. La divisoria de aguas define su límite con la subcuenca del río Virilla y Quebrada Rivera al norte; microcuenca del río Durazno al noreste; microcuenca del río Tiribí al este; cuenca del río María Aguilar al sur y subcuenca del río Virilla al oeste. El río Torres nace en Rancho

Redondo, Goicoechea y desemboca en el sector de la Carpio, en San José (Fallas Cordero 2015). Se localiza específicamente entre las coordenadas 1101716 N, 481553 O y 1101419 N, 505585 O (Fig. 1).

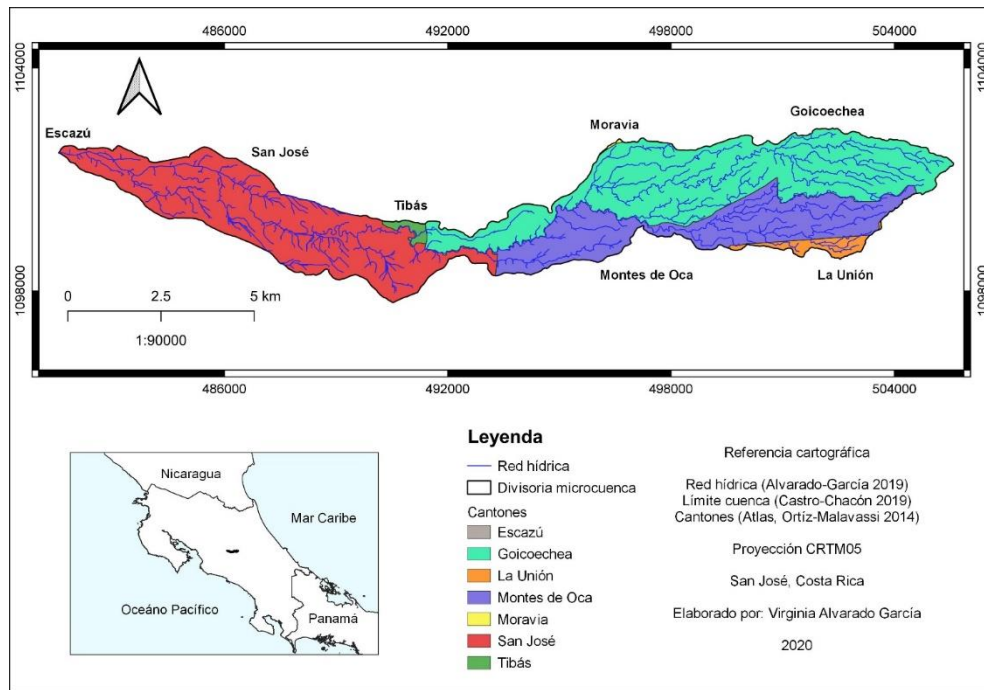


Figura 1. Ubicación de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.

Administrativamente la microcuenca es compartida por 22 distritos y siete cantones. Los municipios de Escazú, Goicoechea, Montes de Oca, Moravia, San José y Tibás pertenecen a la provincia de San José; mientras que una pequeña sección de la cuenca se ubica en el cantón de La Unión, en la provincia de Cartago. Goicoechea y San José representan más del 70% del área de la microcuenca; en tanto que, Escazú, no llega al 0.01% (Cuadro 1). En cuanto a los distritos, son 22 los que comprenden la totalidad de la microcuenca.

Cuadro 1. Distribución por cantón del área de la microcuenca del río Torres, Costa Rica

Cantón	Escazú	Moravia	Tibás	Montes de Oca	San José	Goicoechea	La Unión
Área (km ²)	0.00*	0.03	0.35	10.39	16.18	18.71	0.99
Porcentaje (%)	0.00*	0.06	0.75	22.27	34.66	40.09	2.13

*0.0004 km² y 0.0009%

3.2 Respuesta hidrológica de la microcuenca

La metodología se hizo en dos fases: la aplicación de una modelación hidrológica de datos observados para establecer los caudales máximos para diferentes periodos de retornos (25, 50, 100 años), a partir de un registro histórico de precipitación máxima diaria de 33 años de seis estaciones meteorológicas; y una segunda modelación hidrológica con estimaciones de caudales extremos para un escenario de cambio climático (RCP8.5). Antes de llevar a cabo las simulaciones, se establecieron algunos parámetros de referencia como insumo para los programas utilizados.

3.2.1 Objetivo 1. Caracterización de la microcuenca del río Torres

Se utilizaron diferentes parámetros para la caracterización morfométrica de la microcuenca que, a su vez, fueron insumos para el análisis hidrológico. Además, se hizo una descripción del relieve, red de drenaje, suelos y clima (Cuadro 2). La microcuenca se subdividió en tres áreas de drenajes (AD1, AD2 y AD3) para detallar el análisis a nivel de morfometría, relieve (MED, pendientes, perfil), red de drenaje, suelos (uso y tipo) y clima. Los archivos utilizados y generados tuvieron formato vectorial (shape) y ráster (TIF, JPG, ECW), con proyección CRTM05.

Cuadro 2. Insumos utilizados para la descripción de la microcuenca del río Torres, Costa Rica

Insumos		Fuente	Formato
Morfometría	Límite de la microcuenca	Castro Chacón 2019	Shape (.shp)
	Hojas cartográficas IGN	Georreferenciación por el CIEDES 2019	Enhanced Compression Wavelet (.ecw)
	Límite de las áreas de drenaje	Elaboración propia a partir de hojas cartográficas y red de drenaje	Shape (.shp)
Relieve	Curvas de nivel 1, 10, 50 m	CIEDES 2019	Shape (.shp)
	Modelo de Elevación Digital	Elaboración propia a partir de las curvas de nivel	Tagged Image File Format (.tif)
	Pendientes	Elaboración propia a partir del MED	Tagged Image File Format (.tif)
	Perfil longitudinal	Elaboración propia a partir del MED y cauce principal	Joint Photographic Experts Group (.jpg)
Red de drenaje	Hidrografía	Elaboración propia a partir del MED	Shape (.shp)
	Cauce principal	SNIT 2019	Shape (.shp)
Suelo	Uso de suelo	Sánchez Azofeifa 2017	Shape (.shp)
	Tipo de suelo	Sandoval y Mata 2014	Shape (.shp)
	Geomorfología	Ortíz Malavassi 2015	Shape (.shp)
	Geología	Ortíz Malavassi 2015	Shape (.shp)
Clima	Precipitación	Ortíz Malavassi 2015	Shape (.shp)
	Zonas de vida	Ortíz Malavassi 2015	Shape (.shp)

3.2.2 Objetivo 2. Análisis hidrológico con datos observados

En un análisis de la precipitación, se requiere una base de datos continua, homogénea y que abarque el máximo intervalo temporal posible. Si bien, la estación Sabana cuenta con datos desde 1974 (Cuadro 3), la serie es discontinua y el resto de las estaciones presenta la desventaja de tener huecos considerables de información, lo que limita el alcance del estudio y aumenta el sesgo.

Cuadro 3. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio

Estación	Nombre	Coordenadas (CRTM05)	Elevación (m.s.n.m.)	Registro de datos	Fuente
84139	CIGEFI	1098808 N, 495089 O	1,210	1999-2019	IMN
84141	IMN Aranjuez, San José	1098991 N, 492333 O	1,181	1996-1997, 1999-2000, 2002-2018	IMN
84195	Aeropuerto Tobías Bolaños	1101025 N, 483809 O	997	1996 - 2015	IMN
84122	San Luis de Santo Domingo	1107388 N, 497080 O	1,341	1992 - 2018	ICE
84096	Sabana Norte	1099223 N, 488754 O	1,129	1974-1985, 1987-1999, 2001-2018	ICE
84130	Colima	1100494 N, 490125 O	1,145	2003 - 2018	ICE

Para evitar esta fuente de error y conclusiones erróneas, se realizó un llenado de las series anuales suministradas por el ICE e IMN, con el método de los promedios; el cual permitió calcular datos faltantes, a partir una ecuación matemática, en función de los valores promedio de dos estaciones (Monsalve 2009; Aparicio Mijares 2012).

Para verificar lo anterior, se realizó un análisis de consistencia de datos por estaciones con patrón similar. Para ello se utilizó la curva de doble masa, la cual consiste en una curva acumulativa de precipitación con su respectiva recta (y su coeficiente de correlación cercano a uno). Si los datos no varían, la constante de proporcionalidad se mantiene; esto permite identificar errores, corregirlos y tener datos homogéneos (Searcy y Hardison 1960; Monsalve 2009; Gao *et al.* 2017). Todas las estaciones arrojaron buenos resultados ($R^2=0.98 / 0.99$). Finalmente, se obtuvo una base de datos completa para el período 1987-2019 (Anexo 1).

El análisis hidrológico de la microcuenca incluyó la caracterización de la lluvia, la determinación de las propiedades de escurrimiento y la generación de hidrogramas sintéticos. Se analizaron registros de precipitación diaria máxima anual de 33 años de registro, de seis estaciones meteorológicas para estimar los volúmenes de precipitación asociados a eventos con 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno en cada estación. Posteriormente se interpoló espacialmente para generar un volumen de precipitación en cada área de drenaje.

El programa seleccionado para la simulación hidrológica fue el HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (Scharffenberg 2016). Se utilizó el hidrograma unitario de Snyder para generar los caudales máximos para diferentes períodos de retorno. Se trabajó con hidrogramas desagregados para determinar la respuesta hidrológica de la microcuenca.

3.2.3 Objetivo 3. Análisis hidrológico con datos proyectados

De las seis estaciones, únicamente Sabana, Colima y San Luis presentaron datos diarios acumulados (01/01/1989 – 27/09/2018 para Sabana, 01/08/1991 – 16/07/2019 para San Luis, y 22/07/2003 – 07/07/2019 para Colima); sin embargo, las tres tuvieron registros incompletos. Para completar los datos faltantes, se utilizó el programa GWHAT 0.3.4.

Previo a completar los datos, se realizó un modelo de regresión lineal con ajuste de mínimos cuadrados, entre Sabana y el resto de las estaciones, donde únicamente Colima, arrojó buenos resultados ($R^2=0.90$). Para el caso de San Luis, tuvo la desventaja de no estar bien correlacionada ($R^2=0.50$) y tener poca significancia en sus datos, por lo que se descartó del análisis. Por el contrario, Colima, al estar cerca de Sabana, tuvo una alta correlación y sus datos son equivalentes; sin embargo, el número de datos faltantes fue mayor y, por lo tanto, el llenado de datos sería extenso.

Del período analizado (1989 – 2019), la estación Sabana tuvo un 4% de datos faltantes, San Luis, un 5% y Colima, un 6%. Por ello, y ya que la estación de Sabana fue la más robusta, se completó únicamente dicha serie y se analizó a partir de 1992, ya que la estación San Luis tuvo datos completos a partir de ese año y hasta el 2018. De este nuevo registro de datos reales (1992 – 2018), se obtuvo el valor máximo de precipitación anual, el cual fue comparado con la serie anual máxima del apartado anterior (período 1987 – 2019). Los datos fueron exactamente iguales para el período comparación (1992 – 2018); por lo que ambos métodos de llenado son equivalentes.

3.2.3.1 Extracción de datos

En cuanto al criterio de selección de los modelos, se basó en su ajuste. Para el caso del modelo global, el HadGEM2 ha sido uno de los que mejor se ajusta para Costa Rica y tiene la ventaja de tener datos diarios. Así mismo, el modelo regional seleccionado (ICTP-RegCM4-7) también dispone de datos diarios. Si bien, para Costa Rica se ha utilizado PRECIS como modelo regional, el estudio realizado por Alvarado *et al.* (2012) se hizo a escala mensual; por lo que, el acceso a los datos diarios no fue posible. Por otro lado, se eligió el modelo radiativo más drástico (RCP8.5), ya que CORDEX no cuenta con datos para RCP4.5; y el escenario RCP2.6 es más optimista (van Vuuren *et al.* 2011).

Para extraer datos diarios de precipitación, se utilizó la plataforma CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) (Fig. 2), a partir de un modelo regional de alta resolución para Centroamérica. Se extrajeron los datos históricos simulados para los años 1992 – 2005, y los datos a futuro simulados (RCP8.5) para los años 2006 – 2050 (Anexo 2). El período analizado, tanto para la serie de datos rellenados con GWHAT, como para la serie de datos históricos simulados de CORDEX, comprendió desde el 01/01/1992 hasta el 31/12/2005 (14 años), ya que CORDEX registra datos hasta el 2005; a partir del 2006, son valores a proyectados.

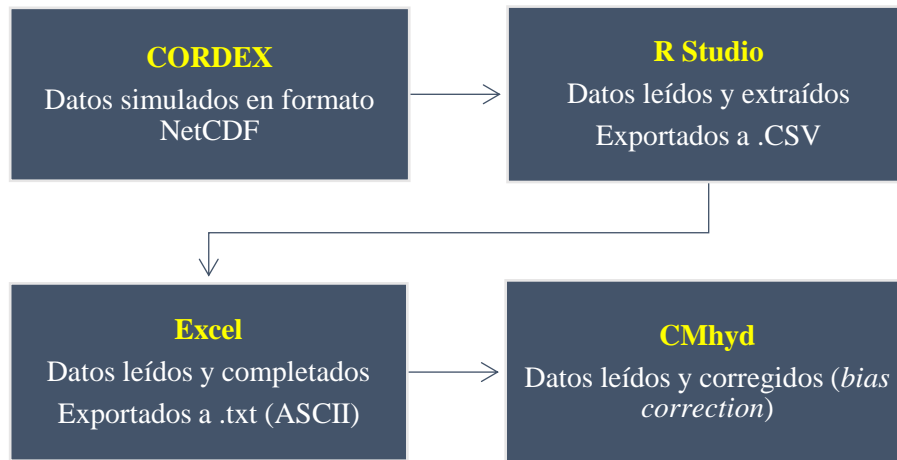


Figura 2. Flujograma del procedimiento de extracción de datos.

Formato de los archivos:

- pr: variable (precipitación)
- CAM-22: dominio (área de cubrimiento para Centroamérica)
- MOHC-HadGEM2-ES: modelo general
- rcp85: modelo radiativo / historical: modelo histórico
- r1i1p1: ensamble
- ICTP-RegCM4-7: modelo climático regional (más reciente)
- day: frecuencia de tiempo (diario)
- 20060101-20070101: período

Datos históricos simulados

pr_CAM-22_MOHC-HadGEM2-ES_historical_r1i1p1_ICTP-RegCM4-7_v0_day_20040101-20050101_nc

Datos RCP85 simulados

pr_CAM-22_MOHC-HadGEM2-ES_rcp85_r1i1p1_ICTP-RegCM4-7_v0_day_20250101-20260101_nc

Características de los datos:

- Unidades de flujo de precipitación (kg/m^2), se multiplicó por 86,400 para obtener mm
- Píxel de 25 x 25 km
- Área de cubrimiento para Centroamérica
- Calendario de 360 días; con el complemento de excel *kutools*, se completó a 365 días

La extracción y conversión de la serie temporal de precipitación diaria del archivo NetCDF, el análisis de datos faltantes y de ajuste de los datos a un modelo de eventos máximos, se realizó mediante scripts de R, utilizando R Studio 3.6.0 (Anexo 3).

3.2.3.2 Corrección del sesgo “bias correction”

Debido a la incertidumbre de las predicciones climáticas futuras, se necesitan procedimientos que minimicen la variabilidad entre los datos observados y simulados. El programa CMHyd (Climate model data for hydrologic modeling), es una herramienta fácil y confiable para estudios hidrológicos puesto que emplea un algoritmo de transformación para ajustar los datos de salida del modelo climático (Rathjens *et al.* 2016; Bai *et al.* 2019; Gericke *et al.* 2019).

En este caso, se generó un ajuste con el método de escala lineal, de los datos reales versus los datos históricos simulados que coincidieron en fechas (1992 – 2005). Posteriormente, esta transformación se trasladó a los datos simulados del período de predicción (2006 – 2050), para obtener la serie corregida (Cuadro 4) y ser utilizada en HEC-HMS.

Cuadro 4. Precipitación total, promedio y máxima para el período de predicción (2006 – 2050), según CORDEX y CMhyd

Datos simulados a futuro RCP8.5	Precipitación (mm)			
	Total	Promedio anual	Promedio diario	Máxima diaria anual
CORDEX	198,833.31	4,418.51	12.27	391.90 (año 2026)
CMhyd (<i>bias correction</i>)	85,131.89	1,891.82	5.25	231.56 (año 2014)

La figura 3 muestra la variación de los datos simulados extraídos con CORDEX, con respecto a los corregidos con CMhyd. El promedio de la precipitación diaria anual fue más del doble en los datos no transformados; de aquí la importancia de evitar sobreestimaciones en la serie de datos a analizar.

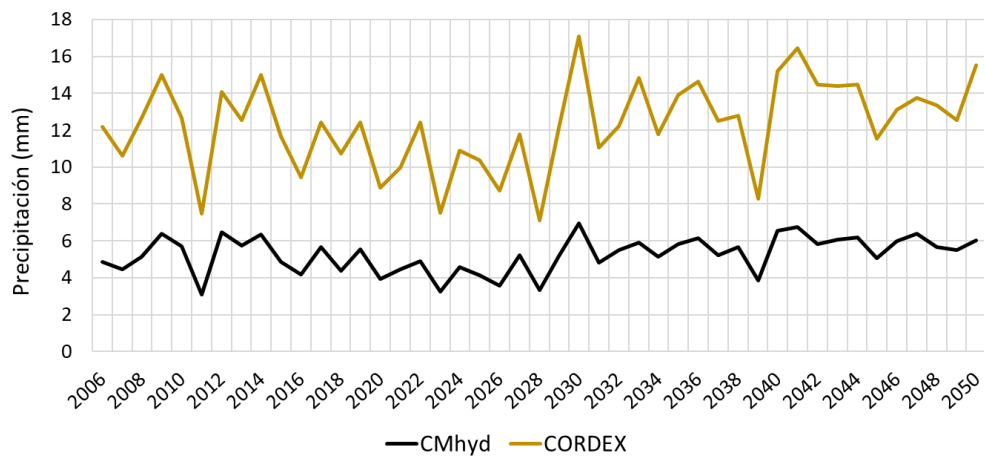


Figura 3. Variación de la precipitación diaria para el período de predicción (2006 – 2050), según CORDEX y datos corregidos con CMhyd.

La diferencia entre los modelos regionales corregidos y no corregidos podría ser baja para los valores medios de variables hidrológicas; mientras que, para valores extremos, pueden incrementar; debido a que las proyecciones futuras de eventos extremos están asociadas a una alta incertidumbre. Por ello, una

buena elección en la combinación de modelos global y regionales, puede aumentar la consistencia de las proyecciones (Sarr *et al.* 2015).

Previo al análisis hidrológico, esta serie se completó a 365 días con el complemento *kutools*; para poder tener el registro completo de datos diarios. Finalmente, se obtuvo el valor máximo de precipitación anual para los 45 años proyectados (Anexo 4). Esto se hizo para estimar los volúmenes de precipitación asociados a eventos con 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno de la estación Sabana y obtener los valores máximos a futuro en cada área de drenaje.

Finalmente, se realizó un segundo análisis hidrológico para el escenario de cambio climático (RCP8.5), con la única variación en el número de curva en el método de transformación de Snyder. Para ello, se estimó un aumento del 10% de área urbanizable para la microcuenca, basándose en los planes reguladores de los tres cantones más predominantes (Montes de Oca, Goicoechea y San José).

Se tomó en cuenta la posible expansión de áreas no urbanas en cada cantón de la microcuenca. Para la AD1 y AD2, se disminuyó un 4% del área de bosque secundario, un 4% de cultivos y pastos; y un 2% de suelo desnudo. Para la AD3, se disminuyó un 3% del área de bosques secundarios, un 3% de cultivos y pastos; y un 4% de suelo desnudo. Para el cuarto objetivo, se hizo un análisis comparativo entre los resultados de la modelación actual y futura.

4. RESULTADOS

4.1 Objetivo 1. Caracterización de la microcuenca del río Torres

4.1.1 Características morfológicas

La microcuenca del río Torres tiene un área, A, de 46.6 km² y un perímetro, P, de 57.83 km (Cuadro 5). A partir de esos valores se calculó el índice de compacidad de Gravelius, I_G. Este índice relaciona el perímetro de una cuenca con el perímetro de un círculo con la misma área; un valor igual a uno representa una cuenca circular y que tiende a concentrar más el flujo. Es, por lo tanto, un indicador de la magnitud de las avenidas, ya que los escurrimientos superficiales llegan con rapidez al cauce principal (López-Pérez *et al.* 2015).

$$I_G = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \frac{57.83 \text{ km}}{\sqrt{46.67 \text{ km}^2}} = 2.38$$

Según Camino *et al.* (2018), este parámetro está relacionado con la peligrosidad a las crecidas; por lo que, conforme disminuye el tiempo de concentración, la respuesta hidrológica de la cuenca aumenta. En este caso, el valor de I_G es mayor a uno e indica que la cuenca tiene forma alargada, por lo tanto, la respuesta a determinada precipitación es menor.

El parámetro siguiente fue la longitud del cauce principal, L. Esta longitud se define siguiendo el curso del agua desde el punto más distante de la cuenca hasta su desembocadura (Gaspari *et al.* 2012).

En el caso de la microcuenca del río Torres la longitud de drenaje más larga sigue el cauce del río Torres, y cuenta con una distancia de 34.76 km.

A partir del valor de L_c se puede calcular el factor de forma, K_f . Este factor relaciona el ancho medio y la longitud axial de la cuenca; además de manifestar cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial en la cuenca (Camino *et al.* 2018).

$$k_f = \frac{A}{L^2} = \frac{46.67 \text{ km}^2}{[34.76 \text{ km}]^2} = 0.04$$

Además, es un indicador de la susceptibilidad de una cuenca a las crecientes. En este caso, el valor de K_f es menor a uno, por lo que se esperan avenidas con picos atenuados y de duración más larga (López-Pérez *et al.* 2015); en consecuencia, una respuesta hidrológica menor.

Cuadro 5. Caracterización física de la microcuenca del río Torres, Costa Rica

Parámetros morfométricos	Valor
Área, A (km ²)	46.67
Perímetro, P (km)	57.83
Elevación máxima, E _{max} (m.s.n.m.)	2,040
Elevación mínima, E _{min} (m.s.n.m.)	923
Longitud de cauce principal, L (km)	34.76
Índice de compacidad, I _G	2.38
Factor de forma, K _f	0.04
Pendiente media de la cuenca, S (%)	11
Pendiente media del cauce, S _c (%)	3.21

El índice de compacidad refleja que la microcuenca no posee forma circular (valor lejano a 1); mientras que el factor de forma hace referencia a su forma alargada (menor a 1) y, por lo tanto, su amplitud en términos de anchura es limitado (Horton 1932).

4.1.2 Características de relieve

La microcuenca se ubica dentro de las hojas cartográficas 1:50000 Abra e Istarú del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Se utilizaron curvas de nivel a 1, 10 y 50 m para construir un Modelo de Elevación Digital a resolución 5x5 m, con el programa ArcMap 10.5 (Fig. 4). La elevación máxima, E_{max}, registrada fue de 2,040 y la mínima, E_{min}, fue de 923 m.s.n.m. La diferencia de elevaciones fue aproximadamente 1,117 m.

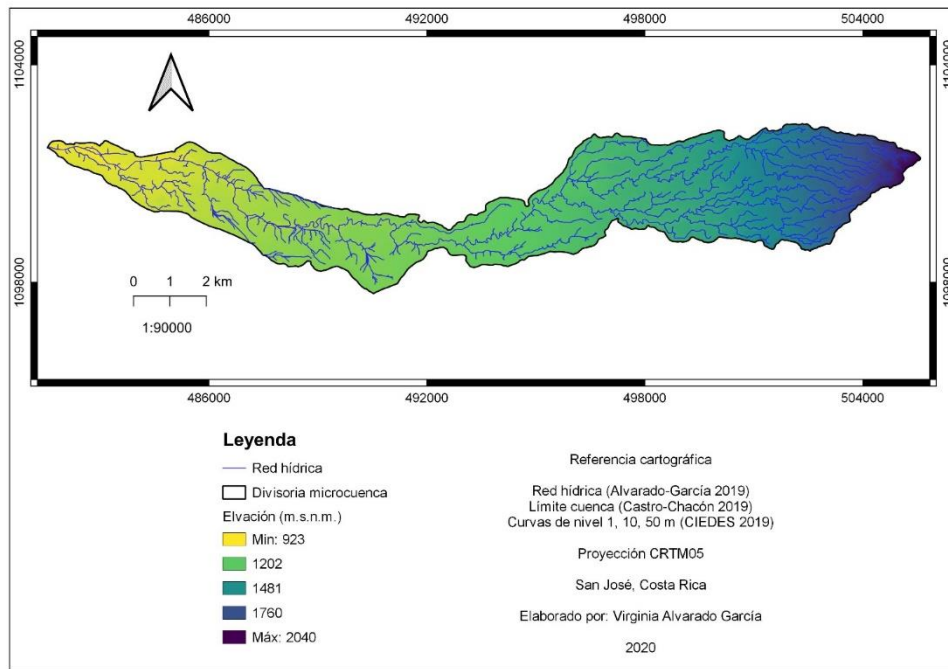


Figura 4. Modelo de Elevación Digital de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.

La mayor parte de la cuenca se encontró a elevaciones entre los 1,100 y los 1,200 m.s.n.m. San José fue el cantón que registró la mayor cantidad de dichas altitudes. Por otro lado, la curva hipsométrica permitió conocer la distribución del área a distintas elevaciones (Fig. 5); por lo que, aproximadamente el primer 20% del área de la microcuenca, se encontró entre los 1,500 y 1,700 m.s.n.m.; mientras que el 50% del área acumulada se ubicó entre los 1,100 y 1,300 m.s.n.m. En este caso, la curva indica que la microcuenca se encuentra en fase de equilibrio con tendencia a la madurez (Strahler 1952).

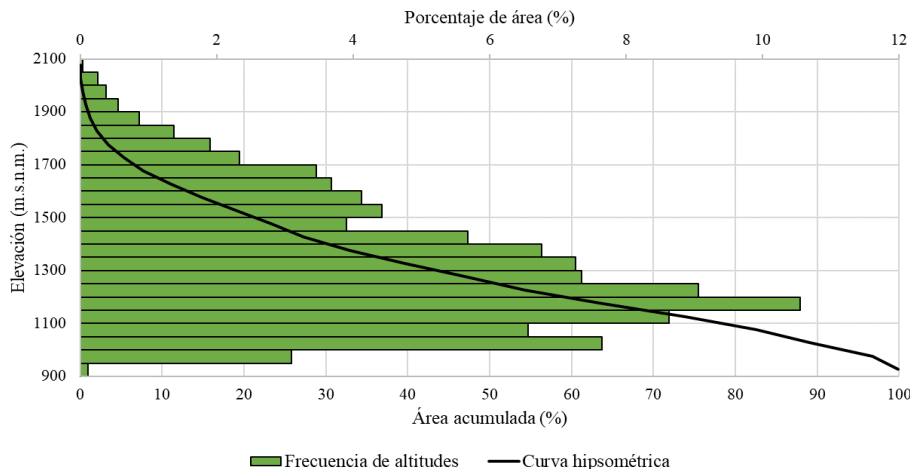


Figura 5. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.

Así mismo, se generó un mapa de pendientes, las cuales oscilaron entre 0 a 85% (Fig. 6). Las pendientes más altas se ubicaron en la porción superior de la microcuenca y en las partes aledañas al

cauce principal; mientras que, las pendientes bajas, fueron localizadas en la parte media e inferior de la microcuenca.

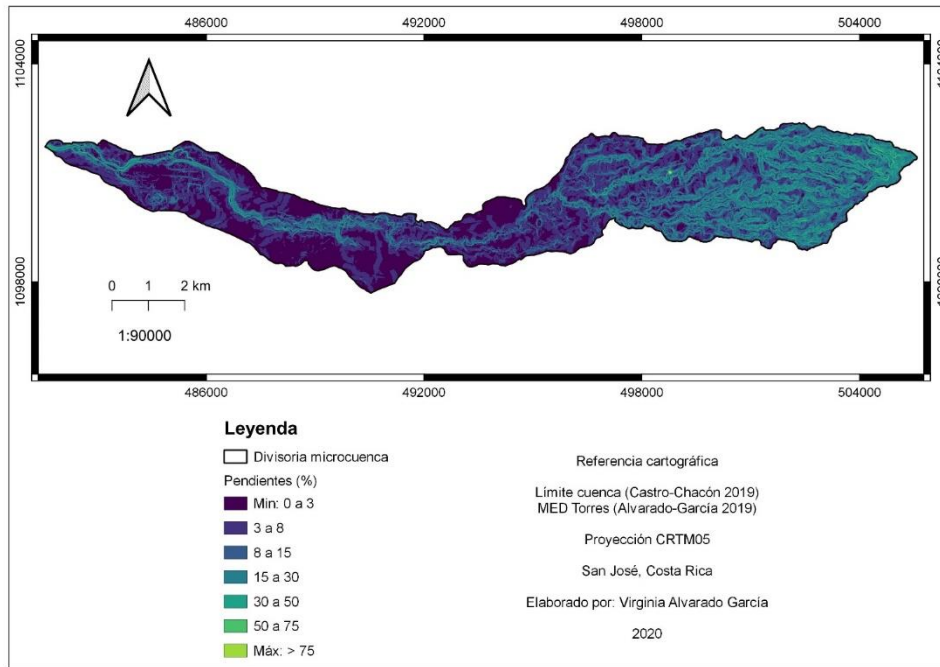


Figura 6. Mapa de pendientes de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.

Más del 90% de la microcuenca registró pendientes entre 0 a 30% y según el Decreto No. 23214 del MAG-MIRENEM (1994), son clasificadas como planas a onduladas; mientras que, menos del 1% presentó pendientes elevadas o escarpadas (Cuadro 6). La pendiente media de la cuenca, S, fue de 11%.

Cuadro 6. Clasificación de pendientes en la microcuenca del río Torres, Costa Rica

Pendiente (%)	Área (km ²)	Porcentaje (%)	Clasificación
0 a 3	11.23	24.05	Plano
3 a 8	14.37	30.79	Ligeramente ondulado
8 a 15	8.07	17.29	Moderadamente ondulado
15 a 30	9.37	20,08	Ondulado
30 a 50	3,51	7.52	Fuertemente ondulado
50 a 75	0.12	0.26	Escarpado
Mayor a 75	0.00	0.01	Fuertemente escarpado

La pendiente media del cauce se obtuvo al dividir el desnivel altitudinal entre la longitud del cauce principal. En este caso, la pendiente promedio del cauce, S_c, fue de 3.21%. La figura 7 muestra el perfil longitudinal del curso principal de la microcuenca; es decir, la representación gráfica de las altitudes del río desde su nacimiento hasta su desembocadura.

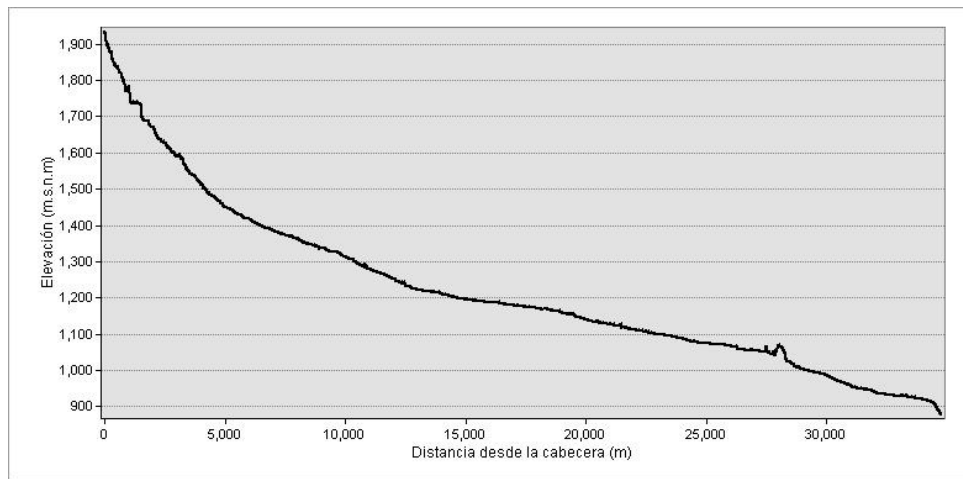


Figura 7. Perfil del cauce principal de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.

4.1.3 Características de drenaje

La red de drenaje del río Torres discurre por más de 46 km². Los principales afluentes son los ríos Purral y Navarro, así como las quebradas Cangrejo, Mozotal, Negritos, Patal, Patalillo y Salitrillo (Castro Chacón 2019). El cauce principal es de quinto orden (Fig. 8); la longitud total de los cauces, L_s , fue de 204.90 km y su densidad de drenaje, D , fue de 4.39 km/km².

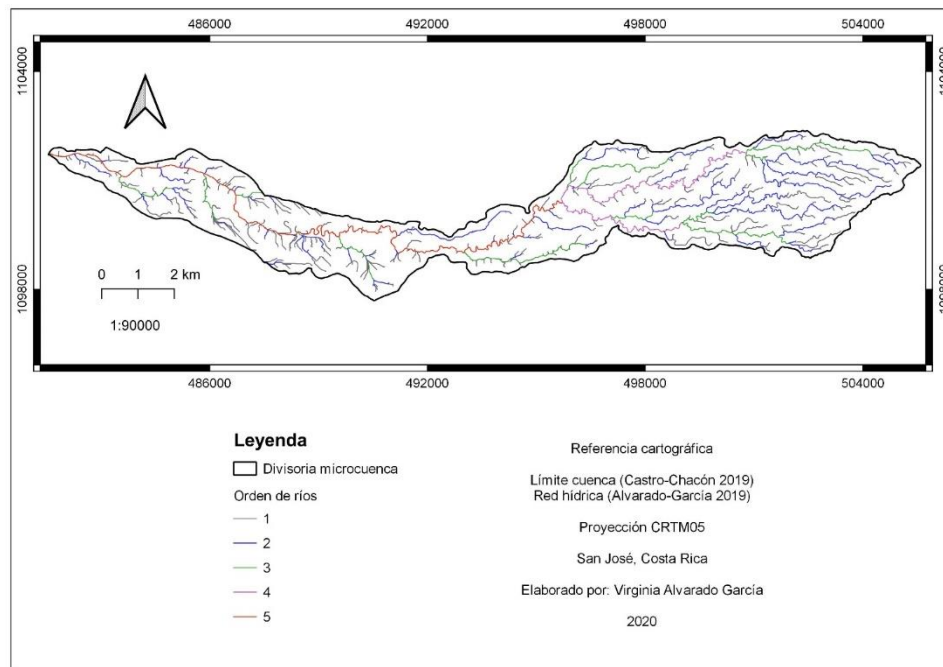


Figura 8. Red de drenaje de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.

Este valor fue alto, comparado con la Quebrada Seca (0.95 km/km²) y el río Virilla (1.62 km/km²); por lo que el drenaje natural de la microcuenca se considera favorable. Esto se debe a que, hidrológicamente, la densa red de drenaje y la distribución de las pendientes, permite una rápida

acumulación del flujo en la parte alta de la microcuenca. Además, su forma alargada y la disminución de anchura en cierta parte de la microcuenca, permite el tránsito del agua por un mismo cauce. Esta condición puede retardar o acelerar la respuesta hidrológica, dependiendo del uso de suelo presente (Sandí Rojas 2012; Oreamuno Vega y Villalobos Herrera 2015).

4.1.4 Características de tipo y uso de suelo

4.1.4.1 Tipo de suelo

Para determinar los tipos de suelos presentes en la microcuenca se utilizó la base de datos de suelos compilada por Sandoval y Mata (2014). Para este caso, únicamente se registró el orden Andisoles, con un área de 17.62 km²; el resto se consideró urbano, con 29.06 km². En cuanto a los subórdenes, se clasificaron en Udands y Ustands con una superficie de 0.42 km² y 17.19 km², respectivamente. En cuanto a su granulometría, presentaron texturas franco arenoso en la parte alta y franco arcillo arenoso en la parte media-baja (Alvarado-García y Zúñiga-Amador 2018); por lo que, se clasificaron en los grupos hidrológicos B y C, por sus condiciones de textura y drenaje.

4.1.4.2 Uso de suelo

Se identificaron cuatro usos principales, donde el uso predominante fue el urbanismo (59.40%), seguido por bosque secundario (21.49%), cultivos y pastos (14.81), y finalmente, suelo desnudo (4.31%) (Fig. 9). Según Trujillo-Acosta *et al.* (2017), las áreas verdes incluyen mayoritariamente bosque secundario y en menor medida, invernaderos, bosques intervenidos y plantaciones forestales. Esto se puede notar más en la parte alta, donde aún se conservan tacotales y cafetales; mientras que, en la parte media y baja, se concentra la zona industrial.

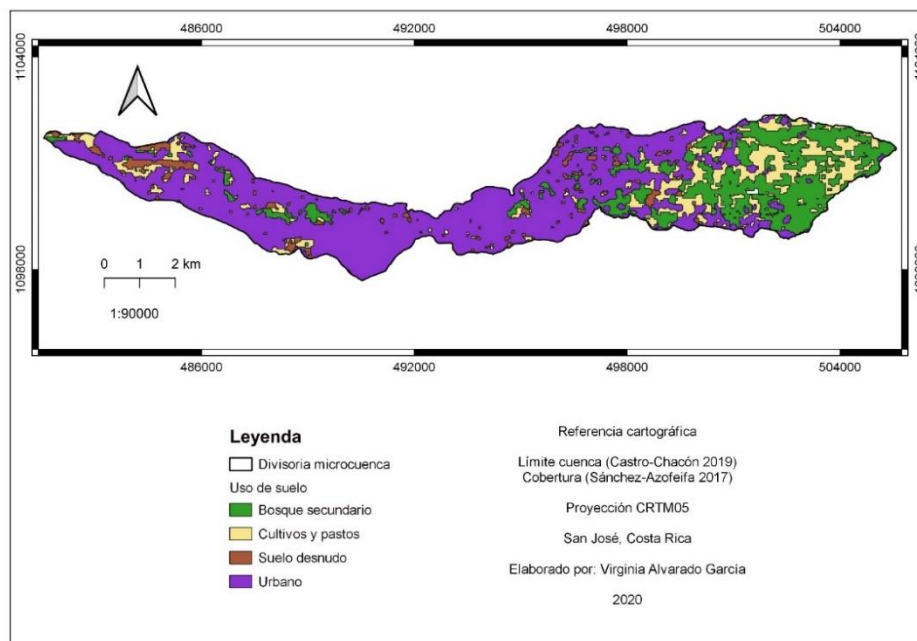


Figura 9. Uso de suelo en la microcuenca del río Torres, Costa Rica.

Según el artículo 33 de la Ley Forestal 7575 (La Gaceta 1996), se establece una franja de protección de 15 metros en zona rural y 10 metros en zonas urbanas cuando el terreno sea plano; mientras que, en terrenos quebrados, esa franja debe ser de 50 metros. Para estandarizar lo anterior, se hizo un buffer de 50 m a ambas márgenes del cauce principal, para determinar el uso actual de las zonas de protección. Con ello, fue evidente el porcentaje de invasión de la zona de protección (53.85%), sobre todo en la parte media y baja de la microcuenca.

4.1.5 Características geológicas y geomorfológicas

4.1.5.1 Geología

Según Ortiz-Malavassi (2015), la microcuenca está compuesta por facies proximales de rocas volcánicas recientes del cuaternario, compuestas por coladas de lava, aglomerados, lahares y ceniza volcánica. Predominan rocas volcánicas intrusivas someras. La geología de la microcuenca está determinada por las siguientes unidades geológicas: Lavas intracañón, Estratovolcán Pico de Piedra, Estratovolcán Cabeza de Vaca y Lavinas (Cuadro 7). Las formaciones de lavas intracañón y lavinas ocupan la mayor parte del área de la microcuenca (Castro Chacón 2019).

Cuadro 7. Caracterización geológica de la microcuenca del río Torres, Costa Rica. Fuente: Castro Chacón 2019

Unidad geológica	Descripción	Ubicación
Lavas intracañón	Son de tipo andesíticas piroxénicas, con presencia de tobas, brechas, ignimbritas y mantos de ceniza.	Parte baja (La Carpio, Pavas y el sector del Aeropuerto Tobías Bolaños).
Estratovolcán Pico de Piedra	Formado principalmente por coladas de lava, cubiertas por ceniza volcánica reciente.	Parte alta de la microcuenca.
Estratovolcán Cabeza de Vaca	Formado por coladas de lava y depósitos de ceniza.	Parte alta de la microcuenca.
Lavinas	Son lodos volcánicos de partículas finas con detritos y lavas irregularmente posicionadas no mayores a 2 metros de diámetro. Fueron formadas por una avalancha de detritos a gran velocidad (<i>debris avalanche</i>). Los depósitos de este material dieron origen a la llanura de deposición en la que se ubica el área urbana de la microcuenca.	Parte alta y media de la microcuenca.

Fuente: Castro Chacón 2019.

4.1.5.2 Geomorfología

Según Ortiz-Malavassi (2015), la microcuenca se encuentra compuesta por formaciones de origen volcánico, como el Relleno volcánico del Valle Central y el Volcán Irazú. Además, posee relieves de origen endógeno modelado, tectónico y exógeno (Castro Chacón 2019), como los siguientes:

- *Relieve endógeno modelado*: presencia de laderas de montaña con inclinaciones moderadas (5° y 15° de pendiente) en la mayoría de las áreas. Prevalecen los pastos, terrenos poco reforestados (menos del 1% es bosque y un 2% de presenta cultivos); y Lomeríos de baja pendiente ubicados en la parte baja de la microcuenca.
- *Relieve exógeno*: abarca los procesos de tipo erosivo gravitacional, acumulativo gravitacional, erosivo fluvial, acumulativo fluvial y antrópicos.
- *Formas de origen erosivo gravitacional*: desprendimientos en áreas de pendientes muy fuerte y erosionadas y deslizamientos traslacionales y rotacionales en zonas de inestabilidad activa, comúnmente en la parte alta.
- *Formas de origen acumulativo gravitacional*: depósitos de deslizamientos de laderas, caracterizados por la presencia de material suave poco consolidado; se encuentran en las cercanías del cauce en la cuenca media y baja.
- *Formas de origen erosivo fluvial*: predominan los fondos de valle localizados en toda la microcuenca; el proceso erosivo ha dejado expuesto a las rocas.
- *Formas de origen acumulativo fluvial*: predominan las laderas de valle rodadas por fondos de valle y con pendientes muy fuertes (entre los 15° y 30°); y las superficies planas, las cuales constituyen la formación más grande e importante de la microcuenca, donde casi el 80% es área urbana. Estas presentan gran influencia antrópica al tener baja pendiente y altos niveles de escorrentía superficial.
- *Formas de origen antrópico*: abarca la antigua cantera, canteras, terrazas, relleno y escarpes de cantera.

4.1.6 Características climáticas

La precipitación oscila entre los 2,000 a 3,000 mm anuales con meses secos de diciembre a abril y lluviosos de mayo a noviembre. La temperatura promedio es de 20°C y la humedad relativa media anual de 70% (Alvarado-García y Zúñiga-Amador 2018). La microcuenca presenta tres zonas de vida, tales como, Bosque muy húmedo Montano Bajo (bmh-MB), Bosque húmedo Premontano (bh-P) y Bosque muy húmedo Premontano (bmh-P) (Holdridge 1967).

4.1.7 Áreas de drenaje

El río Torres se comporta diferente en varios puntos, por lo que, se subdividió la microcuenca en tres áreas de drenaje (AD) de acuerdo con la topografía y la red hídrica. Se realizó de esta manera, con el fin de tener un panorama más amplio y ponderar con más detalle la distribución típica de la zona y otros parámetros para el modelo hidrológico.

En la figura 10 se puede observar la delimitación de las tres áreas; en donde la AD1 y AD2 se encuentran en la parte alta; mientras que la AD3, se extiende desde la parte media hasta la desembocadura. En cuanto a la división político-administrativo de cada una, se puede observar que la AD1 está representada casi totalmente por el cantón de Goicoechea (96.89%), la AD2 por el cantón de Montes de Oca (59.91%), y la AD3 por San José (71.25%).

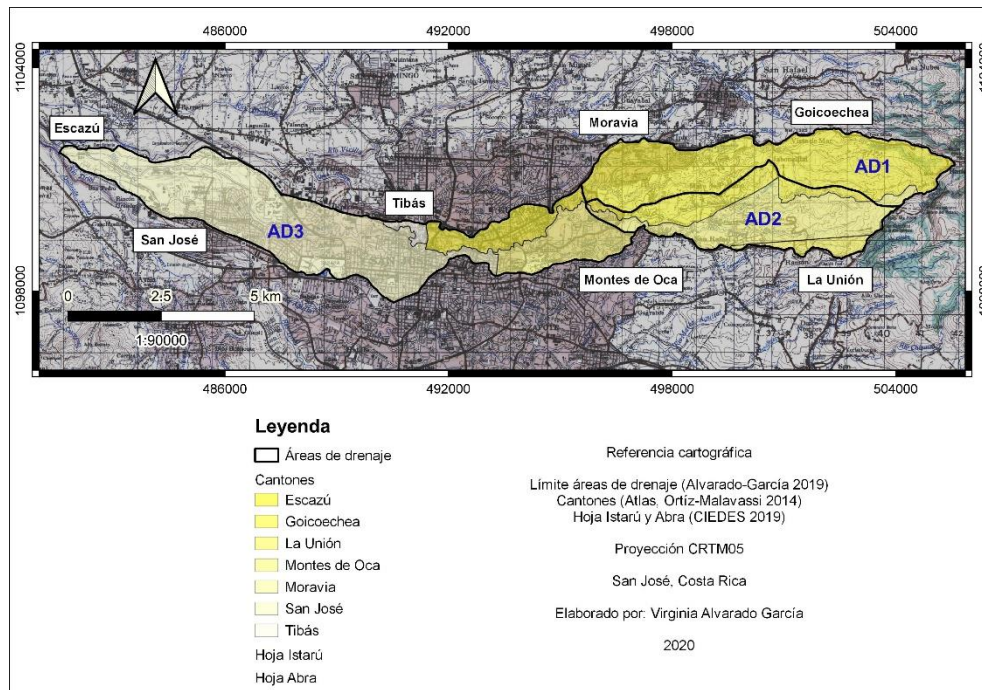


Figura 10. Áreas de drenaje de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.

A nivel general, los valores de compacidad y forma, al igual que su densa red hídrica y bajas pendientes (Cuadro 8), demuestran una menor susceptibilidad a crecientes, por lo que, el factor que afecta mayoritariamente la microcuenca es el uso de suelo.

Cuadro 8. Características morfológicas de las áreas de drenaje del río Torres, Costa Rica

Área de drenaje	A (km ²)	P (km)	I _G	K _f	E _{max} / E _{min} (m.s.n.m.)	S (%)	S _c (%)	L (km)	L _s (km)	D (km/km ²)
AD1	13.19	23.90	1.86	0.07	1,214 - 2,040	15	5.94	13.90	58.97	4.47
AD2	10.95	20.09	1.71	0.11	1,224 - 1,830	15	5.94	10.20	51.21	4.68
AD3	23.13	37.10	2.18	0.05	923 - 1,303	6	1.82	20.84	94.72	4.10

Si bien, la AD3 posee mayor área y perímetro que el resto, y la pendiente media es menor, el porcentaje de impermeabilización es hasta tres veces mayor que la AD2, por lo que, la respuesta hidrológica puede ser rápida y el caudal pico, mayor. Por el contrario, la AD2 está menos intervenida (Cuadro 9), lo que favorece la infiltración y menores caudales punta (Rey Valencia y Zambrano Nájera 2018).

Cuadro 9. Caracterización de los usos de suelo en las áreas de drenaje del río Torres, Costa Rica

	Área (km ²)		
	AD1	AD2	AD3
Bosque secundario	4.29 (32.51%)	5.06 (46.20%)	0.88 (3.79%)
Cultivos y pastos	2.90 (22.02%)	2.47 (22.57%)	1.51 (6.54%)
Suelo desnudo	0.39 (2.95%)	0.28 (2.58%)	1.32 (5.70%)
Urbano	5.61 (42.52%)	3.14 (28.65%)	19.42 (83.97%)
Total	13.19	10.95	23.13

Con respecto a las zonas de protección, la AD1 y AD2 poseen mayor conservación de sus márgenes (más del 45%); a diferencia de la AD3, donde la invasión supera el 62%. Por otro lado, con respecto al patrón de lluvias, el rango de precipitación en la parte alta oscila entre los 1,500 hasta los 3,000 mm; mientras que, en la AD3, no supera los 2,000 mm. En cuanto a las zonas de vida, predominan las tres zonas en la parte alta; en tanto que, para la AD3, únicamente se encuentra el bh-P y el bmh-P.

4.2 Objetivo 2. Análisis hidrológico con datos observados

4.2.1 Preprocesamiento de datos

4.2.1.1 Prueba de datos dudosos

Los procedimientos para tratar datos dudosos requieren de un criterio que involucra consideraciones matemáticas e hidrológicas (Chow *et al.* 1994). El U.S. Water Resources Council propone un método para omitir datos del análisis de frecuencia. Se basa en una ecuación de frecuencia que establece los umbrales para datos dudosos altos y bajos.

$$Y_H = \bar{y} + k_n s_y$$

$$Y_L = \bar{y} - k_n s_y$$

y_H es el umbral para datos altos

y_L es el umbral para datos bajos

\bar{y} es el promedio del logaritmo de los datos en estudio

s_y es la desviación estándar del logaritmo de los datos en estudio

k_n es el parámetro para el cálculo de datos dudosos

Los valores por encima de y_H y por debajo de y_L son considerados valores dudosos y, por lo tanto, se descartan para el análisis de frecuencia. Los valores de k_n varían según el tamaño de muestra y se utilizan para detectar datos dudosos en el 10% de significancia. Debido a la gran varianza que tienen los

datos hidrometeorológicos, se utiliza una transformación logarítmica; por lo tanto, se trabaja con el logaritmo de los valores en estudio (Paniagua Hernández 2016).

Para las seis estaciones analizadas, todas las series de datos se encontraron dentro del umbral máximo y mínimo, por lo que no se descartó ningún valor. Este registro de datos se utilizó para el análisis de frecuencia. La figura 11 muestra los datos de precipitación máxima anual para el período 1987 - 2019 de la estación de Sabana.

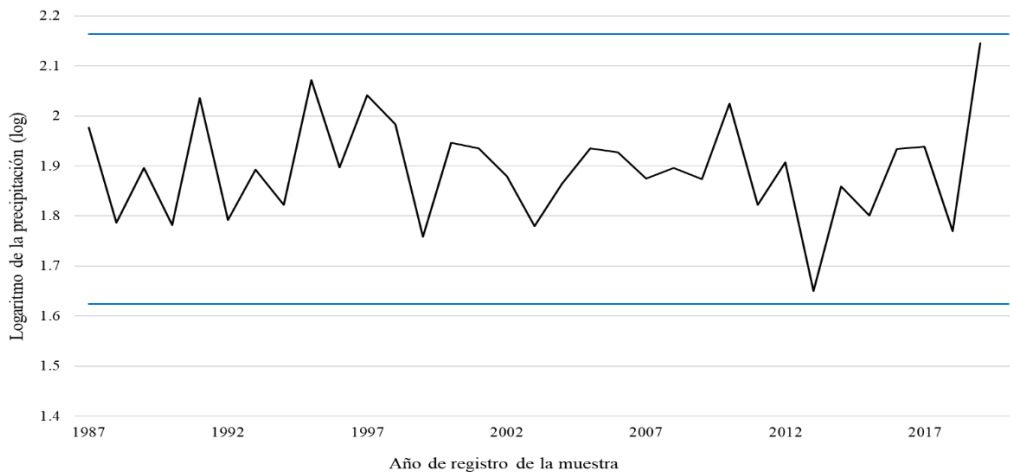


Figura 11. Prueba de datos dudosos para la estación de Sabana.

4.2.1.2 Análisis de frecuencia

El análisis de frecuencia es una herramienta estadística que permite estimar la magnitud de una variable en estudio asociado a un período de retorno, a partir de la información histórica de esta variable. La longitud y calidad de la serie histórica determinan su confiabilidad; así mismo, la incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionada. El objetivo de este análisis es relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia, mediante distribuciones probabilísticas (Fuentes Romero 2016).

4.2.1.3 Distribución Generalizada de Valores Extremos (GVE)

Mediante las distribuciones de probabilidad, se logra extrapolar valores que van más allá del rango de datos de la muestra; es decir, la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos fuera de la serie histórica (Paniagua Hernández 2016). En este caso, se utilizó la Distribución Generalizada de Valores Extremos (GVE) para lograr un mejor ajuste de los datos.

En 1955, A.F. Jenkinson desarrolló la distribución GVE, combinando los modelos de las familias Gumbel, Fréchet y Weibull (Jenkinson 1955; Rodríguez Rodríguez 2016). Esta distribución ha sido recomendada por el Consejo de Investigación del Medio Ambiente Natural desde 1975 (NERC 1975; Singh 1998).

Según Gilleland y Katz (2016), la distribución GVE considera los parámetros de ubicación, escala y forma. Cuando el valor de forma es igual a 0, la distribución es del Tipo I (Gumbel); cuando el factor de forma es mayor a 0, es de Tipo II (Fréchet); y cuando es menor a 0, es de Tipo III, es Weibull (Cuadro 10 y Fig. 12).

Cuadro 10. Parámetros para la discriminación del tipo de distribución de valores extremos

Distribución GVE	Ubicación	Escala	Forma
Gumbel	0	0	0
Fréchet	0	0	Mayor a 0
Weibull	0	0	Menor a 0

El parámetro de forma generalmente indica cuál de los tres modelos describe mejor el ajuste.

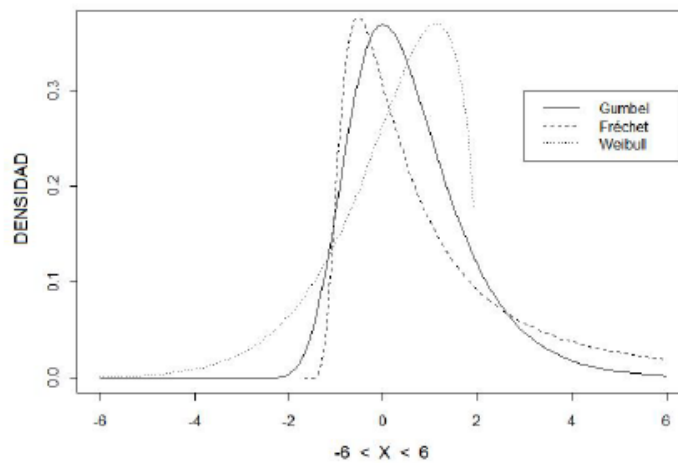
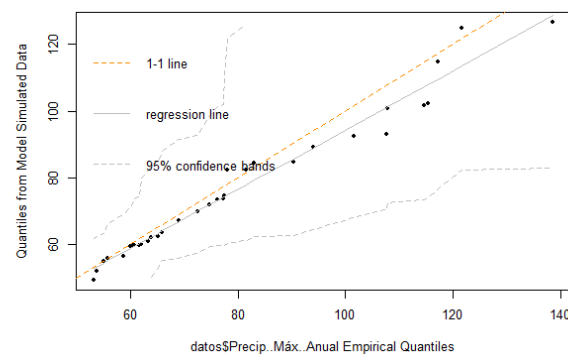
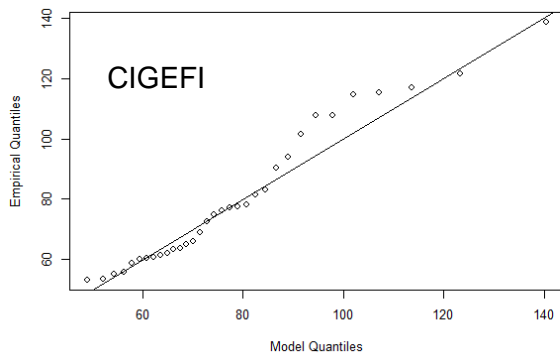
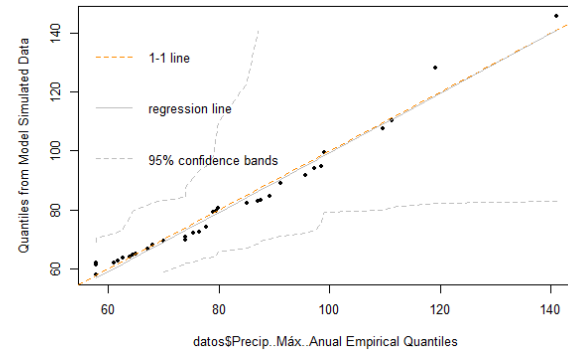
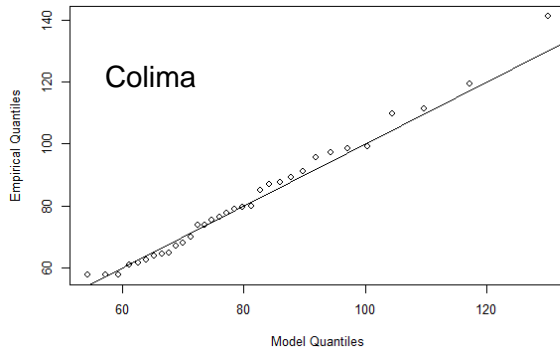
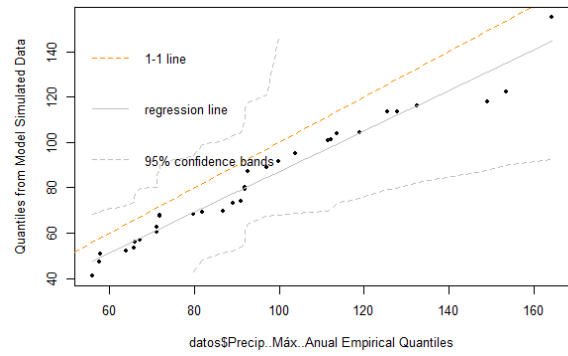
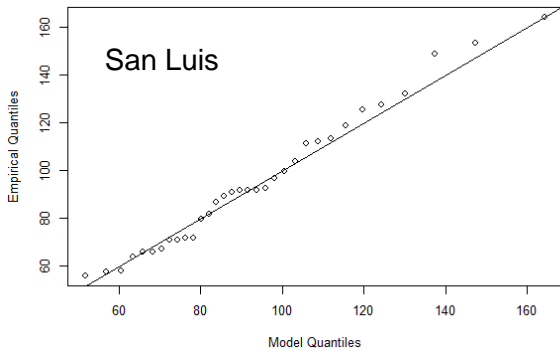
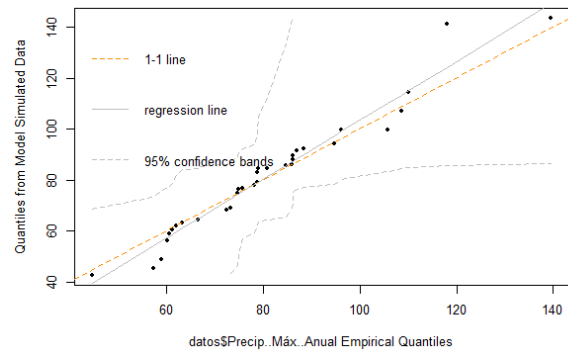
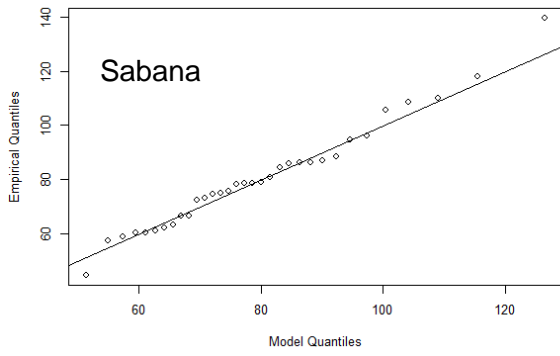


Figura 12. Representación gráfica de las distribuciones de Gumbel, Fréchet y Weibull. Fuente: Rodríguez Rodríguez 2016.

Con el programa estadístico R Studio 3.6.0, se utilizó la función “fevd” (ajuste de distribución de valor extremo) para estimar los parámetros de ubicación, escala y forma, en función de los datos de precipitación máxima anual de las estaciones en estudio. Así mismo, se utilizaron intervalos de confianza del 95% para conocer la precisión del ajuste realizado (Fig. 13).

fevd(x = datos\$Precip..Máx..Anual, type = "GEV", method = c("Lmoments"))



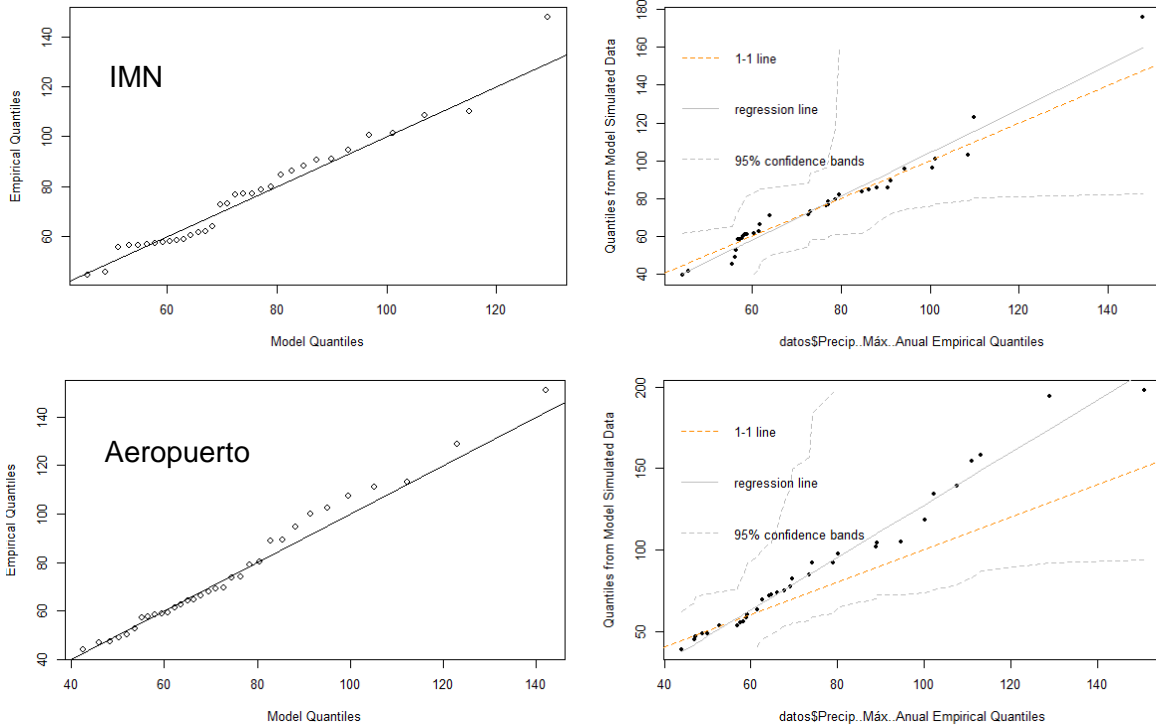
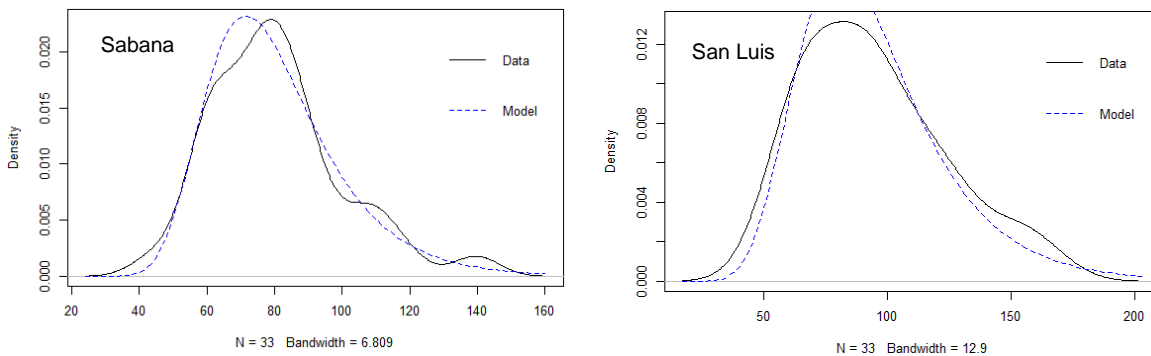


Figura 13. Ajuste de distribución de valor extremo para las estaciones en estudio.

La función de probabilidad ajustó la serie de máximos anuales al modelo; es decir, hubo una estimación adecuada del conjunto de datos, la cual se vio representada por el análisis de regresión. De todas las estaciones, CIGEFI mostró mayor dispersión en los datos.

4.2.1.4 Distribución Gumbel

Dados los parámetros de ubicación, escala y forma, la distribución que mejor se ajustó fue la de Gumbel (Fig. 14). Debido a la naturaleza de los eventos hidrológicos extremos, Gumbel es la distribución más utilizada para series de máximos anuales (González Fiagá y Rincón Márquez 2011), como fue este caso.



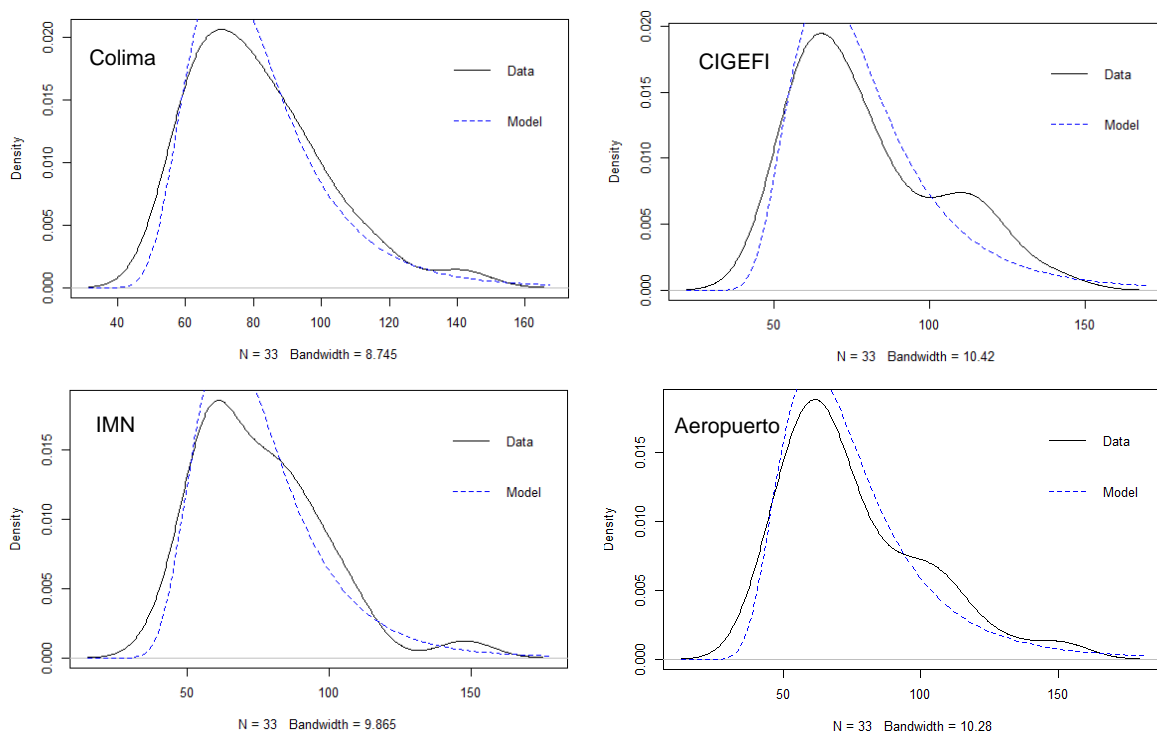


Figura 14. Distribución de Gumbel para las estaciones en estudio.

El parámetro de forma (Cuadro 10) fue contrastado con los valores obtenidos para las estaciones en estudio. Todas las estaciones mostraron un mejor ajuste con la distribución Gumbel, habiéndose corroborado con pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov. Luego, a partir del análisis de distribución de Gumbel se estimó la precipitación máxima anual para diferentes períodos de retorno (Cuadro 11).

Cuadro 11. Frecuencia de eventos máximos en la microcuenca del río Torres, Costa Rica

Tiempo de retorno (Años)	Precipitación (mm)					
	Sabana	San Luis	Colima	CIGEFI	IMN	Aeropuerto
2	77.29	89.64	77.23	74.33	71.03	69.48
5	95.15	116.31	94.89	95.22	90.59	92.14
10	106.91	134,14	107.44	110.80	104.44	109.23
25	121.69	156.86	124.35	132.73	123.03	133.53
50	132.60	173.85	137.71	150.79	137.66	153.74
100	143.39	190.84	151.68	170.39	152.92	175.85

A continuación, se muestran los valores de precipitación e intervalos de confianza calculados para la distribución de Gumbel (Fig. 15). De todas las estaciones, San Luis, Aeropuerto y CIGEFI presentaron el mayor volumen de precipitación para tiempos de retorno de 100 años, y Sabana, el menor. Es decir, la probabilidad de ocurrencia de 190 mm de precipitación máxima ocurrirá una vez en 100 años.

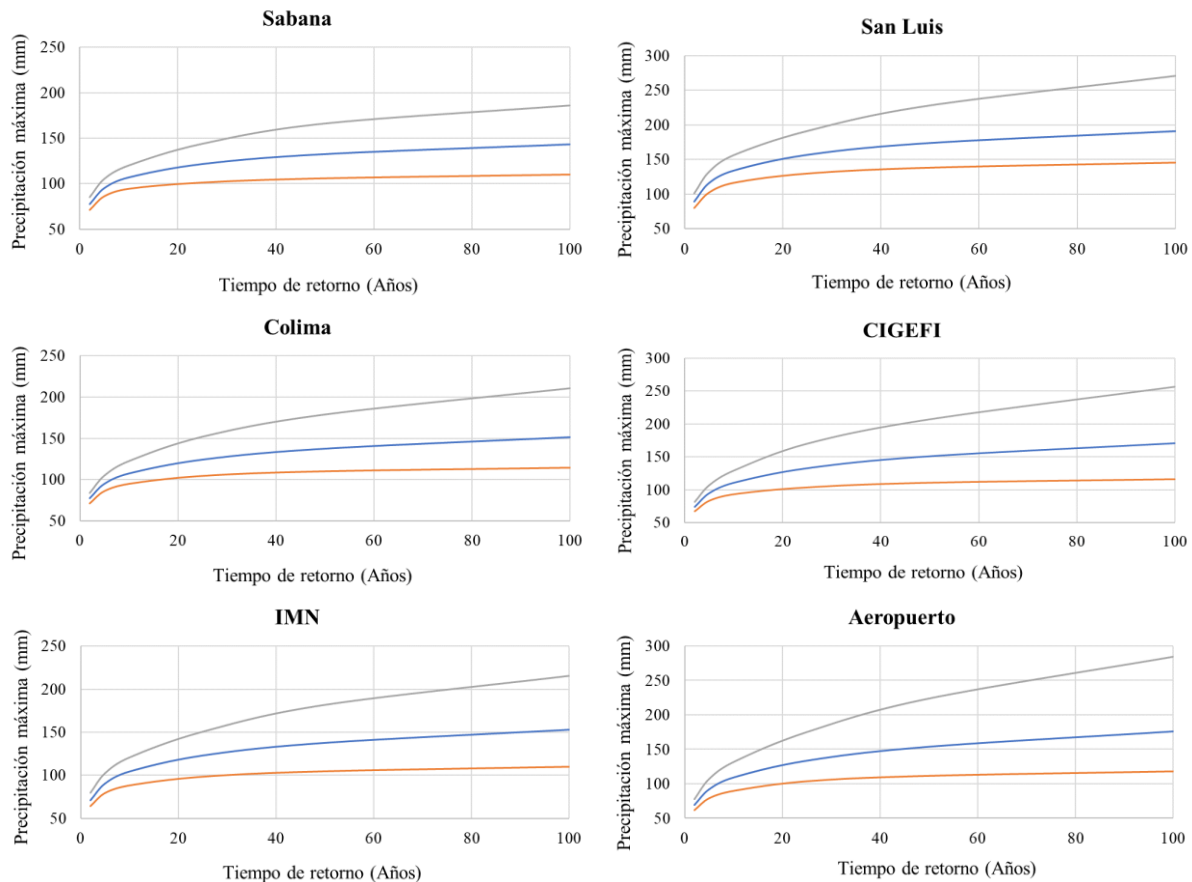


Figura 15. Estimación de precipitación e intervalos de confianza para las estaciones en estudio.

4.2.1.5 Distribución espacial de precipitación

Los eventos de precipitación son variables en tiempo y espacio; por lo que, existen métodos que permiten modelar el comportamiento de la precipitación sobre un área. Los polígonos de Thiessen son uno de los más populares y se basan en ponderar el valor de precipitación de cada estación meteorológica en función del área de influencia. Para determinar el área de influencia de cada estación, se forma una Red de Triángulos Irregulares (TIN); a partir de la unión de una estación y sus dos más cercanas (Sánchez Forero 2016).

Si se toma la microcuenca como una sola área, la estación que tiene mayor influencia es CIGEFI (54.67%), le sigue Sabana (15.02%), Aeropuerto (13.39%), IMN (8.23%), San Luis (6.08%) y finalmente, Colima (2.61%). Ahora bien, al dividir la microcuenca en sus áreas de drenaje, el área de influencia de las estaciones cambia sobre cada una y con ello, los pesos. La distribución temporal de las estaciones ajustadas se explica en el siguiente apartado.

4.2.1.6 Distribución temporal de precipitación

Además de la espacialidad de la variable, es fundamental conocer sobre su temporalidad; es decir, cómo varía la intensidad de lluvia durante el tiempo. Por ello, se trabajó con hietogramas característicos de la zona de estudio, elaborados por Murillo (1994), quien realizó un exhaustivo trabajo sobre intensidades de lluvia en la subcuenca del río Virilla, tomando en cuenta factores geomorfológicos e hidrometeorológicos.

Tomando como referencia el mapa de intensidades de Murillo (1994), se puede observar que la microcuenca posee intensidades de lluvia bajas, medias y altas; sin embargo, varía por área de drenaje (Fig. 16). La AD1 y AD2 tienen la mayor parte de su área en la zona de intensidad baja de precipitación (color celeste intenso); mientras que, la AD3, en la zona de intensidad alta (color azul oscuro).

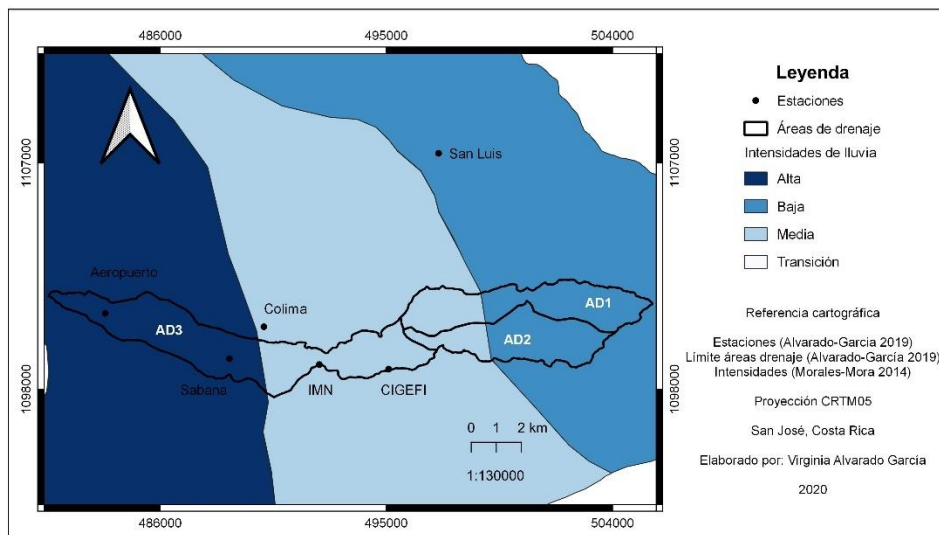


Figura 16. Zonas de intensidad de lluvia para la microcuenca del río Torres, Costa Rica.

Si bien, la estación de San Luis se encuentra en la zona de intensidad baja, ésta no fue parte del estudio de la cuenca del río Virilla; por lo que, según las estaciones que utilizó Murillo (1994), la estación en la categoría de intensidad baja más cercana a la AD1 y AD2, es San Josecito. Tomando como criterio que ambas estaciones están cerca y a una elevación similar (110 m.s.n.m. de diferencia), se puede decir que están bajo el mismo régimen de precipitación; por lo tanto, se asignó su hietograma (Cuadro 10) a ambas áreas de drenaje.

Por otro lado, la estación de Sabana y Aeropuerto se encuentran en la zona de intensidad alta; las cuales fueron utilizadas por Murillo (1994). De acuerdo con el método de polígonos de Thiessen, la estación de Sabana tuvo mayor influencia sobre la AD3, y por ello, se asignó su hietograma a área de drenaje (Cuadro 12).

Cuadro 12. Hietogramas característicos utilizados en el modelo hidrológico. Fuente: Murillo 1994

Tiempo (min)	San Josecito (%)	Sabana (%)
0	0.00	0.00
10	0.70	0.91
20	2.79	27.79
30	7.49	26.28
40	6.10	9.97
50	6.79	25.68
60	4.18	1.82
70	3.66	1.21
80	9.58	0.60
90	5.05	0.30
100	12.37	0.60
110	5.57	0.60
120	1.22	1.52
130	2.61	1.51
140	4.18	1.21
150	1.92	0.00
160	0.70	
170	0.17	
180	3.66	
190	7.32	
200	0.35	
210	0.17	
220	0.17	
230	3.83	
240	1.39	
250	0.35	
260	0.35	
270	1.05	
280	1.22	
290	1.05	
300	0.87	
310	0.70	
320	0.35	
330	0.52	
340	0.35	
350	0.52	
360	0.35	
370	0.18	

380	0.17	
390	0.00	

A partir de estos incrementos de precipitación y los volúmenes estimados con Gumbel, se obtuvo el hietograma para cada estación (San Luis y Sabana), con diferentes períodos de retorno (Cuadro 13 y 14). Para el modelo hidrológico se utilizaron únicamente los escenarios de 25, 50 y 100 años.

Cuadro 13. Precipitación para diferentes períodos de tiempo de retorno de la estación San Luis, río Torres, Costa Rica

T (min)	Precipitación (mm)					
	TR = 2	TR = 5	TR = 10	TR =25	TR = 50	TR = 100
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.63	0.81	0.94	1.10	1.22	1.34
20	2.50	3.25	3.74	4.38	4.85	5.32
30	6.71	8.71	10.05	11.75	13.02	14.29
40	5.47	7.09	8.18	9.57	10.60	11.64
50	6.09	7.90	9.11	10.65	11.80	12.96
60	3.75	4.86	5.61	6.56	7.27	7.98
70	3.28	4.26	4.91	5.74	6.36	6.98
80	8.59	11.14	12.85	15.03	16.66	18.28
90	4.53	5.87	6.77	7.92	8.78	9.64
100	11.09	14.39	16.59	19.40	21.51	23.61
110	4.99	6.48	7.47	8.74	9.68	10.63
120	1.09	1.42	1.64	1.91	2.12	2.33
130	2.34	3.04	3.50	4.09	4.54	4.98
140	3.75	4.86	5.61	6.56	7.27	7.98
150	1.72	2.23	2.58	3.01	3.34	3.66
160	0.63	0.81	0.94	1.10	1.22	1.34
170	0.15	0.20	0.23	0.27	0.30	0.32
180	3.28	4.26	4.91	5.74	6.36	6.98
190	6.56	8.51	9.82	11.48	12.73	13.97
200	0.31	0.41	0.47	0.55	0.61	0.67
210	0.15	0.20	0.23	0.27	0.30	0.32
220	0.15	0.20	0.23	0.27	0.30	0.32
230	3.43	4.45	5.14	6.01	6.66	7.31
240	1.25	1.62	1.86	2.18	2.42	2.65
250	0.31	0.41	0.47	0.55	0.61	0.67
260	0.31	0.41	0.47	0.55	0.61	0.67
270	0.94	1.22	1.41	1.65	1.83	2.00
280	1.09	1.42	1.64	1.91	2.12	2.33
290	0.94	1.22	1.41	1.65	1.83	2.00

300	0.78	1.01	1.17	1.36	1.51	1.66
310	0.63	0.81	0.94	1.10	1.22	1.34
320	0.31	0.41	0.47	0.55	0.61	0.67
330	0.47	0.60	0.70	0.82	0.90	0.99
340	0.31	0.41	0.47	0.55	0.61	0.67
350	0.47	0.60	0.70	0.82	0.90	0.99
360	0.31	0.41	0.47	0.55	0.61	0.67
370	0.16	0.21	0.24	0.28	0.31	0.34
380	0.15	0.20	0.23	0.27	0.30	0.32
390	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	89.64	116.31	134.14	156.86	173.85	190.84

Cuadro 14. Precipitación para diferentes períodos de tiempo de retorno de la estación Sabana, río Torres, Costa Rica

T (min)	Precipitación (mm)					
	TR = 2	TR = 5	TR = 10	TR =25	TR = 50	TR = 100
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.70	0.87	0.97	1.11	1.21	1.30
20	21.48	26.44	29.71	33.82	36.85	39.85
30	20.31	25.00	28.09	31.98	34.85	37.68
40	7.71	9.49	10.66	12.13	13.22	14.30
50	19.85	24.43	27.45	31.25	34.05	36.82
60	1.41	1.73	1.95	2.21	2.41	2.61
70	0.94	1.15	1.29	1.47	1.60	1.74
80	0.46	0.57	0.64	0.73	0.80	0.86
90	0.23	0.29	0.32	0.37	0.40	0.43
100	0.46	0.57	0.64	0.73	0.80	0.86
110	0.46	0.57	0.64	0.73	0.80	0.86
120	1.17	1.45	1.62	1.85	2.02	2.18
130	1.17	1.44	1.61	1.84	2.00	2.17
140	0.94	1.15	1.29	1.47	1.60	1.74
150	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	77.29	95.15	106.91	121.69	132.60	143.39

4.2.2 Modelo hidrológico

4.2.2.1 Número de curva por área de drenaje

El método del número de curva distingue cuatro grupos hidrológicos del suelo. Según Villón Béjar (2013), el tipo A tiene alta capacidad de infiltración (7.62 – 11.43 mm/h); mientras que el D produce tasas de 0 – 1.27 mm/h. Los suelos B y C presentan condiciones hidrológicas intermedias (3.81 – 7.62 y

1.27 – 3.81 mm/h, respectivamente). La National Resources Conservation Service de Estados Unidos, NRCS (NRCS 2002) los describe así:

Grupo A: suelos con bajo potencial de escurrimiento, alta permeabilidad y capacidad de infiltración, aun cuando estén húmedos. Principalmente en suelos profundos y con texturas arenosas o areno-limosas (gruesas).

Grupo B: suelos con moderada capacidad de infiltración cuando están saturados; buen drenaje. Con mediana a alta profundidad, con texturas franca, franco-arenosa o arenosa (moderadamente finas a moderadamente gruesas).

Grupo C: suelos con escasa capacidad de infiltración cuando están saturados; con texturas franco-arcillosa o arcillosa (moderadamente finas a finas). Se incluyen suelos con horizontes superficiales impermeables.

Grupo D: suelos con alta escorrentía y baja capacidad de infiltración; con texturas arcillosas (finas). Se incluyen suelos con una capa arcillosa superficial muy impermeable; así como suelos jóvenes, poco profundos, suelos salinos y suelos con alto nivel freático.

Ferrer Julià (2003) presenta una equivalencia entre grupos hidrológicos y clases texturales del suelo propuestas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA (Cuadro 15).

Cuadro 15. Grupos hidrológicos asociados a la clase textural del suelo

Grupo hidrológico	Textura
A	Arenosa, Arenosa-franca
B	Franco-arenosa
C	Arcillo-arenosa, Franca, Franco-arcillosa, Franco-arcillo-arenosa, Franco-arcillo-limosa, Franco-limosa
D	Arcillosa, Limosa, Arcillo-limosa

La condición de humedad antecedente (AMC) toma en cuenta la humedad previa de la cuenca, determinada por la lluvia total en cinco días antes de una tormenta. AMC I presenta suelos secos y hay un mínimo potencial de escurrimiento; AMC III en donde la cuenca está saturada y se da un máximo potencial de escurrimiento; AMC II es el promedio (Villón Béjar 2013). Las tablas presentadas por el NRCS aplican para condiciones antecedentes de humedad normales (AMC II). En este caso se utilizará esta condición para determinar el número de curva.

Por otro lado, según Villón Béjar (2013), la condición hidrológica hace referencia a la capacidad de la superficie de la cuenca para favorecer o dificultar el escurrimiento directo, en función de la cobertura vegetal. Es una caracterización cualitativa (pobre, regular, buena, entre otros).

De esta forma, la condición y el grupo hidrológicos del suelo determinan el número de curva; el cual va desde 0 a 100 (donde 100 representa terrenos impermeables y lisos; por lo tanto, mayor umbral de escorrentía). Las áreas de drenaje en estudio presentaron una condición hidrológica regular a pobre; por lo tanto, el número de curva varió entre 60 y 94 (Cuadro 16).

Cuadro 16. Número de curva por condición y el grupo hidrológicos

Uso de suelo	Condición hidrológica	Número de curva	
		Grupo hidrológico B	Grupo hidrológico C
Bosque secundario	regular	60	73
Cultivos y pastos	regular	69	79
Suelo desnudo	pobre	86	91
Urbano	pobre	92	94

El número de curva de cada área de drenaje se ponderó tomando en cuenta la clasificación de grupos hidrológicos en función de la textura del suelo (López Cadenas de Llano 1998; NRCS 2002; Ferrer Julià 2003). Así, la combinación de tipo y uso de suelo presente cada área de drenaje, y tomando en cuenta que la composición volcánica es similar en toda la microcuenca, el cuadro 17 presenta el cálculo correspondiente. La columna N*A de este cuadro es el producto del Número de curva, N, y el área, A. Finalmente, la sumatoria de esta columna se divide entre el área total y se obtiene el valor medio de N.

Cuadro 17. Número de curva por áreas de drenaje del río Torres, Costa Rica

AD1				
Uso de suelo	Grupo hidrológico	Número de curva, N	Área, A (km ²)	N*A
Bosque secundario	B	60	4.29	257.40
Cultivos y pastos		69	2.90	200.10
Suelo desnudo		86	0.39	33.54
Urbano		92	5.61	516.12
		Σ	13.19	1,007.16
		N ponderado		76
AD2				
Uso de suelo	Grupo hidrológico	Número de curva, N	Área, A (km ²)	N*A
Bosque secundario	B	60	5.06	303.60
Cultivos y pastos		69	2.47	170.43
Suelo desnudo		86	0.28	24.08
Urbano		92	3.14	288.88
		Σ	10.95	786.99
		N ponderado		72

AD3				
Uso de suelo	Grupo hidrológico	Número de curva, N	Área, A (km ²)	N*A
Bosque secundario	C	73	0.88	64.24
Cultivos y pastos		79	1.51	119.29
Suelo desnudo		91	1.32	120.12
Urbano		94	19.42	1,825.48
		Σ	23.13	2,129.13
		N ponderado		92

Es evidente una relación proporcional entre la cobertura urbana y el número de curva de cada área. Entre mayor es el área urbanizada, mayor es el número de curva asociado a esa área; por lo que, para un mismo evento de lluvia, el volumen de escorrentía incrementa en áreas más intervenidas (Rey Valencia y Zambrano Nájera 2018) como la AD3.

4.2.2.2 Hidrograma Unitario de Snyder

Como método de transformación se eligió el método de Snyder, en el cual, la duración de la lluvia del hidrograma está relacionada con el tiempo de respuesta de la cuenca. Este tiempo de retardo (t_{lag}) es la diferencia de tiempo que existe entre el centroide del hietograma de exceso de precipitación y el pico del hidrograma generado (Arteaga Naranjo 2017). En el programa HEC-HMS, se requieren dos parámetros, el tiempo de retardo en horas (t_{lag}) y el coeficiente al pico (C_p).

El primero de ellos se obtiene con la siguiente ecuación:

$$t_{lag} = C_1 * C_t * (L * L_c)^{0.3}$$

Donde:

t_{lag} : Tiempo de retardo (h)

L: Longitud del cauce principal (km)

L_c : Longitud del cauce principal desde el punto de control hasta el punto del cauce más cercano al centro de gravedad de la cuenca (km)

C_1 : 0.75

C_t : coeficiente regional que representa la pendiente y la capacidad de almacenamiento de la cuenca (varía entre 0.3 y 12).

A pesar de que el HEC-HMS no pide el valor del coeficiente C_t , es necesario para obtener el tiempo de retardo. Según Sandí Rojas (2012), la ecuación es la siguiente:

$$C_t = 1.66 * X^{-0.847}$$

Donde X depende de las longitudes de los cauces:

$$X = (L * L_c)^{0.3}$$

Por otro lado, el coeficiente al pico (C_p) relaciona el tiempo base y el tiempo de respuesta de la cuenca; se da en función del uso de la tierra en la cuenca. Por lo general varía entre 0.4 a 0.8 (Arteaga Naranjo 2017); se estima a criterio del usuario o calibrado con las características físicas de la cuenca (Scharffenberg 2016). En este caso, se utilizó la ecuación propuesta por Sandí Rojas (2012) y el criterio basado en el uso de suelo de cada área de drenaje.

$$C_p = 0.075 * I_G^2 - 0.35 * I_G + 0.83$$

El cuadro 18 resume los parámetros utilizados en el modelo de transformación de Snyder. A pesar de que, en la literatura, no es común encontrar referencias sobre estos parámetros, los valores propuestos por Sandí Rojas (2012) significan un gran insumo para el diseño hidrológico, la planificación y la evaluación de la infraestructura urbana. Estas relaciones son aplicables para la subcuenca del río Virilla, por lo que, los valores reportados en este estudio concuerdan con los datos encontrados para el río Torres.

Cuadro 18. Parámetros del hidrograma unitario de Snyder por áreas de drenaje, río Torres, Costa Rica

Área de drenaje	C_t	t_{lag} (h)	C_p
AD1	0.50	1.55	0.44
AD2	0.58	1.51	0.45
AD3	0.43	1.61	0.42

Como se mencionó anteriormente, esto se hizo tomando en cuenta una condición antecedente de humedad normal (AMC II). Sandí Rojas (2012) calibró el modelo para condiciones AMC I y AMC III y encontró que, al aumentar la condición antecedente de humedad, el valor de C_p incrementa porque se da menos infiltración y se alcanza un mayor pico de caudal. Por el contrario; el valor de C_t tiende a disminuir, ya que el tiempo de desfase decrece y aumenta un coeficiente al pico (hidrogramas cortos y más pronunciados). En resumen, mientras más humedad haya en el suelo, la respuesta hidrológica de la cuenca será más rápida (Álvarez *et al.* 2001).

Con respecto al tránsito de crecientes, se utilizó el método de Muskingum para modelar el tramo (Singh y McCann 1980). Este método requiere de dos parámetros: K y X , los cuales fueron, 1.2 horas y 0.25, respectivamente.

4.2.2.3 Elementos del modelo Hidrológico

El modelo de la cuenca consistió en tres áreas de drenaje, un tramo, dos confluencias y una salida hacia el río Tiribí, donde el río Torres drena sus aguas (Fig. 17, Cuadro 19).

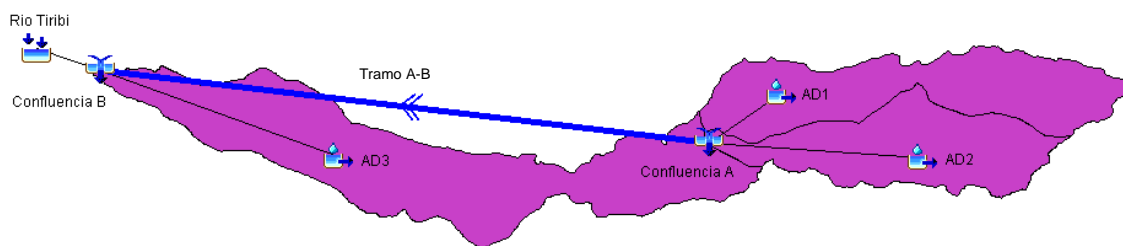


Figura 17. Representación del modelo hidrológico de la microcuenca del río Torres, Costa Rica.

Cuadro 19. Elementos del modelo hidrológico en HEC-HMS.

Elementos	Descripción	Conexión aguas arriba	Conexión aguas abajo
AD1	Área de drenaje 1	Ninguna	Unión A
AD2	Área de drenaje 2	Ninguna	Unión A
Unión A	Confluencia AD1 y AD2	S1 y S2	Tramo A-B
Tramo A-B	Tramo de confluencia A con B	Unión A	Unión B
AD3	Área de drenaje 3	Ninguna	Unión B
Unión B	Confluencia Tramo A-B y AD3	Tramo A-B y S3	Río Tiribí
Río Tiribí	Salida del río Torres	Unión B	Ninguna

4.2.2.4 Escenario 1: TR 25 años

El mayor aporte de volumen de escurrimiento y pico de descarga sucedió aguas abajo en la AD3; mientras que, en la parte alta hubo un notorio retardo de al menos dos horas en el tiempo al pico de descarga (Cuadro 20). Los caudales pico de la AD1 y AD2 llegaron de forma casi simultánea a la confluencia A. El grueso del volumen escurrió desde dos y hasta cinco horas después de iniciada la precipitación; a la vez que, el caudal pico se registró rápidamente (aproximadamente tres horas y media) en la salida de la cuenca.

Cuadro 20. Resumen de parámetros hidrológicos para TR = 25 años

Elemento	Caudal pico (m ³ /s)	Tiempo al pico (hh:mm)	Escurrimiento directa (mm)
AD1	56.9	04:12	82.96
AD2	43.2	04:15	74.35
Confluencia A	100.1	04:14	79.05
Tramo A-B	92.9	05:18	74.27
AD3	154.5	02:07	94.31
Confluencia B	172.8	03:33	84.07

En cuanto a las pérdidas por infiltración, fueron mayores aguas arriba. El coeficiente de escurrimiento fue elevado en la AD3 (Fig. 18); esto se debe a que, el espacio urbano altera la dinámica de sistema natural y modifica el funcionamiento hidrológico; la impermeabilización del suelo conlleva a una disminución de la infiltración y una aceleración del escurrimiento (Zapperi 2014).

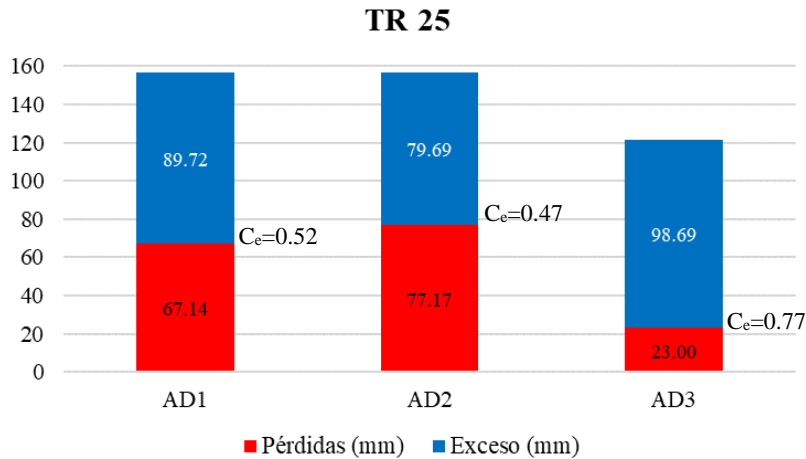


Figura 18. Pérdidas y precipitación en exceso para TR = 25 años.

El comportamiento de una cuenca se define por los hidrogramas de sus áreas de drenaje y el tránsito hidrológico. Uno de los supuestos del modelo hidrológico es que llueve de manera simultánea en toda la cuenca; por lo que es de esperar que los caudales pico en áreas de drenaje más cercanas a la desembocadura, lleguen antes que los picos de caudal de la parte alta. Este tránsito se traduce en un tiempo de retraso de los caudales generados aguas arriba (Oreamuno Vega y Villalobos Herrera 2015). El pico del hidrograma entre la confluencia A y B se retardó 64 minutos; en tanto que, el aporte de la AD3 a la confluencia B, sucedió tres horas antes, con un caudal mayor.

A pesar de que la morfometría y el uso de suelo son aspectos determinantes en la respuesta hidrológica de una cuenca (Rey Valencia y Zambrano Nájera 2018); el patrón espacio-temporal de lluvias lo es también (Aguayo *et al.* 2016). La estación Sabana concentra la precipitación mucho más que San Luis, por lo que, la magnitud en los volúmenes y caudales fue mayor aguas abajo.

Finalmente, en el hidrograma acumulado se observó una tendencia al doble pico de descarga (Fig. 19), debido al tránsito de los caudales generados en la parte alta. Además, el retardo y la atenuación fueron más evidentes en el hidrograma del tramo.

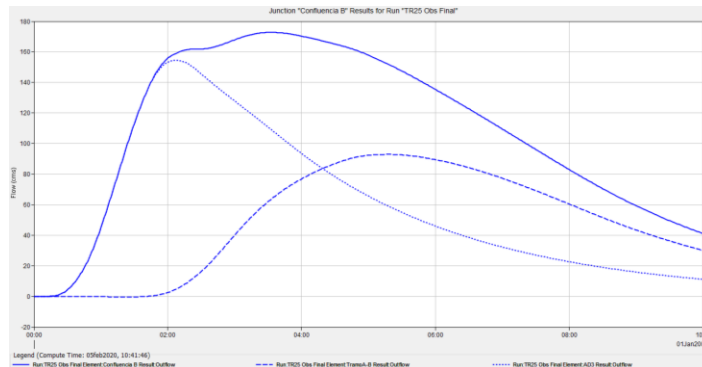


Figura 19. Hidrograma acumulado para TR = 25 años.

4.2.2.5 Escenario 2: TR 50 años

Al igual que para 25 años, los valores de escurrimiento y caudales fueron mayores en la AD3; y menores, aguas arriba (Cuadro 21). Así mismo, el volumen de descarga osciló entre las dos y hasta las cinco horas después de iniciada la precipitación. Los tiempos al pico fueron similares al escenario 1, en tanto que, las variaciones se dieron sobre todo en la magnitud de los volúmenes de descarga (aproximadamente 11 mm más, en promedio).

Cuadro 21. Resumen de parámetros hidrológicos para TR = 50 años

Área de drenaje	Caudal pico (m ³ /s)	Tiempo al pico (hh:mm)	Escorrentía directa (mm)
AD1	66.6	04:07	96.86
AD2	51.0	04:11	87.71
Confluencia A	117.6	04:09	92.71
Tramo A-B	109.2	05:13	87.19
AD3	171.2	02:07	104.50
Confluencia B	196.8	03:37	95.66

En cuanto a las pérdidas por infiltración, hubo un leve aumento en las tres áreas de drenaje, con valores más altos aguas arriba (Fig. 20). El coeficiente de escorrentía se mantuvo para AD2 y AD3; a pesar del considerable incremento de la escorrentía (hasta 12 mm más), en toda la microcuenca.

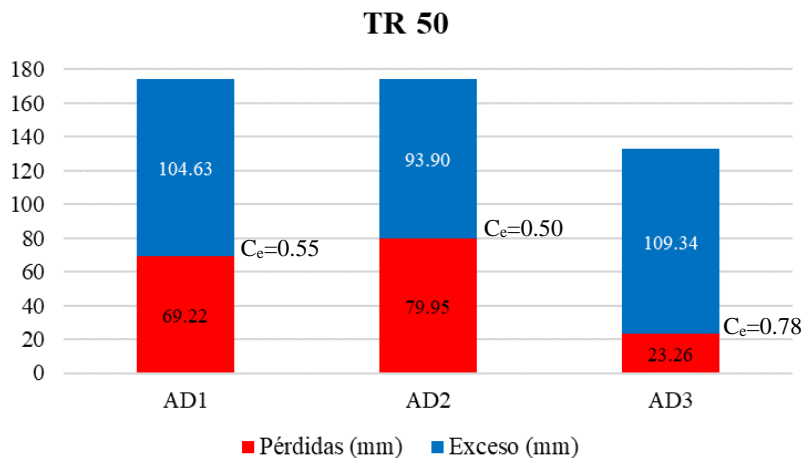


Figura 20. Pérdidas y precipitación en exceso para TR = 50 años.

El comportamiento de la microcuenca fue similar al escenario 1. Esto se simuló, conservando el número de curva, por lo que, sin alterar el uso de suelo existente, la tendencia se mantiene a 50 años plazo. La figura 21 demuestra que la respuesta hidrológica fue rápida en la AD3 y atenuada en la confluencia A.

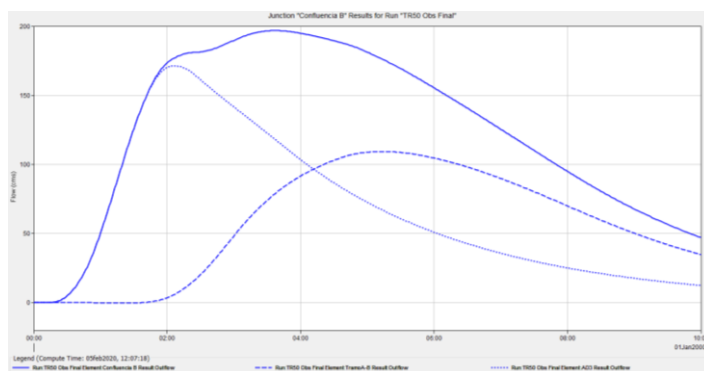


Figura 21. Hidrograma acumulado para TR = 50 años.

4.2.2.6 Escenario 3: TR 100 años

Al igual que para 25 y 50 años, los valores de escurrimiento y caudales fueron mayores en la AD3; y menores, aguas arriba; sin embargo, la escorrentía superó los 100 mm en las tres áreas de drenaje (Cuadro 22). El caudal pico en la desembocadura sobrepasó los 220 m³/s, lo cual es un valor alto, comparado los 199.26 m³/s reportado por Rivera Torres (2012) en el río La Soledad, Honduras. Por otro lado, los tiempos al pico fueron similares al escenario 1 y 2; inclusive el incremento de la magnitud de los volúmenes de descarga (aproximadamente 11 mm más, en promedio).

Cuadro 22. Resumen de parámetros hidrológicos del modelo para TR = 100 años

Área de drenaje	Caudal pico (m ³ /s)	Tiempo al pico (hh:mm)	Escorrentía directa (mm)
AD1	76.3	04:03	111.03
AD2	58.9	04:07	101.41
Confluencia A	135.2	04:05	106.67
Tramo A-B	125.6	05:10	100.40
AD3	187.8	02:06	114.61
Confluencia B	221.6	03:39	107.35

En cuanto a las pérdidas por infiltración, hubo un leve aumento en las tres áreas de drenaje, con valores más altos aguas arriba (Fig. 22). Si bien, la parte inferior de la microcuenca posee mayor zonas intervenidas que a parte alta; su capacidad de carga está sobreexplotada y las pérdidas por infiltración son mínimas; por el contrario, la parte alta, aún conserva sitios con vegetación y con densidades de drenaje que ayudan a liberar el flujo del agua (Rey Valencia y Zambrano Nájera 2018). El coeficiente de escorrentía aumentó 0.03 para la AD1 y AD2; y 0.01 para AD3.

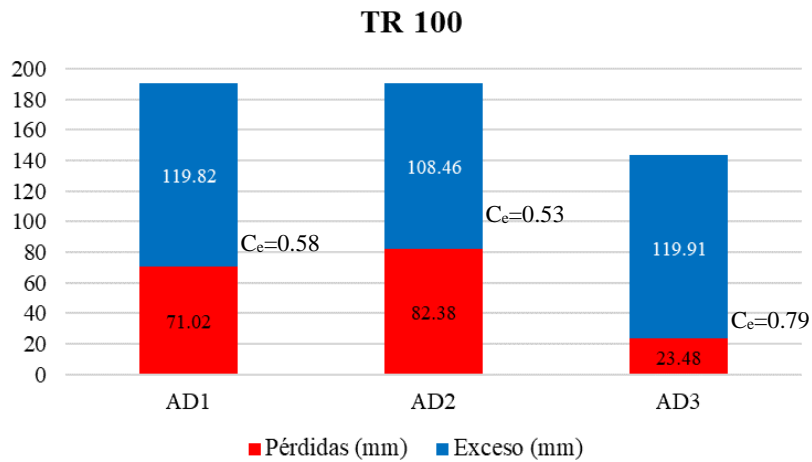


Figura 22. Pérdidas y precipitación en exceso para TR = 100 años.

El uso suelo predominantemente urbano en la AD3, transforma la respuesta hidrológica de la microcuenca, ya que, el área impermeable genera cambios en los volúmenes de escorrentía (Rey Valencia y Zambrano Nájera 2018). Por el contrario, el tiempo para alcanzar el caudal pico en las zonas menos intervenidas, fue retardado (Fig. 23); lo que hace que, la respuesta total la microcuenca no sea tan rápida, dada la atenuación del hidrograma, debido principalmente al uso de suelo más conservado.

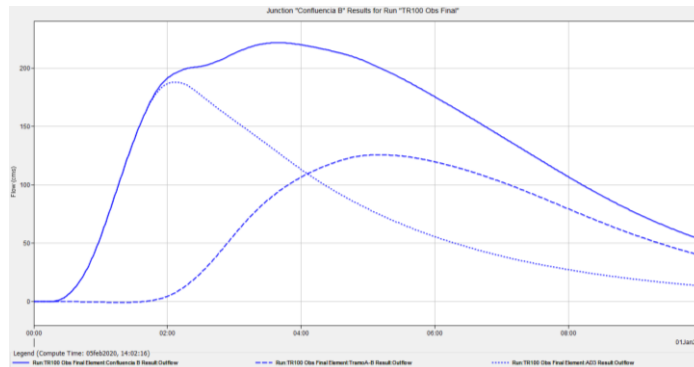


Figura 23. Hidrograma acumulado para TR = 100 años.

Durante los tres períodos analizados, la tendencia al incremento fue notable. Para la AD1 y AD2, hubo un incremento de menos de un 20% de 25 a 50 años, y más de un 30% en un lapso de 75 años; mientras que, para la AD3, el incremento fue menor entre períodos de tiempo (Fig. 24).

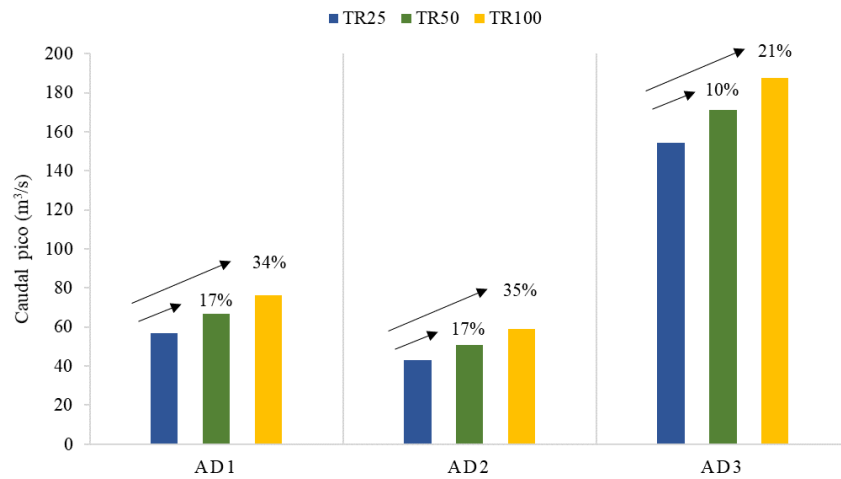


Figura 24. Incrementos en el caudal pico durante TR = 25, 50 y 100 años.

4.3 Objetivo 3. Análisis hidrológico con datos proyectados

4.3.1 Preprocesamiento de datos

4.3.1.1 Prueba de datos dudosos

Para la estación Sabana, la serie de datos se encontró dentro del umbral máximo y mínimo, por lo que no se descartó ningún valor. Este registro de datos se utilizó para el análisis de frecuencia. La figura 25 muestra los datos de precipitación máxima anual para el período 2006 - 2050 de la estación de Sabana.

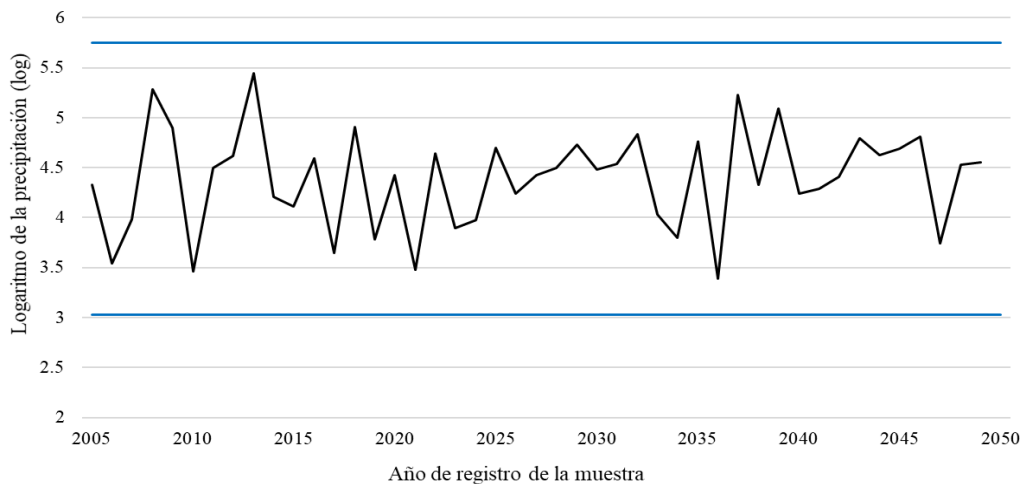


Figura 25. Prueba de datos dudosos para la estación de Sabana RCP8.5.

4.3.1.2 Análisis de frecuencia

Al igual que en el objetivo 2, se utilizó la GVE para lograr un mejor ajuste de los datos. Con el programa estadístico R Studio 3.6.0, se utilizó la función “fevd” (ajuste de distribución de valor extremo)

para estimar los parámetros de ubicación, escala y forma, en función de los datos de precipitación máxima anual de la estación Sabana.

De la misma manera, se utilizaron intervalos de confianza del 95% para determinar los valores estimados de la media de la muestra, que en nuestro caso es la serie de tiempo (Fig. 26). El registro de precipitación máxima anual se ajustó satisfactoriamente, según las pruebas de bondad de Kolmogorov – Smirnov. En general, hubo una adecuada estimación de la muestra al modelo, con algunos datos dispersos que se muestran en el análisis de regresión.

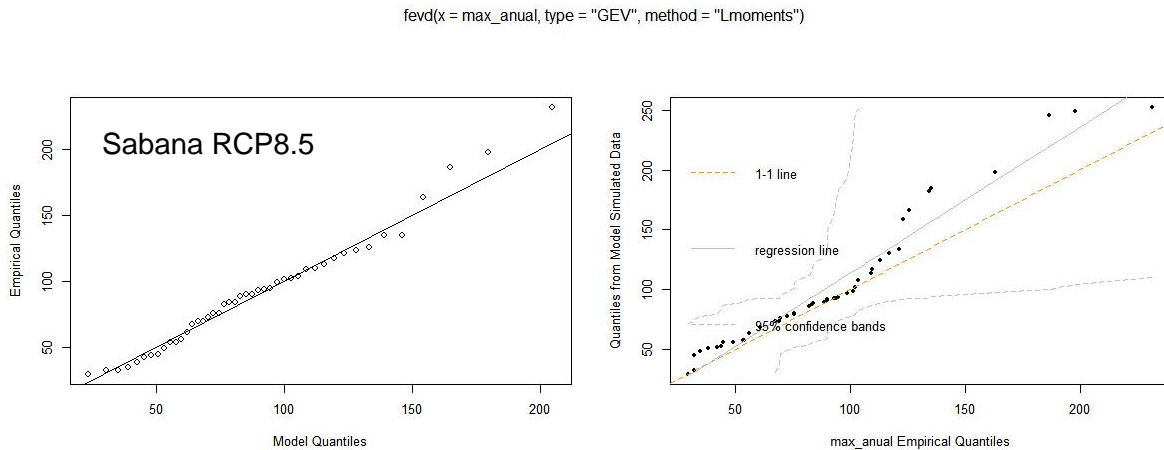


Figura 26. Ajuste de distribución de valor extremo para la estación Sabana.

4.3.1.3 Distribución Gumbel

Al igual que con los datos observados, la distribución que mejor se adaptó a la serie simulada fue Gumbel, debido a que el parámetro de forma fue cercano a 0 (Fig. 27).

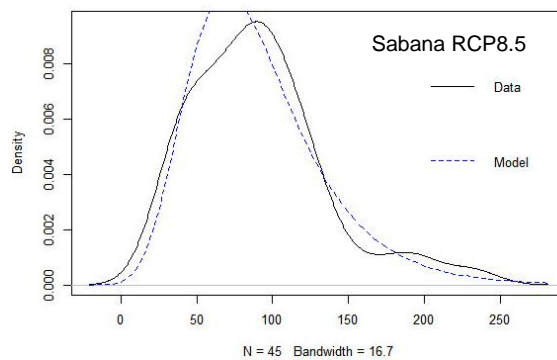


Figura 27. Distribución de Gumbel para la estación Sabana.

A partir de esta distribución, se estimó la precipitación máxima anual para diferentes períodos de retorno (Cuadro 23).

Cuadro 23. Frecuencia de eventos máximos para la estación Sabana RCP8.5, río Torres, Costa Rica

Tiempo de retorno (Años)	Precipitación (mm)
2	82.99
5	122.73
10	149.20
25	182.82
50	207.89
100	232.89

En la figura 28, se muestran los valores de precipitación e intervalos de confianza calculados para la distribución de Gumbel. Al comparar el volumen de precipitación de la estación Sabana en los datos observados y proyectados, hubo un aumento considerable de 143.39 a 232.89 mm para el TR 100.

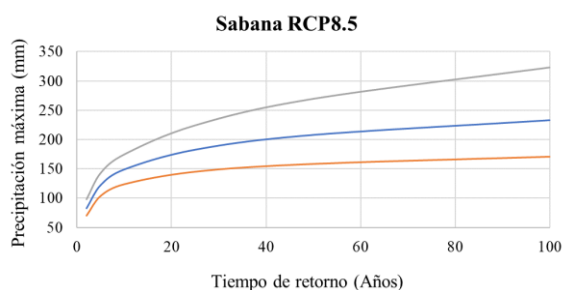


Figura 28. Estimación de precipitación e intervalos de confianza para la estación Sabana RCP8.5.

4.3.1.4 Distribución espacial de precipitación

A partir de estos incrementos de precipitación para la estación Sabana (Murillo 1994) y los volúmenes estimados con Gumbel, se obtuvo el hietograma para la estación Sabana, con diferentes períodos de retorno (Cuadro 24). Para el modelo hidrológico se utilizaron únicamente los escenarios de 25, 50 y 100 años.

Cuadro 24. Precipitación para diferentes períodos de tiempo de retorno de la estación Sabana, río Torres, Costa Rica

T (min)	Precipitación (mm)					
	TR = 2	TR = 5	TR = 10	TR = 25	TR = 50	TR = 100
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.76	1.12	1.36	1.66	1.89	2.12
20	23.06	34.11	41.46	50.81	57.77	64.72
30	21.81	32.25	39.21	48.05	54.63	61.20
40	8.27	12.24	14.88	18.23	20.73	23.22
50	21.31	31.52	38.31	46.95	53.39	59.81
60	1.51	2.23	2.72	3.33	3.78	4.24
70	1.00	1.49	1.81	2.21	2.52	2.82

80	0.50	0.74	0.90	1.10	1.25	1.40
90	0.25	0.37	0.45	0.55	0.62	0.70
100	0.50	0.74	0.90	1.10	1.25	1.40
110	0.50	0.74	0.90	1.10	1.25	1.40
120	1.26	1.87	2.27	2.78	3.16	3.54
130	1.25	1.85	2.25	2.76	3.14	3.52
140	1.00	1.49	1.81	2.21	2.52	2.82
150	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	82.99	122.73	149.20	182.82	207.89	232.89

4.3.2 Modelo hidrológico

Para esta modelación se mantuvieron los valores de número de curva ponderado (Cuadro 16); los parámetros de transformación de Snyder (Cuadro 17); los parámetros de Muskingum; los elementos del modelo hidrológico (Fig. 17, Cuadro 18); por lo que, la única variación fue el hietograma de la estación Sabana (Cuadro 23) y la utilización de ésta para toda la microcuenca.

4.3.2.1 Escenario 1: TR 25 y RCP8.5

El mayor aporte de volumen de escurrimiento y pico de descarga sucedió aguas abajo en la AD3. El tiempo al pico de las tres áreas de drenaje fue similar (Cuadro 25). El grueso del volumen escurrió prácticamente en una hora; a la vez que, el caudal pico se registró rápidamente (aproximadamente dos horas y media) en la salida de la microcuenca.

Cuadro 25. Resumen de parámetros hidrológicos del modelo para TR = 25 y RCP8.5

Elemento	Caudal pico (m ³ /s)	Tiempo al pico hh:mm)	Escoorrentía directa (mm)
AD1	108.0	02:07	109.10
AD2	84.1	02:06	98.99
Confluencia A	192.1	02:06	104.51
Tramo A-B	152.1	03:23	102.03
AD3	248.9	02:06	151.75
Confluencia B	359.3	02:38	126.36

En cuanto a las pérdidas por infiltración, fueron mayores aguas arriba. El coeficiente de escoorrentía fue elevado en la AD3 (Fig. 29); esto se debe principalmente a que, el desarrollo urbano traducido a un alto porcentaje de infraestructuras produce un incremento en la escoorrentía superficial (Herrera-Murillo *et al.* 2018). Por otro lado, en la parte alta de la microcuenca, las zonas permeables (bosque, cultivos y pasto), favorecen la infiltración (Zapperi 2014).

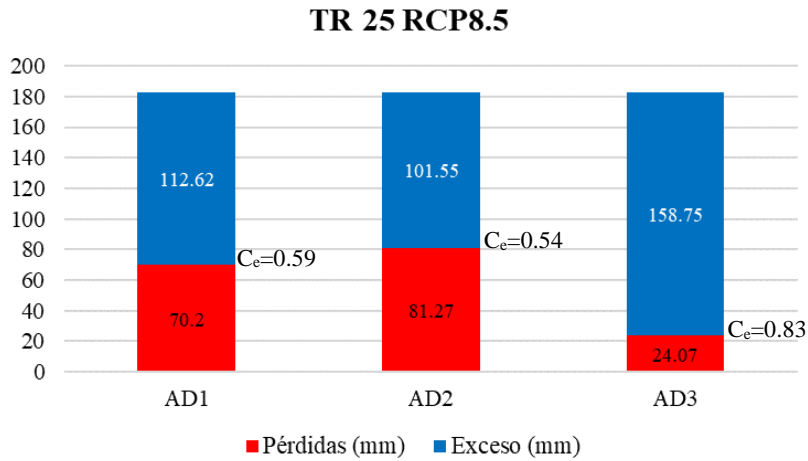


Figura 29. Pérdidas y precipitación en exceso para TR = 25 y RCP8.5.

A pesar de que el uso de suelo no se modificó, la respuesta hidrológica total de la microcuenca fue rápida, ya que, el hidrograma de la confluencia B y el de la AD3 fueron similares en tiempo al pico (Fig. 30). La distribución de intensidades dentro de una tormenta determina en gran medida, el comportamiento de la escorrentía. Si las intensidades máximas ocurren al inicio del aguacero, gran parte del agua se encauzará hacia la red de drenaje, por lo que los caudales generados serán relativamente bajos. Si, por el contrario, esto ocurre al final del aguacero, cuando el suelo está saturado y la infiltración es mínima, el volumen de agua será mayor y originará elevados caudales en cortos intervalos de tiempo (Robredo Sánchez 2014).

Esto puede deberse a que se trabajó con una sola estación de datos proyectados. Para los datos observados, la parte alta tuvo una distribución menos intensa y de larga duración; mientras que, la AD3, fue más intensa y en un tiempo menor.

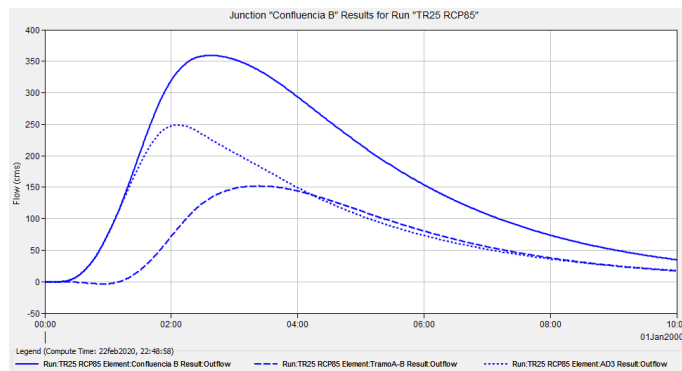


Figura 30. Hidrograma acumulado para TR = 25 y RCP8.5.

4.3.2.2 Escenario 2 y 3: TR 50 y TR 100, y RCP8.5

Para los siguientes escenarios, la respuesta hidrológica es similar al primer escenario. En cuanto al caudal y la escorrentía, la tendencia es el aumento de ambos, conforme incrementan los tiempos de retorno (Cuadro 26 y 27).

Cuadro 26. Resumen de parámetros hidrológicos del modelo para TR = 50 y RCP8.5

Elemento	Caudal pico (m ³ /s)	Tiempo al pico (hh:mm)	Escorrentía directa (mm)
AD1	129.9	02:06	131.08
AD2	102.4	02:05	120.27
Confluencia A	232.3	02:06	126.18
Tramo A-B	183.8	03:22	123.20
AD3	287.9	02:06	175.47
Confluencia B	423.0	02:38	148.78

Igualmente, el tiempo al pico de las tres áreas de drenaje fue similar y se podría decir que, en prácticamente una hora, el volumen en exceso escurrió; dando como resultado, una respuesta rápida en la salida de la microcuenca. La urbanización en zonas adyacentes a un curso de agua es un ejemplo de ello, debido a que se reduce el área de superficie disponible para absorber la lluvia y aumenta el escurrimiento superficial (Morris Grainger 2006).

Cuadro 27. Resumen de parámetros hidrológicos del modelo para TR = 100 y RCP8.5

Elemento	Caudal pico (m ³ /s)	Tiempo al pico hh:mm)	Escorrentía directa (mm)
AD1	152.2	02:06	153.40
AD2	121.1	02:04	142.01
Confluencia A	273.3	02:05	148.23
Tramo A-B	216.0	03:21	144.75
AD3	326.9	02:05	199.18
Confluencia B	487.3	02:39	171.38

Las pérdidas por infiltración fueron similares en ambos casos, inclusive los coeficientes de escorrentía, los cuales aumentaron conforme aumentaron los años de retorno (Fig. 31). El cambio más notable fue para la AD2, la cual incrementó en 0.03, aun cuando el uso de suelo no varió y es el área de drenaje que menos intervenida está. En cuanto a la variación de la infiltración, el porcentaje fue por mucho, más bajo en la AD3 (11% en comparación a 33% para AD1 y 40% en AD2), lo cual es debido al uso de suelo. En cuencas urbanas, las pérdidas de precipitación son menos significativas, ya que la cubierta vegetal es escasa. En la medida que estas pérdidas sean menos significativas, habrá mayor relación entre los periodos de retorno de lluvias y de caudales (Gómez Valentín 2007).

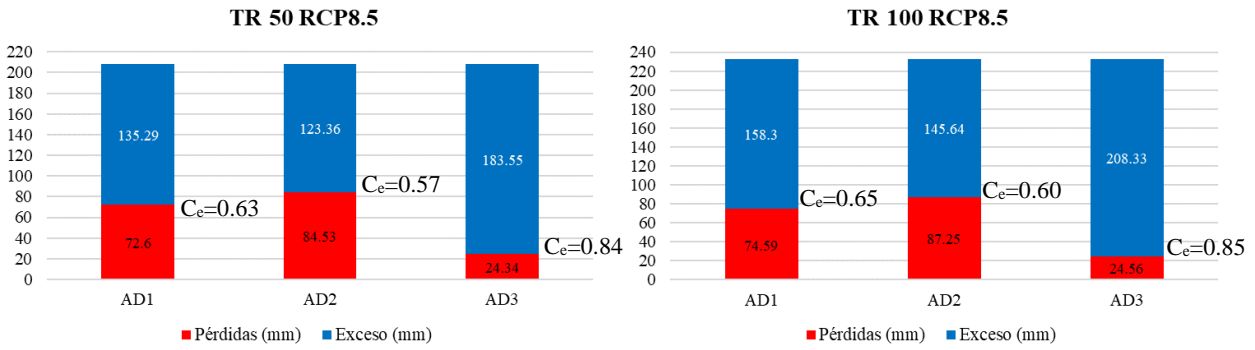


Figura 31. Pérdidas y precipitación en exceso para TR = 50 y 100, y RCP8.5.

Según Campo *et al.* (2012), la superficie de una cuenca regula la intensidad de los fenómenos hidrológicos como el caudal y el volumen de precipitación; por lo que, es necesario conocer el aporte del agua, en función del área que drena la cuenca. La AD3 tuvo prácticamente el doble de superficie y hasta tres veces más áreas intervenidas, que el resto (Cuadro 9), lo cual favorece los procesos de escurrimiento superficial, conforme aumenten el tiempo de retorno (Rivera Torres 2002).

En zonas urbanas, la respuesta hidrológica inicia entre 5 a 10 minutos más rápido que en zonas menos intervenidas, debido a la distancia del recorrido y al alto nivel de impermeabilización (Rey Valencia y Zambrano Nájera 2018). Si bien, el recorrido del agua por el cauce principal de la AD3 es mayor, ésta posee mayor área urbana, que favorece la velocidad y el proceso de transformación lluvia-escorrentía. Por el contrario, en la parte alta se genera una respuesta hidrológica más atenuada (Fig. 32), debido principalmente al uso de suelo.

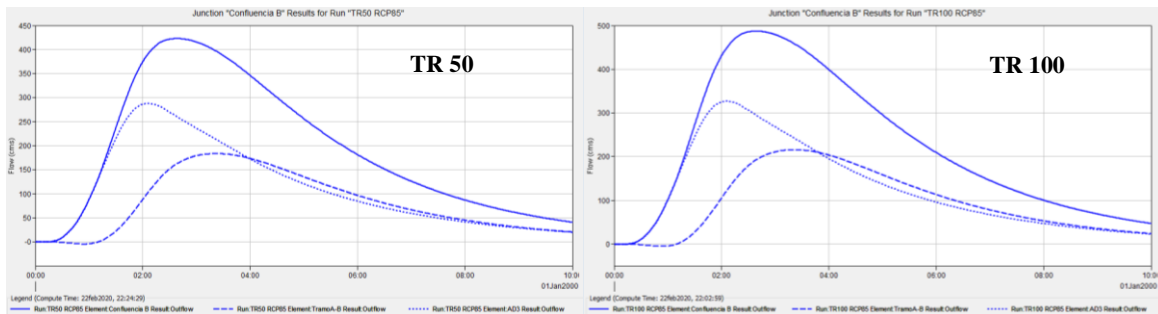


Figura 32. Hidrogramas acumulados para TR = 50 y 100, y RCP8.5.

Durante los tres períodos analizados que involucraron el componente de cambio climático, la tendencia al incremento fue notable. Para toda la microcuenca se dio un aumento entre períodos de tiempo, siendo más notables en la AD1 y AD2; mientras que, para la AD3, hubo un incremento más estable entre años (Fig. 33).



Figura 33. Incrementos en el caudal pico durante TR = 25, 50 y 100, y RCP8.5.

4.3.3 RCP8.5 con variación del número de curva (N)

Partiendo de la información base de cada área de drenaje, se varió el número de curva (Cuadro 28), a partir de los planes reguladores del cantón de Montes de Oca, Goicoechea y San José. Se eligieron únicamente estos tres, ya que son los más predominantes en cuanto a porcentaje de superficie se refiere (cuadro 1). Para ello, se estimó un 10% de incremento en el área urbanizable; es decir, zonas de uso no urbano (bosque secundario/cultivos y pastos/suelo desnudo) que eventualmente, lleguen a impermeabilizarse.

Cuadro 28. Uso de suelo y número de curva proyectados en las áreas de drenaje, río Torres, Costa Rica

	Área (km ²)		
	AD1	AD2	AD3
Bosque secundario	3.76 (28.51%)	4.62 (42.20%)	0.18 (0.79%)
Cultivos y pastos	2.37 (18.02%)	2.03 (18.57%)	0.82 (3.54%)
Suelo desnudo	0.13 (0.95%)	0.06 (0.58%)	0.39 (1.70%)
Urbano	6.93 (52.52%)	4.24 (38.65%)	21.73 (93.97%)
Total	13.19	10.95	23.13
N ponderado	79	74	93

Se puede notar que no hay mayor diferencia en los números de curva, respecto al cuadro 17; sin embargo, la parte alta de la microcuenca se ve afectada negativamente por una disminución del área no urbana. La AD3 no varía tanto, ya que es un área predominantemente urbana y los sitios no urbanos están condicionados a zonas de protección.

Para la simulación en HEC-HMS, se mantuvieron los parámetros de transformación de Snyder (Cuadro 18); los parámetros de Muskingum; los elementos del modelo hidrológico (Fig. 17, Cuadro 19); y el hietograma de la estación Sabana (Cuadro 24) para toda la microcuenca. Para el modelo hidrológico se utilizaron únicamente los escenarios RCP8.5 para 25, 50 y 100 años.

4.3.3.1 Escenario 4, 5 y 6: TR 25, TR 50 y TR 100, y RCP8.5 – N

El cuadro 29 resume los valores de caudal pico alcanzados en la microcuenca. Con la variación del 10% del área urbanizable, en 50 años, el caudal tendría una probabilidad de incremento promedio del 17% en la salida de la microcuenca; mientras que, en 100 años, sería de 37%.

Cuadro 29. Resumen del caudal pico para TR = 25, 50 y 100, y RCP8.5 – N

Elemento	Caudal pico (m ³ /s)		
	TR25	TR50	TR100
AD1	116.3	138.8	161.6
AD2	88.8	107.5	126.5
Confluencia A	205.1	246.3	288.0
Tramo A-B	162.3	194.7	227.6
AD3	253.7	292.8	331.8
Confluencia B	373.0	437.6	502.6

Según los planes reguladores, no hay tendencia al crecimiento urbano, ya que todas las áreas con cobertura vegetal quedan restringidas a protección y/o uso forestal y agropecuario; y las áreas potencialmente urbanizables tendrían un crecimiento vertical. En la figura 34 se puede observar la variación exponencial del caudal pico en las tres áreas de drenaje; por lo que, si la parte alta llega a estar impermeabilizada como la AD3, puede provocar serios problemas a causa del aumento en la velocidad y volumen del escurrimiento superficial.

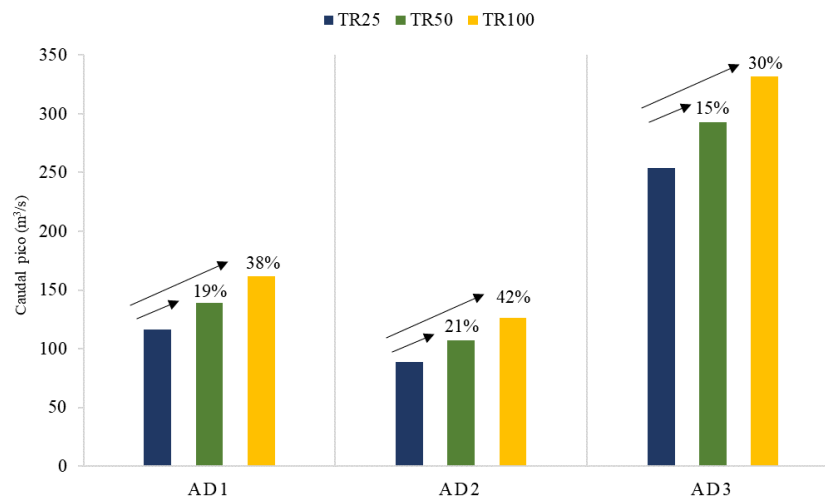


Figura 34. Incrementos en el caudal pico durante TR = 25, 50 y 100, y RCP8.5 – N con el 10% de incremento en área urbanizable.

Por otro lado, los impactos de cambios de uso del suelo pueden presentarse mediante las variaciones estacionales sobre la hidrología de la cuenca, y su equilibrio están en función a la distribución de la vegetación y su interacción con el agua y el suelo, cualquier alteración se modifica el ciclo hidrológico (Juckem *et al.* 2008). Esto responde a la variación en los coeficientes de escorrentía y su incremento notable en la parte baja de la microcuenca (Fig. 35).

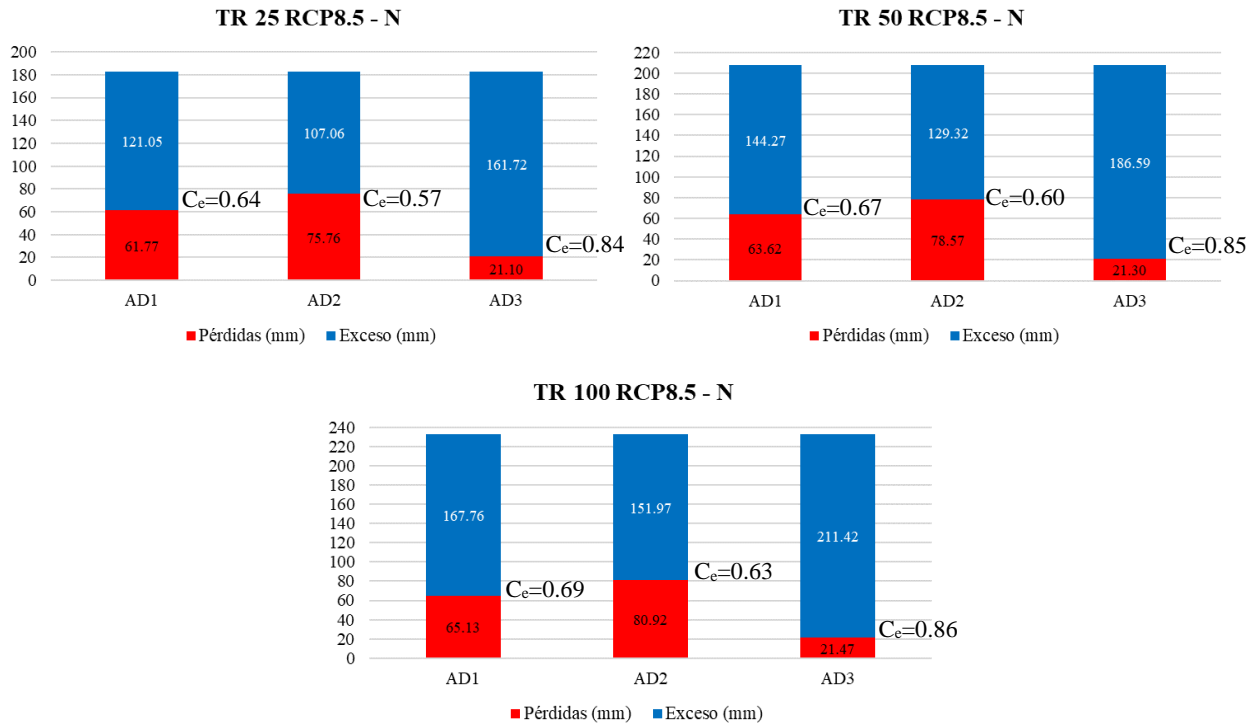
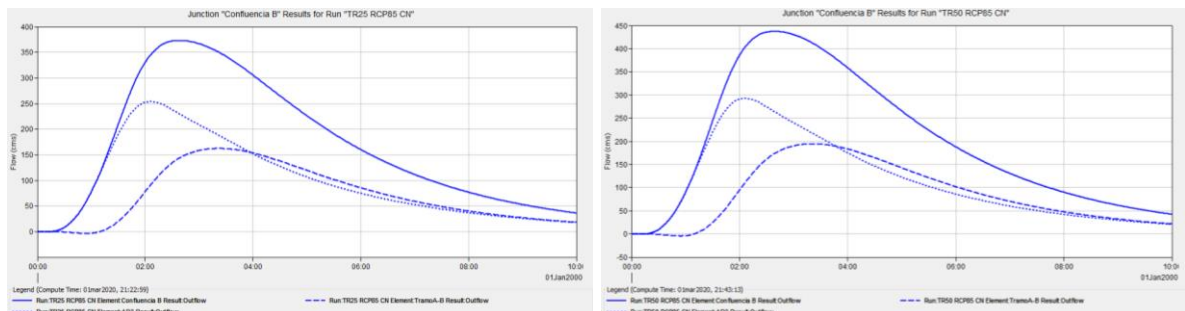


Figura 35. Pérdidas y precipitación en exceso para TR = 25, 50 y 100, y RCP8.5 – N.

Notter *et al.* (2007), mencionan que el cambio climático tiene mayor impacto en los recursos hídricos, que el cambio en el uso del suelo; no solo se esperan períodos secos más severos y duraderos, disminuyendo la disponibilidad del agua; sino que, la ocurrencia de inundaciones será mayor. Sin embargo, la variación en el número de curva permitió analizar qué tan crítico puede llegar a convertirse la microcuenca sino se le aplican los controles urbanísticos a la zona de estudio (AD1 y AD2); además, permitió analizar los caudales críticos generados y su respuesta hidrológica en zonas totalmente impermeabilizadas, como la AD3 (Fig. 36).



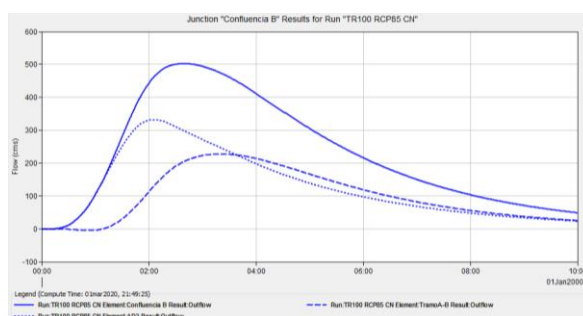


Figura 36. Hidrogramas acumulados para TR = 25, 50 y 100, y RCP8.5 – N.

El plan hidrológico de una cuenca debe contemplar la dinámica de ésta y el ordenamiento territorial que los actores involucrados establezcan en ella. Así, los conflictos territoriales pueden ser resueltos y el crecimiento urbanístico puede ser desarrollado de manera sostenible con el ambiente. El tema del ordenamiento territorial resulta ser conflictivo, sin embargo, es la clave para promover del desarrollo sostenible de los cantones, las cuencas hidrográficas y del país en general (Astorga 2011).

5. DISCUSIÓN

A nivel general y basándose en los análisis hidrológicos anteriormente descritos, los valores proyectados fueron mayores que los observados; sin embargo, hubo una variación de los parámetros hidrológicos en cuanto a incrementos en porcentaje y áreas de drenaje (Cuadro 30).

Cuadro 30. Variación de los parámetros hidrológicos en los datos observados y proyectados por área de drenaje, río Torres, Costa Rica

Caudal pico (m ³ /s)									
	AD1			AD2			AD3		
	TR 25	TR 50	TR 100	TR 25	TR 50	TR 100	TR 25	TR 50	TR 100
Observados	56.9	66.6	76.3	43.5	51.0	58.9	154.5	171.2	187.8
Proyectados RCP8.5	108.0	129.9	152.2	84.1	102.4	121.1	248.9	287.9	326.9
Proyectados RCP8.5 - N modificada	116.3	138.8	161.6	88.8	107.5	126.5	253.7	292.8	331.8
Incremento O-P	90%	95%	99%	93%	101%	106%	61%	68%	74%
	Promedio 95%			Promedio 100%			Promedio 68%		
Incremento P-P_N	8%	7%	6%	6%	5%	4%	2%	2%	1%
	Promedio 7%			Promedio 5%			Promedio 2%		
Escorrentía superficial (mm)									
	AD1			AD2			AD3		
	TR 25	TR 50	TR 100	TR 25	TR 50	TR 100	TR 25	TR 50	TR 100
Observados	82.96	96.86	111.03	74.35	87.71	101.41	94.31	104.50	114.61
Proyectados RCP8.5	109.10	131.08	153.40	98.99	120.27	142.01	151.75	175.47	199.18
Proyectados RCP8.5 - N modificada	117.29	139.82	162.59	104.37	126.09	148.20	154.61	178.39	202.15
Incremento O-P	32%	35%	38%	33%	37%	40%	61%	68%	74%
	Promedio 35%			Promedio 37%			Promedio 68%		

Incremento P-P _N	8%	7%	6%	5%	5%	4%	2%	2%	1%
	Promedio 7%			Promedio 5%			Promedio 2%		
Coeficiente de escorrentía									
	AD1			AD2			AD3		
	TR 25	TR 50	TR 100	TR 25	TR 50	TR 100	TR 25	TR 50	TR 100
Observados	0.52	0.55	0.58	0.47	0.50	0.53	0.77	0.78	0.79
Proyectados RCP8.5	0.59	0.63	0.65	0.54	0.57	0.60	0.83	0.84	0.85
Proyectados RCP8.5 - N modificada	0.64	0.67	0.69	0.57	0.60	0.63	0.84	0.85	0.86
Incremento O-P	13%	15%	12%	15%	14%	13%	8%	8%	8%
	Promedio 13%			Promedio 14%			Promedio 8%		
Incremento P-P _N	8%	6%	6%	6%	5%	5%	1%	1%	1%
	Promedio 7%			Promedio 5%			Promedio 1%		

N modificada = número de curva modificada

Incremento O-P = incremento en porcentaje de los datos observados con respecto a los proyectados

Incremento P-P_N = incremento en porcentaje de los datos proyectados con respecto a los proyectados con variación del número de curva

En la parte alta, el caudal incrementó en promedio, un 97.5%, y un 6% más, con el aumento de área urbanizable; mientras que, en la parte baja, el incremento fue menor (Fig. 37). El hecho de que la parte baja mostrara mayores niveles de caudal está relacionado con la presencia de una mayor masa urbana que impide la infiltración de las lluvias; sin embargo, el efecto del incremento fue más notorio en la parte alta debido a su uso.

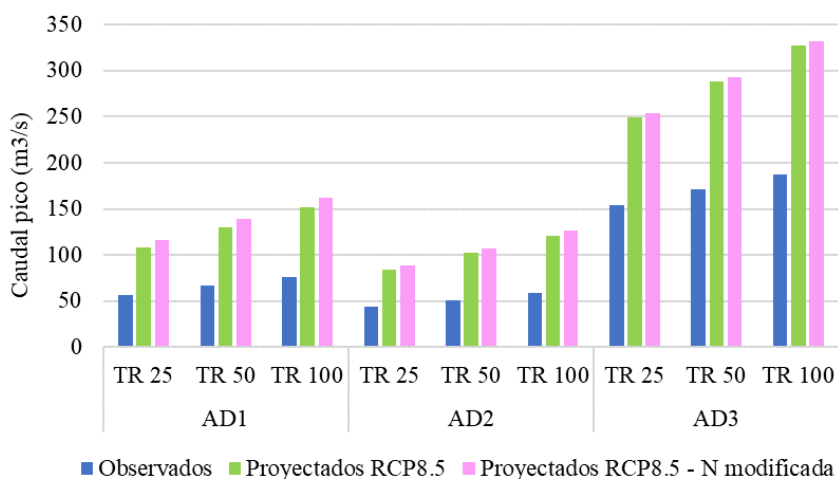


Figura 37. Variación del caudal pico por escenario, área de drenaje y tiempo de retorno.

La variabilidad temporal de los caudales se debe principalmente a la variación en la cantidad de precipitación que cae sobre una cuenca (Ríos Cando 2010); además de otras variables como la topografía y la geología. En este caso, para los valores proyectados, se utilizó únicamente la estación Sabana, la cual registra en menor tiempo, una intensidad mayor de lluvia. Este patrón pudo sobre estimar los resultados y el porcentaje de incremento, aguas arriba.

En la parte alta, la escorrentía incrementó en promedio, un 36%, y un 6% más con el cambio en el uso del suelo; mientras que, en la parte baja, el incremento fue mayor con respecto a los datos observados (Fig. 38). Los coeficientes de escorrentía no fueron constantes en el tiempo y variaron con respecto al período de retorno. Oreamuno Vega y Villalobos Herrera (2015), afirman que las lluvias con mayor periodo de retorno producen más escurrimiento (y mayor coeficiente de escorrentía), que las lluvias con menor periodo de retorno.

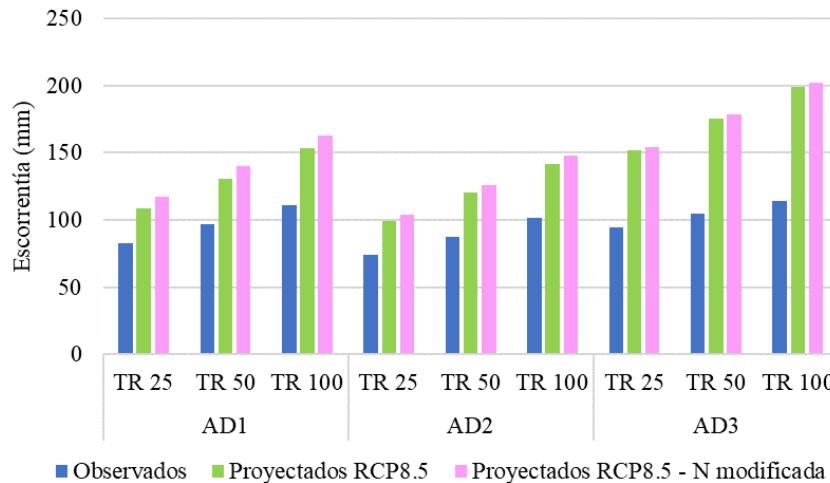


Figura 38. Variación de la escorrentía superficial por escenario, área de drenaje y tiempo de retorno.

Las variaciones espacio-temporales del caudal definen el régimen hidrológico de un río, el cual se ve afectado por acción humana. La variación temporal se da durante o después de las precipitaciones; cuando hay crecidas, el aporte de agua es mayor que la capacidad de conducción del río para evacuarla, pudiendo ocasionar inundaciones en zonas de llanura. La variación espacial sucede porque el caudal del río aumenta aguas abajo, a medida que se van recogiendo las aguas de otros afluentes. Por ello, el río registra caudales bajos en sus nacientes, y altos, cerca de su desembocadura (Ríos Cando 2010).

La microcuenca posee zonas de alta susceptibilidad a inundaciones, ubicadas en la parte media y baja; éstas corresponden a áreas planas y relativamente cóncavas, donde existe un alto potencial a acumular agua y generar inundaciones. Aunado a ello, la densidad de las edificaciones que invaden los márgenes de protección de los cauces incrementa el riesgo a inundaciones urbanas (Castro Chacón 2019).

En terrenos planos, el drenaje es lento y el exceso de agua proveniente de las lluvias ocasiona encharcamiento. En zonas urbanas, esta condición se traduce en un aumento de la lámina superficial del agua. Esto ocasiona que, en zonas bajas, aumente el volumen de agua y se den los desbordamientos. En la microcuenca del río Torres, el aporte de lluvias aguas abajo fue mayor en cantidad (sumatoria de volúmenes de agua) y en intensidad (patrón de lluvias), por lo que, es realmente ahí, donde los eventos máximos provocan inundaciones.

En la parte alta hay más cobertura vegetal, pendientes más abruptas y una red de drenaje mayor, lo que permite que el agua se infiltre y drene mejor. Además, el patrón de lluvias es menos intenso y de

mayor duración, lo que facilita una respuesta hidrológica más lenta, con picos de caudal más bajos. Por ello, era de esperar que en la parte baja se registrara mayor caudal; sin embargo, a pesar de que hubo una tendencia al incremento del coeficiente de escorrentía en toda la microcuenca (sobre todo al aumentar el número de curva), en la parte alta, el aumento fue más notable y continuo; que en la parte baja, donde fue más espaciado y menos drástico (Fig. 39). Se podría decir que la parte alta es más vulnerable a cambios en el uso del suelo, ya que está menos intervenida, y el impacto antropogénico podría potenciar los efectos del cambio climático.

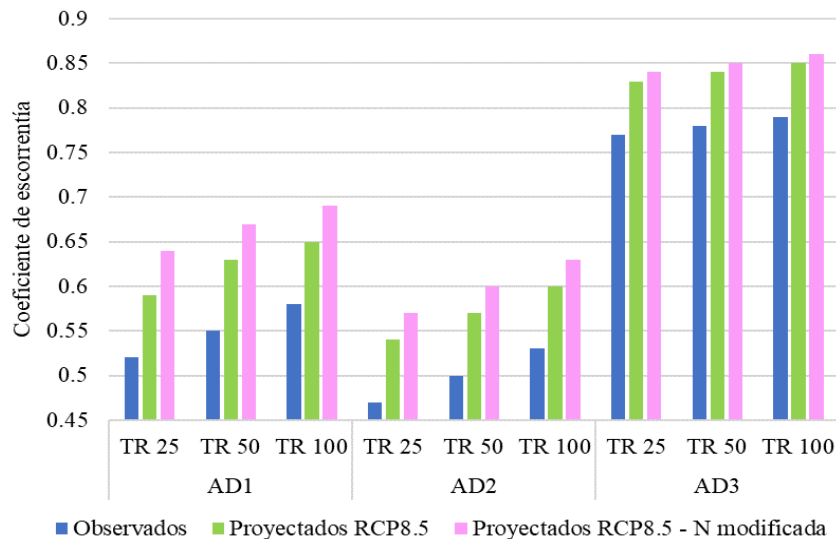


Figura 39. Variación del coeficiente de escorrentía por escenario, área de drenaje y tiempo de retorno.

La impermeabilización del suelo en conjunto con el cambio climático, incrementan la repuesta hidrológica de una cuenca ante eventos extremos. El uso de suelo y los efectos aguas abajo, deben ser analizados desde el punto de vista hidrológico, con el fin de realizar una adecuada gestión de los recursos hídricos en cada municipio (Chaves Herrera 2014).

La evaluación de los impactos del uso de suelo sobre el escurrimiento y la generación de caudales; así como, el análisis espacial y temporal de mecanismos compensatorios como retardos en los flujos y la capacidad de almacenaje del paisaje, son más relevantes a menor escala. Por ello, la respuesta hidrológica de una cuenca queda determinada por la reacción individual de sus subcuencas (Aguayo *et al.* 2016).

En este contexto, trabajar con hidrogramas desagregados, fue de suma importancia para determinar la respuesta hidrológica acumulada. Un aspecto para considerar es que el caudal pico generado en la salida de una cuenca no es una simple sumatoria de los hidrogramas de las subcuencas; ya que cada uno tiene un tiempo distinto (Rivera Torres 2002); sin embargo, hacerlo de esta forma, permite un nivel de detalle mayor, sobre el cual tomar medidas preventivas y correctivas.

El aumento del 10% en el área impermeabilizada no generó tanta variación en los parámetros hidrológicos; sin embargo, se rescatan dos situaciones. En la parte alta existe mayor susceptibilidad a cambios en el uso del suelo, por lo que se deben tomar medidas de prevención para mantener las

condiciones actuales, y en un futuro, retardar el tiempo de llegada del volumen de agua generado en la AD1 y AD2.

Por otro lado, es tan relevante conocer la ocurrencia de eventos máximos, como también lo es, la variación de su magnitud. Puede que un evento se de cada 100 años (con una probabilidad del 1%) pero su impacto puede ser irreversible para la cuenca, sobre todo aguas abajo, donde es más evidente el riesgo a inundaciones. En pocas palabras, en la parte alta, el cambio entre un escenario a otro es más evidente, pero el efecto es más drástico en la parte baja.

De acuerdo con el IPCC (2014), es muy probable que los eventos de precipitación extrema sean más intensos y frecuentes en la mayoría de las regiones tropicales húmedas. A medida que se acentúe el cambio climático, estos fenómenos extremos serán más numerosos, al igual que los riesgos asociados a éstos.

Ahora bien, del registro histórico de precipitación diaria acumulada (1992 – 2018), obtenida con GWHAT, los valores promedio de precipitación mensual fueron más bajos que los proyectados bajo el escenario RCP8.5; excepto para los meses de julio y agosto (Fig. 40).

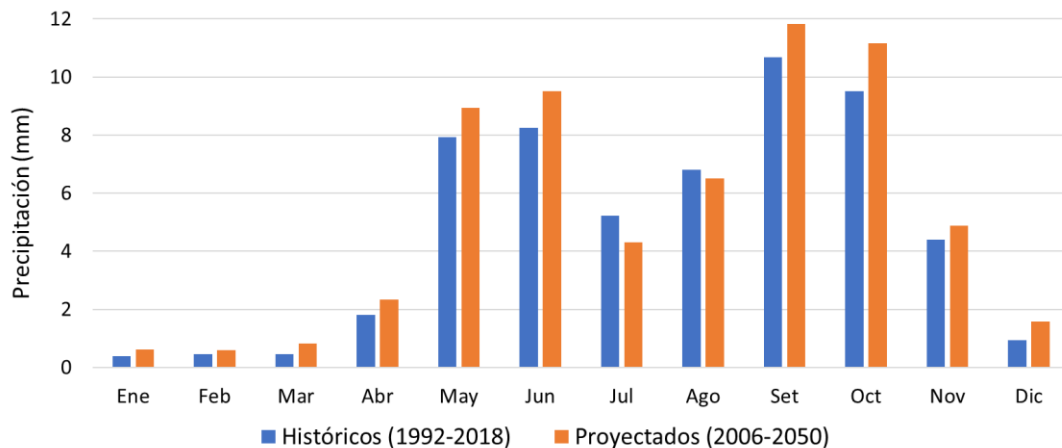


Figura 40. Cambios en el ciclo anual de precipitación en la serie histórica y proyectada.

Los cambios anuales para el período de referencia (1961-1990) y futuro (2021-2050), bajo el escenario RCP4.5 (Fig. 41), fueron evaluados para las capitales de Centroamérica; donde se proyecta un incremento en las precipitaciones para la mayoría de los meses; y una clara reducción durante los meses de junio a octubre. Adicionalmente, ambos registros mantienen cercanía, de modo que los meses más lluviosos y menos lluviosos, seguirán siendo los mismos que en el período climático de referencia (Imbach *et al.* 2018). Ambos patrones fueron similares es este estudio (Fig. 40).

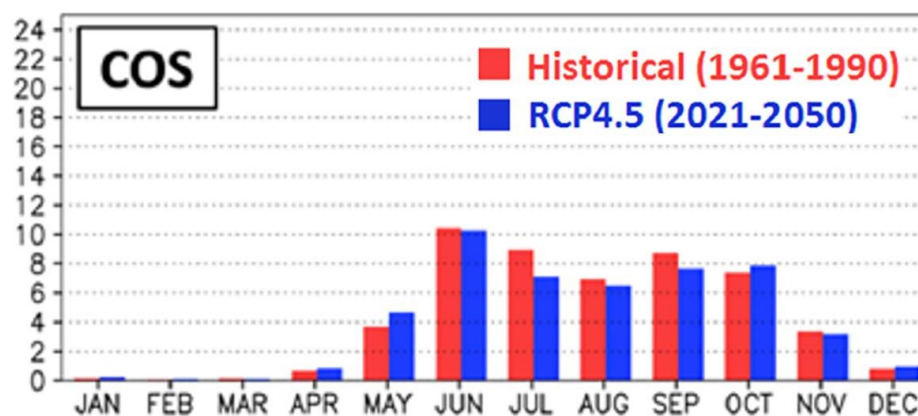


Figura 41. Cambios en el ciclo anual de precipitación en la serie histórica y proyectada para San José, Costa Rica. Fuente: Imbach et al. 2018.

Los fenómenos climáticos extremos se caracterizan por ser eventos no esperados; además, tienen el potencial de impactar negativamente a la sociedad. Por ello, es necesario conocer su ocurrencia y tendencia para evaluar la vulnerabilidad a escala local y desarrollar estrategias de adaptación (IPCC 2012). Además, es fundamental que los pronósticos climáticos tomen en cuenta periodos largos, dado que las predicciones son más seguras y relevantes para los planificadores (Candela *et al.* 2009). En la mayoría de los casos, se emplean series de 30 años de datos, un lapso que reúne todas las variaciones posibles que pueden darse en cierta región (IMN 2008). En este estudio se hizo de esta manera.

Con respecto al método, la modelación hidrológica permite recrear la realidad de la cuenca generando datos confiables de los caudales que se producen en la cuenca. Es una herramienta que permite evaluar la tendencia de cambio de uso en el futuro (Chaves Herrera 2014). Según Jackson (1982), cuando un modelo hidrológico se ha seleccionado por algún propósito, es porque resulta útil en sus aplicaciones. Como resultado de sus aplicaciones, se obtiene información técnica que puede resultar valiosa para formular pautas, estrategias, políticas y planes de manejo de cuencas. Así como la toma de decisiones con fines de investigación y educación (Rivera Torres 2002).

El RCP8.5 indica que un escenario de alta emisión podría ser inaceptable para la microcuenca, por lo que, esto puede dar una idea de dónde se debe prevenir (parte alta de la microcuenca) y dónde mitigar (parte media-baja); sin dejar de intervenir en el manejo del suelo de toda la microcuenca. Con esto se pretende desarrollar medidas socio-ambientales y de planificación, para prevenir el impacto de futuros eventos máximos e incidir en un mejoramiento de la gestión y manejo de ríos urbanos de la GAM.

En este contexto de planificación urbana, la microcuenca del río Torres representa un corredor interurbano, el cual ofrece conectividad entre ecosistemas, zonas de paso para la biodiversidad, islas de calor, conservación de agua y suelo, y como corredor, juega un rol fundamental para el resguardo refugios climáticos. Este concepto fue propuesto por el BID *et al.* (2015) y hace referencia a lugares donde el ritmo de cambio en las variables climáticas (temperatura y precipitación) es menor y permite que los ecosistemas se adapten más fácilmente. Por ello, preservar estos sistemas representa una estrategia de reducción de impacto del cambio climático.

6. CONCLUSIONES

La combinación de análisis hidrológicos, un modelo climático regionalizado y un escenario RCP8.5 permitió modelar los posibles efectos del cambio climático sobre la microcuenca del río Torres, en términos de ocurrencia y magnitud de eventos extremos.

La modelación hidrológica fue una herramienta útil y aplicable a la zona de estudio, que permitió conocer la dinámica hidrológica de la microcuenca; no obstante, se requieren datos con mejor resolución para concluir de manera más certera sobre las amenazas de crecidas que podrían tener consecuencias mayores a las observadas hasta ahora.

El programa seleccionado para la modelación (HEC-HMS) permitió simular el proceso de precipitación-escurrimiento por áreas de drenaje; es decir, a un nivel más detallado sobre el cual se podrían generar pautas y estrategias de manejo. Pese a ello, al no contar con una estación hidrométrica en la microcuenca, no se pudo calibrar el modelo, lo que deja una incertidumbre no cuantificada en la estimación de caudales pico.

La información que proporciona la modelación bajo diferentes escenarios puede proveer los insumos necesarios para hacer evaluaciones hidráulicas en tramos seleccionados en la microcuenca y así poder definir las acciones a corto, mediano y largo plazo que se pueden implementar para mitigar los efectos del cambio climático en la microcuenca del río Torres y otros ríos urbanos de la GAM.

Los resultados de la modelización utilizando el escenario RCP8.5, muestran un incremento de un 97.5% en los caudales pico de la parte alta del río Torres, y un 68% en la parte baja. Adicionalmente, se proyecta que al 2050 sean frecuentes los caudales menores a 248 m³/s; en tanto que, los caudales por encima de los 300 m³/s tendrían 1% de probabilidad de ocurrencia.

El aumento del área urbanizable provocó un incremento del 6% en los caudales pico de la parte alta de la microcuenca, y un 2% en la parte baja, con relación a lo observado. La impermeabilización de tan poca área (10% urbanizable) reflejó un aumento exponencial del coeficiente de escurrimiento en todas las áreas de drenaje; pero éste no fue tan sensible al uso de suelo, para incrementar significativamente la escurrimiento y el caudal pico.

El modelo climático regional permitió el acceso a datos diarios simulados, con los cuales, se estimó los hidrogramas a 25, 50 y 100 años de período de retorno. Si bien, estos valores fueron altos, solo se hizo con una estación de análisis y con un tamaño de píxel de 25 km, y no a 900 m de resolución como en el modelo regional PRECIS, utilizado en Costa Rica.

El método de corrección del sesgo (*Bias correction*) con el programa CMhyd, permitió reducir la variabilidad de los datos simulados, a más de la mitad; con lo cual, se, minimizó la incertidumbre de las predicciones climáticas futuras y fue una herramienta que podría ser evaluada en análisis de cambio

climático, como una alternativa para eliminar el sesgo en los datos climáticos provenientes de modelos con resoluciones muy bajas para ser utilizados a nivel de microcuenca.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda incluir otros escenarios de cambio climático (RCP2.6 y RCP4.5), al igual que otros modelos regionales de mayor resolución, con el fin de mejorar la escala de análisis y la calidad de los datos. Una alternativa podría ser PRECIS, el modelo regional utilizado en Costa Rica.

Considerar otras estaciones meteorológicas fuera de la microcuenca, para aumentar la fiabilidad de los datos diarios, mensuales o anuales; y poder contar con al menos, otra estación para el análisis de series de tiempo de datos simulados.

Se recomienda realizar modelaciones del impacto del cambio en el uso de suelo sobre los recursos hídricos, ya que el aumento del 10% del área urbanizable no representó un efecto significativo en la dinámica hidrológica; sin embargo, la tendencia a una menor infiltración y mayor escorrentía fue evidente.

Se recomienda continuar con este estudio realizando un modelo hidráulico e identificando sitios de riesgo a inundación. De esta manera, se puede informar a la población, la localización de zonas de amenaza, y el gobierno local puede enfocar sus esfuerzos hacia la mitigación y prevención de desastres.

Se deben actualizar los planes reguladores y los estudios técnicos sobre uso de suelo en toda la microcuenca del río Torres; de forma que se trabaje con insumos reales y accesibles para la toma de decisiones en materia de planificación urbana. Además de concientizar a la población y a los gobiernos locales para que interioricen que es un problema intermunicipal y que la solución (preventiva o correctiva) debe de ser implementada en conjunto.

Proponer medidas de prevención y conservación en zonas verdes (bosques secundarios, cultivos, pastos e inclusive suelo desnudo) dentro de la microcuenca, ya que representan focos de infiltración que pueden disminuir la cantidad escorrentía superficial y por ende disminuir o atenuar los picos de crecida.

Realizar estudios de las condiciones agropecuarias en la parte superior de la microcuenca, y las prácticas de manejo empleadas en la zona; con el fin de reforzarlas, evitarlas o modificarlas. Estas medidas deberían estar enfocadas hacia aquellas zonas agropecuarias que tienen poca cobertura o cuyas prácticas contribuyen al cambio en la condición hidrológica de los suelos.

Los resultados de esta investigación son clave para la toma de decisiones sobre planificación urbana y gestión local; resiliencia sectorial y geográfica; y administración en el manejo de cuencas. Por lo tanto, se recomienda tomarla como un punto de partida para realizar modelaciones con mejor calidad y resolución de información y así poder determinar con mayor precisión, tanto los caudales pico, como el tránsito de las avenidas generadas por estos caudales y las zonas inundables.

8. LITERATURA CITADA

Acón-Araya, C. 2013. Determinación del patrón temporal y espacial de la escorrentía como producto de tormentas características en la cuenca del río Turrialba. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 143 p.

Aguayo, M; Stehr, A; Link, O. 2016. Respuesta hidrológica de una cuenca de meso escala frente a futuros escenarios de expansión forestal (en línea). Revista de geografía Norte Grande (65):197-214. Consultado 12 feb. 2020. Disponible en <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022016000300010>

Aguilar, E; Peterson, TC; Ramírez-Obando, P; Frutos, R; Retana JA; Solera, M; Soley, J; González-García, I; Araujo, RM; Rosa-Santos, A; Valle, VE; Brunet, M; Aguilar, L; Álvarez, L; Bautista, M; Castañón, C; Herrera, L; Ruano, E; Sinay, JJ; Sánchez, E; Hernández Oviedo, GI; Obed, F; Salgado, JE; Vazquez, JL; Baca, M; Gutierrez, M; Centella, C; Espinosa, J; Martinez, D; Olmedo, B; Ojeda-Espinoza, CE; Núñez, R; Haylock, M; Benavides, H; Mayorga, R. 2005. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003 (en línea). Journal of Geophysical Research 110(D23):1-15. Consultado 28 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1029/2005JD006119>

Alvarado, LF; Contreras, W; Alfaro, M; Jiménez, E. 2012. Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica (en línea). Instituto Meteorológico Nacional (IMN) - Ministerio del Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET). San José, Costa Rica. 1060 p. Consultado 12 feb. 2020. Disponible en <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/EscenariosCambioClimatico/escenariosCCRegionalizados2012.pdf>

Alvarado-García, V; Zúñiga-Amador, MA. 2018. Vegetación nativa como factor de control de erosión y restauración ecológica, San José, Costa Rica (en línea). Revista La Calera 19(30):39-47. Consultado 13 nov. 2019. Disponible en <https://doi.org/10.5377/calera.v18i30.7738>

Álvarez, M; Varela, C; Soto, B; López, E; Díaz-Fierros, F. 2001. Análisis de la respuesta hidrológica en una cuenca fluvial y su relación con la precipitación (en línea). In Paz-González, A; Taboada-Castro, MT (eds.). Avances sobre el estudio de la erosión hídrica II. Universidad de Coruña. Coruña, España. p. 21-32. Consultado 25 feb. 2020. Disponible en <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/11134>

Amador, JA; Alfaro, EJ. 2008. Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático (en línea). Revista Iberoamericana de Economía Ecológica 11:39-52. Consultado 28 feb. 2020. Disponible en <http://hdl.handle.net/10669/427>

Aparicio Mijares, FJ. 2012. Fundamentos de Hidrología de Superficie. México D.F., México, Editorial Limusa. 303 p.

Arroyo González, LN. 2011. Costa Rica: análisis de la incidencia espacial de inundaciones y deslizamientos por provincias y cantones, años 2000 - 2006 (en línea). *Revista Geográfica de América Central* 47:97–126. Consultado 13 nov. 2019. Disponible en <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/3968>

Arteaga Naranjo, MO. 2017. Evaluación del modelo hidrológico HEC-HMS para la predicción hidrológica y de crecidas, en la Cuenca Baja del río Cañar (en línea). Tesis MSc. Quito, Ecuador, Escuela Politécnica Nacional. Consultado 24 nov. 2019. Disponible en <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18365>

Avinash, K; Deepika, B; Jayappa, KS. 2014. Basin Geomorphology and Drainage Morphometry Parameters Used as Indicators for Groundwater Prospect: Insight from Geographical Information System (GIS) Technique (en línea). *Journal of Earth Science* 25(6):1018–1032. Consultado 24 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s12583-014-0505-8>

Astorga, A. 2011. Ordenamiento territorial en Costa Rica, 2010 (en línea). PEN, San José, Costa Rica. 35 p. Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2010 (No. 17). Consultado 15 set. 2019. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.12337/449>

Bai, Y; Zhang, Z; Zhao, W. 2019. Assessing the Impact of Climate Change on Flood Events Using HEC-HMS and CMIP5 (en línea). *Water Air Soil Pollut* 230(6):1-13. Consultado 20 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4159-0>

Benioff, R; Guill, S; Lee, J. 1996. Vulnerability and Adaptation Assessments. An International Handbook. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers. 564 p.

BID (Banco Interamericano de Desarrollo, USA); SINAC (Sistema Nacional de Áreas de Conservación, Costa Rica); DCC-MINAE (Dirección de Cambio Climático-Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica); CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica). 2015. Actualización y rediseño de dos medidas de conservación para la adaptación del sector biodiversidad ante el cambio climático. Turrialba, Costa Rica, BID-CATIE 106 p. Informe Final.

Bonilla-Ovallos, CA; Mesa Sánchez, OJ. 2017. Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia (en línea). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 41(158):107-118. Consultado 28 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.18257/raccefyn.427>

Bocel Chiroy, JC. 2016. Modelación hidrológica para evaluar los niveles de erosión hídrica y producción de sedimentos en diferentes usos y coberturas de la tierra y su efecto en la calidad del agua en la subcuenca del río San Francisco, cuenca del lago de Atitlán, Guatemala. Tesis MSc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Consultado 18 nov. 2019. Disponible en <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/8596>

Buzolich, G; Donal, M; Reynolds Vargas, J; Torres Corral, L. 2007. Capacidad potencial de las franjas ribereñas del río Bermúdez para reducir la erosión (en línea). Recursos Naturales y Ambiente 51-52:175-183. Consultado 13 nov. 2019. Disponible en <http://hdl.handle.net/11554/5856>

Camino, MA; Bó, MJ; Cionchi, JL; López de Armentia, A; Del Río, JL; De Marco, SG. 2018. Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) (en línea). Revista Universitaria de Geografía 27(1):73-97. Consultado 11 feb. 2020. Disponible en http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-42652018001100005

Campo, AM; Aldalur, NB; Fernández, SN. 2012. Morfometría fluvial aplicada a una cuenca urbana en Ingeniero White, República Argentina (en línea). Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía 77:7-17. Consultado 20 feb. 2020. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n77/n77a2.pdf>

Candela, L; von Igel, W; Elorza, FJ; Aronica, G. 2009. Impact assessment of combined climate and management scenarios on groundwater resources and associated wetland (Majorca, Spain) (en línea). Journal of Hydrology 376(3-4):510-527. Consultado 25 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.057>

Castro Chacón, JP. 2019. Análisis del riesgo por deslizamientos e inundaciones en la cuenca urbana del río Torres. Tesis Lic. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional. 173 p.

Chaves Herrera, MA. 2014. Análisis de los cambios de uso de suelo y su respuesta hidrológica de los años 2000 a 2020 en la cuenca de los ríos Quebrada Seca y Bermúdez (en línea). Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. Consultado 3 ago. 2019. Disponible en <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2015/08/14analisisdeloscambiosdeusodesuelo.pdf>

Chow, VT; Maidment, DR; Mays, LW. 1994. Hidrología aplicada (en línea). Mcgraw-Hill Interamericana. Bogotá, Colombia. 584 p. Consultado 25 feb. 2020. Disponible en https://kupdf.net/download/hidrologia-aplicada-ven-te-chow_5a885789e2b6f5bd2ca7d535_pdf

CRED (Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres, Bélgica); UNISDR (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, Suiza). 2018. Pérdidas económicas, pobreza y desastres 1998-2017 (en línea). Ginebra, Suiza. CRED-UNISDR. 36 p. Consultado 15 set. 2019. Disponible en <https://www.eird.org/americas/docs/perdidas-economicas-pobrez-y-desastres.pdf>

Cruz Romero, B; Gaspari, FJ; Rodríguez Vagaría, AM; Carrillo González, FM; Téllez López, J. 2015. Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México (en línea). Investigación y Ciencia 23(64):26-34. Consultado 20 feb. 2020. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/674/67441039004.pdf>

Cubero Alpízar, C; Carvajal Sánchez, JP. 2014. Distribución especial de las inundaciones en Costa Rica, 10 años de sus efectos (en línea). Revista En Tomo a la Prevención 13:15-20. Consultado 13 nov. 2019. Disponible en <https://relaciger.net/revista/pdf/spa/doc1302/doc1302-contenido.pdf>

Decreto No. 23214-MAG-MIRENEM. 1994. Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica. Diario Oficial La Gaceta. Costa Rica. 6 jun. 1994.

del Caz Enjuto, MR. 2017. El papel de la vegetación en la mejora del entorno de los edificios en los procesos de regeneración urbana: Estudio de caso (en línea). Revista Urbano (35):102-113. Consultado 25 ago. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.22320/07183607.2017.20.35.08>

DesInventar. 2019. Inventario personas afectadas por eventos de desastre (en línea, sitio web). Consultado 14 ago. 2019. Disponible en https://online.desinventar.org/desinventar/#CRI-1250694968-costa_rica_inventario_historico_de_desastres

Fallas Cordero, NM. 2015. Mapas de susceptibilidad al deslizamiento en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás, Costa Rica (en línea). Tesis Lic. Cartago, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Consultado 18 ago. 2019. Disponible en <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6354>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1990. 1er. Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Red Latinoamericana de Cuencas Hidrográficas (Redlach), Instituto Nacional de Recursos Naturales (Inrena). Concepción, Chile. 22 al 26 de octubre 1990.

Ferrer Julià, M. 2003. Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva: perfiles de suelos y teledetección. Madrid, España, Cuadernos de Investigación. CEDEX. 346 p.

Fowler, HJ; Blenkinsop, S; Tebaldi, C. 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling (en línea). International Journal of Climatology 27:1547–1578. Consultado 24 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1002/joc.1556>

Fuentes Romero, KF. 2016. Distribución de las precipitaciones máximas diarias en la región de Los Ríos (en línea). Proyecto de pregrado. Concepción, Chile, Universidad del Bío-Bío. Consultado 18 nov. 2019. Disponible en http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2192/1/Fuentes_Romero_Karol_Fernanda.pdf

Gaertner, MA; Gutiérrez, JM; Castro, M. 2012. Escenarios regionales de cambio climático (en línea). Revista Española de Física 26(2):1-8. Consultado 28 feb. 2020. Disponible en <http://digital.csic.es/bitstream/10261/93845/1/Escenarios%20regionales%20de%20cambio%20clim%C3%A1tico.pdf>

Gao, P; Li, P; Zhao, B; Xu, R; Zhao, G; Sun, W; Mu, X. 2017. Use of double mass curves in hydrologic benefit evaluations (en línea). *Hydrological Processes* 31:4639–4646. Consultado 12 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1002/hyp.11377>

García-Marín, A; Roldán-Cañas, J; Estévez, J; Moreno-Pérez, F; Serrat-Capdevila, A; González, J; Francés, F; Olivera, F; Castro-Orgaz, O; Giráldez, JV. 2014. La Hidrología y su papel en Ingeniería del Agua (en línea). *Ingeniería del Agua* 18(1):1-14. Consultado 20 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3048>

Gaspari, FJ; Rodríguez Vagaría, AM; Senisterra, GE; Denegri, GA; Delgado, MI; Besteiro, S. 2012. Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina (en línea). *AUGMDOMUS* 4:143-158. Consultado 11 feb. 2020. Disponible en <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/25777>

Gaspari, FJ; Senisterra, GE; Marlats, RM. 2007. Relación precipitación – escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina (en línea). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias* 39(1):21-28. Consultado 24 feb. 2020. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3828/382837653003>

Gericke, A; Kiesel, J; Deumlich, D; Venohr, M. 2019. Recent and Future Changes in Rainfall Erosivity and Implications for the Soil Erosion Risk in Brandenburg, NE Germany (en línea). *Water Air Soil Pollut* 11(5):1-18. Consultado 24 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.3390/w11050904>

Gilleland, E; Katz, RW. 2016. ExtRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package in R (en línea). *Journal of Statistical Software* 72(8):1-39. Consultado 12 feb. 2020. Disponible en <http://dx.doi.org/10.18637/jss.v072.i08>

Giorgi, F; Gutowski Jr, WJ. 2015. Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative (en línea). *Annual Review of Environment and Resources* 40(1):467-490. Consultado 24 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217>

Gómez Valentín, M. 2007. Hidrología urbana (en línea). Instituto FLUMEN. Barcelona, España. 332 p. Consultado 25 ago. 2019. Disponible en <http://www.hidrojing.com/wp-content/uploads/2014/04/Seminario-de-hidrolog%C3%ADa-urbana.pdf>

González Fiagá, SB; Rincón Márquez, H. 2011. Metodología para el ajuste de modelos de valor extremo Tipo I (Gumbel) y Log Pearson tipo III, para series de valores máximos (en línea). *Ingenio Magno* 2(1):57-64. Consultado 7 mar. 2020. Disponible en <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/41/41>

Guha-Sapir, D; Hoyois, P; Wallemacq, P; Below, R. 2017. Annual Disaster Statistical Review 2016, The numbers and trends (en línea). Bruselas, Bélgica. CRED-IRSS-Université Catholique de Louvain. 91 p. Consultado 15 set. 2019. Disponible en https://emdat.be/sites/default/files/adsr_2016.pdf

Hellmuth, ME; Osgood, DE; Hess, U; Moorhead, A; Bhojwani H. 2009. Seguros en base a índices climáticos y riesgo climático: Perspectivas para el desarrollo y la gestión de desastres (en línea). Nueva York, USA. Instituto Internacional de Investigación para el Clima y la Sociedad (IRI); The Earth Institute at Columbia University. 136 p. Clima y Sociedad No. 2. Consultado 15 set. 2019. Disponible en <https://iri.columbia.edu/wp-content/uploads/2013/07/Clima0y0Sociedad0No02.pdf>

Herrera, J. 2017. Uso y estado de los recursos: recurso hídrico (en línea). PEN, San José, Costa Rica. 32 p. Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2017 (No. 23). Consultado 15 set. 2019. Disponible en <http://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/1085>

Herrera-Murillo, J; Anchía-Leitón, D; Rojas-Marín, JF; Mora-Campos, D; Gamboa-Jiménez AA; Chaves-Villalobos, M. 2018. Influencia de los patrones de uso de la tierra en la calidad de las aguas superficiales de la subcuenca del río Virilla, Costa Rica (en línea). Revista Geográfica de América Central 4(61E):11-35. Consultado 20 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.15359/rgac.61-4.1>

Hidalgo León, HG; Herrero Madriz, C; Alfaro Martínez, EJ; Muñoz ÁG; Mora Sandí, NP; Mora Alvarado, DA; Chacón Salazar, VH. 2015. Urban Waters in Costa Rica (en línea). In Roldán, G; Torregrosa, ML; Vammen, K; González, EJ; Campuzano, C; Hidalgo, H; de la Cruz Molina, A (eds.). Urban Water, Challenges in the Americas. IANAS-UNESCO. p. 204-225. Consultado 25 ago. 2019. Disponible en https://www.ianas.org/OLD/books/books_2015/water/urban_water_210315.pdf

Holdridge, LR. 1967. Life zone ecology (en línea). Tropical Science Center. San José, Costa Rica. 149 p. Consultado 15 set. 2019. Disponible en http://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/holdridge_1966_-_life_zone_ecology.pdf

Horton, RE. 1932. Drainage Basin Characteristics (en línea). Eos, Transactions American Geophysical Union 13(1):350-361. Consultado 24 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>

IMN (Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica). 2008. El clima, su variabilidad y cambio climático en Costa Rica (en línea). Ministerio del Ambiente Energía y Telecomunicaciones (MINAET), Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH). San José, Costa Rica. 75 p. Segunda Comunicación Nacional. Consultado 15 set. 2019. Disponible en http://users.clas.ufl.edu/prwaylen/geo3280articles/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Suiza). 2012. Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático (en línea). In Field, CB; Dokken, DJ; Plattner, G; Barros, V; Stocker, TF; Dahe, Q; Ebi, KL; Allen, SK; Mastrandrea, MD; Tignor, M; Mach, KJ; Midgley, PM (eds.). Ginebra, Suiza. 32 p. Informe especial. Consultado 12 feb. 2020. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/IPCC_SREX_ES_web-1.pdf

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Suiza). 2013. Cambio climático 2013-Bases físicas (en línea). In Stocker, TF; Qin, D; Plattner, G; Tignor, M; Allen, SK; Boschung, J; Nauels, A; Xia, Y; Bex, V; Midgley, PM (eds.). Ginebra, Suiza. 222 p. Quinto Informe. Consultado 12 feb. 2020. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Suiza). 2014. Cambio climático 2014: Informe de síntesis (en línea). In Equipo principal de redacción; Pachauri, RK; Meyer, LA (eds.). Ginebra, Suiza. 157 p. Quinto Informe. Consultado 12 feb. 2020. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

Jenkinson, AF. 1955. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) value of meteorological elements (en línea). Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 81(348):158-171. Consultado 24 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1002/qj.49708134804>

Jiménez García, FA. 2014. Datos de hidrología básica del cauce del cuerpo receptor de desfogues pluviales (en línea). Consultoría en Sistemas de Infraestructura F.A. Jiménez & Asoc. San José, Costa Rica. 27 p. Proyecto: Edificios de Laparoscopia y CIMOHU, Finca 3. Consultado 15 ago. 2019. Disponible en <http://oepe.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/Facultad-Odontologia-Nuevo-Edificio/Hidrolog%C3%ADa%20Finca%203.pdf>

Juckem, PF; Hunt, RJ; Anderson, MP; Robertson DM. 2008. Effects of climate and land management change on streamflow in the driftless area of Wisconsin (en línea). Journal of Hydrology 355(1-4):123-130. Consultado 28 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.010>

Ley Forestal No. 7575. Diario Oficial La Gaceta. Costa Rica. 16 abr. 1996.

López Cadenas de Llano, F. 1998. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Madrid, España, TRAGSA-TRAGSATEC-Ministerio de Medio Ambiente-Mundi-Prensa. 945 p.

López-Pérez, A; Martínez-Menes, MR; Fernández-Reynoso, DS. 2015. Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación (en línea). Tecnología y Ciencias del Agua 6(1):121-137. Consultado 11 feb. 2020. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353539900007>

Luo, M; Liu, T; Meng, F; Duan, Y; Frankl, A; Bao, A; De Maeyer, P. 2018. Comparing Bias Correction Methods Used in Downscaling Precipitation and Temperature from Regional Climate Models: A Case Study from the Kaidu River Basin in Western China (en línea). *Water* 10(1046):1-21. Consultado 20 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.3390/w10081046>

Marín-Aguilar, G; Allen-Monge, J; Rodríguez-Mora, M; Castillo-Barahona, R; Loría-Salazar, LG. 2011. Inspección del Puente Mansiones sobre el Río Torres, Distrito San Rafael, Cantón Montes de Oca (en línea). San José, Costa Rica. 25 p. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LANAMME. Consultado 15 ago. 2019. Disponible en <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1295>

Meenu, R; Rehana, S; Mujumdar, PP. 2012. Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga-Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM (en línea). *Hydrological Processes* 27(11):1572 –1589. Consultado 24 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1002/hyp.9220>

MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica). 2017. Informe de estado del ambiente: Costa Rica 2017 (en línea). San José, Costa Rica. 713 p. MINAE. Consultado 15 ago. 2019. Disponible en <http://odd.ucr.ac.cr/primer-informe-del-estado-ambiente/>

Monge Álvarez, CA. 2011. Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa. Guía Didáctica (en línea). Universidad Surcolombiana. Neiva, Colombia. 217 p. Consultado 25 ago. 2019. Disponible en <https://www.uv.mx/rmipe/files/2017/02/Guia-didactica-metodologia-de-la-investigacion.pdf>

Monsalve, G. 2009. Hidrología en la Ingeniería. Bogotá, Colombia, Escuela Colombiana de Ingeniería. 382 p.

Morris Grainger, H. 2006. Modelación hidráulica e hidrológica del río Guápiles para determinar la vulnerabilidad a inundaciones en un tramo comprendido entre los poblados Guápiles y la Rita. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 174 p.

Murillo, R. 1994. Estudio de intensidades de lluvia en la cuenca del río Virilla. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 177 p.

Naciones Unidas. 2018. La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (en línea). Santiago, Chile. 93 p. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Consultado 15 ago. 2019. Disponible en https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf

NERC (Natural Environmental Research Council, Inglaterra). 1975. Flood Studies Report (five volumes). Londres, Inglaterra, Hydrologic Studies, Whitefriars Ltd.

Notter, B; MacMillan, L; Viviroli, D; Weingartner, R; Liniger, HP. 2007. Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region (en línea). *Journal of Hydrology* 343(3/4):266-278. Consultado 28 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.022>

NRCS (Natural Resources Conservation Service, USA). 2002. National Engineering Handbook. Part 630 – Hydrology (en línea). United States Department of Agriculture. Washington, D.C., USA. 13 p. Consultado 24 set. 2019. Disponible en <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=22526.wba>

Oreamuno Vega, R; Villalobos Herrera, R. 2015. Estudios hidrológicos e hidráulicos en la cuenca Quebrada Seca-río Burío (en línea). Centro de Investigaciones en Desarrollo Sostenible (CIEDES), Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 235 p. Informe Final. Consultado 15 set. 2019. Disponible en <http://ciedes.ucr.ac.cr/docs/informe-final-quebrada.pdf>

Orozco, I; Ramírez, AI; Francés, F. 2018. Modeling of the impacts of climate change on flows and storage in a high mountain basin (en línea). *Ingeniería del agua* 22(3):125-139. Consultado 24 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.4995/Ia.2018.8931>

Ortiz Malavassi, E. 2015. Proyecto Atlas Digital de Costa Rica (CR 2014). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

Paniagua Hernández, DF. 2016. Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde de Grecia. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 245 p.

Rathjens, H; Bieger, K; Srinivasan, R; Chaubey, I; Arnold, JG. 2016. Cmhhd User Manual (en línea). Purdue University-USDA-Texas A&M Agrilife- Texas A&M University. USA. 16 p. Consultado 12 feb. 2020. Disponible en https://swat.tamu.edu/media/115265/bias_cor_man.pdf

Retana, J. 2012. Eventos hidrometeorológicos extremos lluviosos en Costa Rica desde la perspectiva de la adaptación al cambio en el clima (en línea). *Revista de Ciencias Ambientales* 44(2):5-16. Consultado 28 feb. 2020. Disponible en <http://dx.doi.org/10.15359/rca.44-2.1>

Rey Valencia, DM; Zambrano Nájera, J. 2018. Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palgrande (en línea). *Revista UIS Ingenierías* 17(1):115-126. Consultado 12 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018011>

Ríos Cando, LE. 2010. Incidencia de la variabilidad climática en los caudales mínimos del Ecuador (en línea). Tesis Ing. Civil. Quito, Ecuador, Escuela Politécnica Nacional. Consultado 9 mar. 2020. Disponible en <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1538>

Rivas Torres, D. 2005. Planeación, espacios verdes y sustentabilidad en el Distrito Federal (en línea). Tesis PhD. México D.F., México, Universidad Autónoma Metropolitana. Consultado 24 nov. 2019. Disponible en <http://www.rivasdaniel.com/Espaciosverdes.pdf>

Rivera Torres, LH. 2002. Evaluación de la Amenaza y Vulnerabilidad a inundaciones en la microcuenca La Soledad. Valle los Ángeles, Honduras. Tesis MSc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 158 p.

Robredo Sánchez, JC. 2014. Cálculo de caudales de avenida (en línea). Universidad Politécnica de Madrid, España. 55 p. Consultado 25 feb. 2020. Disponible en <http://www.hidrojing.com/wp-content/uploads/2014/04/CALCULO-DE-CAUDALES-DE-AVENIDA.pdf>

Rodríguez Rodríguez, S. 2016 Análisis bayesiano usando valores extremos en aplicaciones a taos ambientales (en línea). Tesis PhD. Puebla, México, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Consultado 24 nov. 2019. Disponible en <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/1135?locale-attribute=en>

Rojas Morales, N. 2011. Curvas de Intensidad Duración Frecuencia de algunas estaciones meteorológicas mecánicas (en línea). Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas. MINAE, IMN. San José, Costa Rica. 82 p. Consultado 15 set. 2019. Disponible en http://www.mag.go.cr/informacion/curso_agua_pluvial/cidf_mecanicas.pdf

Salgado Montoya, RA. 2005. Análisis integral del riesgo a deslizamientos e inundaciones en la microcuenca del río Gila, Copán, Honduras (en línea). Tesis MSc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Consultado 18 nov. 2019. Disponible en <http://201.207.189.89/handle/11554/5256>

Sánchez Azofeifa, A. 2017. Archivo ráster de la clasificación de la cobertura de la tierra para Costa Rica en el año 2017. Proyección CRTM05.

Sánchez Forero, NY. 2017. Cálculo de la precipitación media sobre la Península de la Guajira usando el método Thiessen (en línea). Ciencia e Ingeniería Neogranadina 26(1):97-108. Consultado 7 mar. 2020. Disponible en <http://hdl.handle.net/10654/16671>

Sandí Rojas, SG. 2012. Generación de hidrogramas de creciente de la tormenta tropical Tomás para la evaluación de la infraestructura urbana en la cuenca del río Virilla. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 192 p.

Sandoval, D; Mata, R. 2014. Base de perfiles de suelos de Costa Rica (en línea). Versión 1.2 San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). Consultado 14 ago. 2019. Disponible en http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139

Sarr, MA; Seidou, O; Trambly, Y; El Adlouni, S. 2015. Comparison of downscaling methods for mean and extreme precipitation in Senegal (en línea). *Journal of Hydrology: Regional Studies* 4:369-385. Consultado 24 feb. 2020. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.005>

Scharffenberg, W. 2016. Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual. Version 4.2 (en línea). US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC). California, USA. 614 p. Consultado 23 set. 2019. Disponible en https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.2.pdf

Searcy, JK; Hardison, CH. 1960. Double-mass curves (en línea). *Manual of hydrology: Part 1. General Surface-Water Techniques*. Washington, USA. 66 p. Consultado 10 feb. 2020. Disponible en <https://pubs.usgs.gov/wsp/1541b/report.pdf>

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México). 2013. Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Cuadernos de divulgación ambiental. México D.F., México. 36 p. Consultado 15 set. 2019. Disponible en http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/Cuencas_final_2014.pdf

Singh, VP. 1998. Entropy-Based Parameter Estimation in Hydrology (en línea). *Water Science and Technology Library*, Springer, Dordrecht, Holanda. 382 p. Consultado 25 feb. 2020. Disponible en <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-1431-0>

Singh, VP; McCann, RC. 1980. Some notes on muskingum method of flood routing (en línea). *Journal of Hydrology* 48(3-4):343-361. Consultado 7 nov. 2019. Disponible en [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(80\)90125-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(80)90125-0)

SINIA (Sistema Nacional de Información Ambiental, Costa Rica). 2019. Indicadores de la Cuenta de Agua (en línea, sitio web). Consultado 14 ago. 2019. Disponible en <https://appsinia.shinyapps.io/cuentagua/>

Solano Quintero, J.; Villalobos Chacón, A. 2017. Generalidades y registros climatológicos de las tormentas severas que han afectado la microcuenca del río Ocloro, en el área metropolitana de San José. 1967-2014 (en línea). Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE); Instituto Meteorológico Nacional (IMN). San José, Costa Rica. 29 p. Consultado 15 set. 2019. Disponible en <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Informe+T%C3%A9cnico+R%C3%ADo+Ocloro>

Strahler, A. 1952. Hypsometric (area-altitud) analysis of erosional topography (en línea). *Bulletin of Geological Society of America* 63:1117- 1142. Consultado 24 feb. 2020. Disponible en https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=26

Trujillo-Acosta, A; Peraza-Estrella, MJ; Marina-Hipólito, JG; Feoli Boraschi, S. 2016. Evaluación del Corredor Interurbano Río Torres, Costa Rica (en línea). Revista Forestal Mesoamericana Kurú 14(34):53-62. Consultado 7 mar. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.18845/rfmk.v14i34.3001>

Umaña Quirós, BE. 2014. Análisis hidrológico de la cuenca del río Toyogres utilizando el modelo HEC-HMS (en línea). Tesis Lic. Cartago, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Consultado 3 ago. 2019. Disponible en <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6148>

Ureña Retana, N. 2004. Efectos del aumento poblacional y del cambio de uso del suelo sobre los recursos hídricos en la Microcuenca del Río Ciruelas, Costa Rica (en línea). Tesis MSc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Consultado 21 set. 2019. Disponible en <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/4938>

van Vuuren, DP; Edmonds, J; Kainuma, M; Riahi, K; Thomson, A; Hibbard, K; Hurtt, GC; Kram, T; Krey, V; Lamarque, JF; Masui, T; Meinshausen, M; Nakicenovic, N; Smith, SJ; Rose, SK. 2011. The representative concentration pathways: an overview (en línea). Climatic Change 109(1-2):5-31. Consultado 24 feb. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

Varela Rojas, I. 2007. Estudio de la gestión municipal del agua: enfoque de “Gestión de la demanda del agua” en Costa Rica y en países con mayor grado de gestión del recurso hídrico (en línea). Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA) - Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Cartago, Costa Rica. 70 p. Consultado 12 feb. 2020. Disponible en https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/721/Anexo_3.pdf?sequence=2&isA

Villón Béjar, M. 2004. Hidrología. Cartago, Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica. 474 p.

Villón Béjar, M. 2013. Hec-Hms Ejemplos. Cartago, Costa Rica, Ediciones Centro de Desarrollo de Material Bibliográfico. 620 p.

Yimer, G; Jonoski, A; Griensven, AV. 2009. Hydrological Response of a Catchment to Climate Change in the Upper Beles River Basin, Upper Blue Nile, Ethiopia (en línea). Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine 2:49-59. Consultado 24 feb. 2020. Disponible en <https://www.nilebasin-journal.com/volumes.php?id=49&categ=48>

Zapperi, PA. 2014. Caracterización del escurrimiento urbano en la ciudad de Bahía Blanca (en línea). Revista Universitaria de Geografía 23(2):125-150. Consultado 12 feb. 2020. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=383239105004>

9. ANEXOS

Anexo 1. Registro final de precipitación máxima diaria anual del período 1987-2019, de las estaciones en estudio

Año	Sabana	San Luis	Colima	CIGEFI	IMN	Aeropuerto
1987	94.70	111.42	95.69	94.02	88.22	89.19
1988	61.10	71.89	61.74	60.66	56.92	57.54
1989	78.70	92.59	79.52	78.13	73.31	74.12
1990	60.50	71.18	61.13	60.06	56.36	56.98
1991	108.60	127.77	109.73	107.81	101.17	102.28
1992	62.00	66.10	62.65	61.55	57.76	58.39
1993	78.10	112.30	78.92	77.54	72.76	73.55
1994	66.50	71.20	67.19	66.02	61.95	62.63
1995	118.00	132.40	119.23	117.15	109.93	111.13
1996	79.00	149.10	79.82	65.11	61.70	89.00
1997	110.10	92.00	111.25	63.84	60.50	61.50
1998	96.20	91.90	97.20	114.60	108.60	107.50
1999	57.30	67.10	57.90	55.10	58.10	59.00
2000	88.30	103.90	89.22	77.30	45.90	44.10
2001	86.10	57.60	87.00	58.70	55.60	46.90
2002	75.70	153.50	76.49	115.40	77.10	50.10
2003	60.20	86.80	70.10	60.60	64.10	59.30
2004	73.20	90.90	87.60	72.60	79.70	79.00
2005	86.10	91.90	98.60	107.70	100.60	64.70
2006	84.60	79.80	64.50	53.30	84.70	66.10
2007	74.90	64.00	85.10	62.10	86.30	64.30
2008	78.70	97.00	65.00	76.20	76.80	100.10
2009	74.70	65.80	91.20	69.00	58.90	52.80
2010	105.70	82.00	77.70	90.30	90.50	151.00
2011	66.50	71.90	57.90	81.60	56.50	80.20
2012	80.80	125.50	57.90	53.70	44.60	67.70
2013	44.70	99.80	64.00	63.30	57.40	69.10
2014	72.40	56.10	73.90	55.80	78.80	47.30
2015	63.30	57.90	68.10	83.00	77.10	48.80
2016	85.90	89.20	73.90	121.60	94.40	113.22
2017	86.90	113.50	99.10	101.60	91.20	94.59
2018	58.90	118.90	75.40	74.80	58.60	69.64
2019	139.61	164.25	141.07	138.60	147.80	129.04

Anexo 2. Registro final de precipitación máxima (P_{max}) diaria anual del período 1992-2005 y 2006-2050, extraído por CORDEX

Históricos simulados		Proyectados simulados			
Año	P_{max} (mm)	Año	P_{max} (mm)	Año	P_{max} (mm)
1992	155.56	2006	164.38	2029	203.68
1993	84.61	2007	74.99	2030	216.40
1994	55.75	2008	139.64	2031	192.25
1995	77.91	2009	317.95	2032	150.61
1996	101.91	2010	228.98	2033	322.50
1997	166.04	2011	69.48	2034	90.32
1998	175.89	2012	144.70	2035	90.21
1999	131.73	2013	172.27	2036	301.00
2000	444.88	2014	371.82	2037	64.50
2001	96.33	2015	182.78	2038	299.58
2002	174.46	2016	97.76	2039	121.71
2003	111.72	2017	214.65	2040	277.91
2004	208.15	2018	83.33	2041	150.80
2005	259.64	2019	293.38	2042	157.96
		2020	84.20	2043	132.21
		2021	134.35	2044	263.12
		2022	73.49	2045	196.31
		2023	166.22	2046	185.54
		2024	86.38	2047	197.86
		2025	144.67	2048	100.53
		2026	391.90	2049	202.02
		2027	134.21	2050	152.35
		2028	134.50		

Anexo 3. Scripts de R utilizados para el pre-proceso de las series de tiempo y el análisis de distribuciones de eventos extremos

```
#=====
#| READING, RESTRUCTURING AND WRITING netCDF FILES IN R |
#| Modified by Sergio Velasquez (CATIE, Turrialba, Costa Rica) |
#| to be used in Vicky Alvarado TFG |
#| From: |
#| http://geog.uoregon.edu/bartlein/courses/geog490/week04-netCDF.html#reading-a-netcdf-data-set-using-the-ncdf4- |
#| package |
#=====

#=====
# READING A netCDF DATA SET USING THE ncdf4 PACKAGE
#=====

# load the necessary packages (if you do not have the packages installed, proceed to instal before running this script)
#=====

library(ncdf4)
library(reshape2)
library(dplyr)
library(chron)
library(lattice)
library(swfscMisc)
library(lubridate)

# set the working directoy and path to data files
dname <- "pr" # note: pr means daily precipitation
setwd("E:/datos_vicky/") # MAIN DIRECTORY. THIS DIRECTORY MUST BE EDITED ACCORDING TO YOUR PROJECT
ncpath <- "E:/datos_vicky/datos/rcp85_06_50/" # SUBDIRECTORY. netCDF FILES DIRECTORY MUST BE EDITED ACCORDING
TO YOUR PROJECT
csvpath <- "E:/datos_vicky/datos/csv_rcp85/" # CSV FILES OUTPUT DIRECTORY. NAME DEPENDS ON HYSTORIC OR
PREDICTED DATA EXTRACTION

# load the necessary functions. Function.R script must be already saved in your working directory prior to this step.
source("funcion_calendario_final.R")

# OPEN THE netCDF FILE
#=====
=====
# make a list of netcdf (nc) files

flist <- list.files(path = paste(ncpath), pattern = "^.*\\.\\.(nc|NC|Nc|Nc)$")
count <- length(flist)

# COMIENZA EL LOOP PARA PROCESAR TODOS LOS ARCHIVOS EN EL DIRECTORIO DE LOS DATOS

for ( i in flist){
  # Asigna el path y nombre del archivo (i-esimo elemento de la lista) a la variable ncfname
  ncfname <- paste(ncpath, i,sep="")

  ## Open a connection to a file in our list
```

```

ncin <- nc_open(paste(ncpath, i, sep=""))

# Run the function ReadNetCdfTimeData (filenames,what.timesteps = NULL,calendar = NULL,
# time.units = NULL,count.first.time.value = NULL,...) to get a list of files dates converted from numeric date
# to real date format (corrected dates)
# -----
nc.time <- ReadNetCdfTimeData(ncfname, calendar="360_days")

# -----

# EXTRACT REAL DATES FROM THE EMBEDDED DATAFRAME date.time INSIDE nc.time
# get dates and add one day (86400 sec)

#=====
#-----
nobsdatadates <- nc.time[[ncfname]][["date.time"]]
nobsdatadates_2 <- nobsdatadates+86400
nobsdatadates_corr <- as.Date(nobsdatadates_2)

# EXTRACT PRECIPITATION DATA FROM THE STATION cOORDINATES (LATITUD/LONGITUDE)

#=====
#-----

# Coordinates of location of interest. IN OUR SCRIPT IT IS SABANA WEATHER STATION, SAN JOSE, COSTA RICA.Change them
apropriately.
#Remember the cartesian coordinates of the station are used in this script (not geographic).
# lat_st <- 10.02263164520 # latitude of location
# lon_st <- -84.09432983400 # longitude of location

# Coordinates using the cartesian coordinate system of netCDF file. Obtained from open de netCDF file in ArcMap.
x_est <- -450000.00000
y_est <- -550000.00000

#GET LAT/LONG INDEX NUMBERS IN THE DATAFRAME LON AND LAT.
#It was done reading the index numbers of the values inside lon and lat dataframes generated in the following steps.
#In our case the values obtained were 269 for longitude and 154 for latitude
#-----

lon <- ncin[["var"]][["lon"]][["dim"]][[1]][["vals"]]
lat <- ncin[["var"]][["lat"]][["dim"]][[2]][["vals"]]
lon #open lon and locate the index position of the x_est value. Take note.
lat #open lat and locate the index position of the y_est value. Take note.

# EXTRACTING THE PRECIPITATION VALUES FOR THE WHOLE YEAR USING THE INDEX VALUES OF LONG AND LAT.

#=====
#-----

# Extract precipitation data based on the lat/long station indexes and write them to a new dataframe.
obsoutput <- ncvar_get(ncin,dname,start= c(269,154,1),count = c(1,1,-1)) #count '-1' means 'all values along that
dimension'
#-----

#EXPORT RESULTS

```

```

#=====
# create final dataframe including the corrected dates and precipitation flux as columns
datafinal <- data.frame(Fechas= nobsdatadates_corr, Pr = obsoutput)

# export precipitation time serie to CSV fie
# set path and filename
csvpath <- "E:/datos_vicky/datos/csv_rcp85/"
csvname <- gsub(pattern = "\\\\.nc$", "", i)
csvfile <- paste(csvpath, csvname, ".csv", sep="")
write.table(datafinal,csvfile, row.names=FALSE, sep=",")
}

#=====
#| AJUSTE DE DISTRIBUCIONES EXTREMAS PARA DATOS DE PRECIPITACIÓN MAXIMA |
#| Modified by Sergio Velasquez to be used in Vicky Alvarado thesis |
#| From: |
#| |
#| https://www.dataanalysisclassroom.com/lesson60/ |
#| https://es.slideshare.net/DennisVenturaHuaman/distribuciones-estadisticas-en-hidrologia-y-su-aplicacin-en-r |
#=====

# Cargar la librerías necesarias. Si no están instaladas, proceda a instalarlas antes de correr este script.
library(extRemes)
library(locfit)
library(logspline)
library(Hmisc)
library("copula")
library("nsRFA")
library("lmomco")
library(ismev)

# Fijar el directorio de trabajo
setwd("E:/datos_vicky/analysis_extremos/prec_extremos_06_50") # Cambiar al directorio de sus datos

# Cargar datos de precipitación máxima diaria anual guardados en un archivo CSV
prec_max_dia_anual = read.csv("prec_maxima_diaria_anual_06_50.csv",header=T) #Lee el archivo de datos máximos de n
años

# Crea un vector con los valores de la precipitación máxima anual diaria

yr1 = 2006
yr2 = 2050
n = yr2 - yr1 + 1

max_anual = matrix(NA,nrow=n,ncol=1)

for (i in 1:n)
{
  yr = 2005 + i
  index = which((prec_max_dia_anual[,1] == yr))
  precipitation_yr = prec_max_dia_anual[index,2]
  max_anual[i,1] = max(precipitation_yr,na.rm=T)
}

```

```

# Dibuja el histograma de datos máximos #Dos formas de hacerlo
hist(max_anual,xlab="Precipitación máxima diaria anual",font=2,main="",font.lab=2)
hist(prec_max_dia_anual$PMAX,xlab="Precipitacion máxima diaria anual",font=2,main="",font.lab=2)

# Ajusta los datos máximos de precipitación a una distribución general de datos extremos (GEV) por el método MLE o
Lmoments
# MLE
fit_precipitation_MLE = fevd(max_anual, type="GEV", method= "MLE")
# Lmoments
fit_precipitation_Lmom = fevd(max_anual, type="GEV", method = "Lmoments")

# Dibuja los diagramas de ajuste del modelo (cuantiles empíricos y simulados, densidad y nivel de retorno)
plot(fit_precipitation_MLE)
plot(fit_precipitation_Lmom)

# Presenta los resultados tabulares de ajuste del modelo.
summary(fit_precipitation_MLE)
summary(fit_precipitation_Lmom)

fevd(x = max_anual, type = "GEV", method = "MLE")
fevd(x = max_anual, type = "GEV", method = "Lmoments")

#=====

ML.parGUMB.p = ML_estimation(max_anual,dist="GUMBEL")
mean_p = ML.parGUMB.p[1]; alpha_p =ML.parGUMB.p[2];

P.max = F.gumb (max_anual, mean_p, alpha_p)

Prob_P.max = 1-P.max ; T.peak = 1/P.max;
Prob_P.max

#=====

# Cálculo de los parámetros mu (media) y alfa de la distribución de Gumbel por el método de momentos
pmaxann <- sort(max_anual)
n <- length(pmaxann)

alph <- sqrt(6)*sd(pmaxann)/pi
mu <- mean(pmaxann)-0.57721*alph
data.frame(alph,mu)
# Función de distribución acumulada de Gumbel
# Probabilidades
P_E<-c()
i=1
for (i in 1:n) {
  P_E[i] <- i/(n+1)
}

# Distribución acumulada
F_GM <-c()

i=1

```

```

for (i in 1:length(pmaxann)) {
  F_GM[i] <- exp(-exp(-(pmaxann[i]-mu)/alph))
};F_GM

# Dibuja la probabilidad acumulada
plot(pmaxann,F_GM,type="l",pch=20,col="red",lty=2,xlab="",ylab="Probabilidad acumulada",main="")

lines(pmaxann,P_E,pch=18,col="blue",type="b",lty=1)

legend('bottomright',legend= c('Distribución Gumbel','Distribución empírica'), lty=1:2,col=c('red','blue'),
      cex=0.8,text.font=4)
grid()

# Cálculo de probabilidades y cuantiles
Tr <- c(2,5,10,25,50,100)
P_Tr <- 1-(1/Tr);P_Tr

P <- mu-log((-log(P_Tr,exp(1))),exp(1))*alph
data.frame(Tr,P_Tr,P)

plot(Tr, P, pch=20, col=("#000099"),bg=("#FF6666"), type="b", lty=1, ylab="Cuantil",
     xlab="Período de retorno (años)", main="Cuantil vrs Período de retorno")

#Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnoff
dFP=(P_E-F_GM)
dFP=sort(dFP,decreasing=TRUE);dFP
delta <- (dFP[1]);delta
#delta teorico
if(n<35) {
  deltao <- 0.000003848186*n**4-0.00033109622*n**3+0.010220554*n**2-0.141035449935*n+1.07518805168
}
else {deltao <- 1.36/sqrt(n)}

}
data.frame(delta,deltao)

if (deltao>delta) {
  print("La distribución GUMBEL ajusta la curva")
} else { print("La distribución GUMBEL no ajusta la curva")
}

# Análisis de intervalos de confianza
#Intervalos de confianza para los parámetros.
ci.fevd(x = fit_precipitation_Lmom, alpha = 0.05, type = "parameter")

#Intervalos de confianza para los períodos de retorno
gev.rl <- return.level(x = fit_precipitation_Lmom, return.period = c(2,5,10,25,50,100),
  do.ci = TRUE, alpha = 0.05)
gev.rl

```

Anexo 4. Registro final de precipitación máxima (P_{\max}) diaria anual del período 2006-2050 con corrección del sesgo, CMhyd

Proyectados simulados corregidos			
Año	P_{\max} (mm)	Año	P_{\max} (mm)
2006	75.69	2029	90.08
2007	34.53	2030	112.97
2008	53.76	2031	88.52
2009	198.00	2032	93.79
2010	134.52	2033	125.50
2011	31.99	2034	56.25
2012	90.11	2035	44.62
2013	101.21	2036	117.13
2014	231.56	2037	29.70
2015	67.30	2038	186.56
2016	60.88	2039	75.79
2017	98.83	2040	163.27
2018	38.37	2041	69.43
2019	135.08	2042	72.73
2020	43.88	2043	82.33
2021	83.67	2044	121.14
2022	32.28	2045	102.15
2023	103.52	2046	109.00
2024	49.02	2047	123.22
2025	53.26	2048	42.26
2026	109.48	2049	93.02
2027	69.28	2050	94.88
2028	83.76		