

ANÁLISIS COMPARATIVO DE CAUDALES MÁXIMOS EN UN MULTIESCENARIO DE
CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO BLANCO-NEGRO-GUAYURIBA,
META.

MAURICIO LLIRÁN PARRADO MONTES
NATHALIA ANDREA VIVAS DÍAZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2018

ANÁLISIS COMPARATIVO DE CAUDALES MÁXIMOS EN UN MULTIESCENARIO DE
CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO BLANCO-NEGRO-GUAYURIBA,
META

MAURICIO LLIRÁN PARRADO MONTES
NATHALIA ANDREA VIVAS DÍAZ

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Ambiental

Asesor
IVÁN DARIO ACOSTA SABOGAL
Ingeniero Civil
Especialista en Recursos Hídricos
Mg (C) en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2018

Autoridades Académicas

P. JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMANCA, O.P.

Rector General.

P. MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O.P.

Vicerrector Académico General.

P. JOSÉ ARTURO RESTREPO RESTREPO, O.P.

Rector Sede Villavicencio.

P. FERNANDO CAJICA GAMBOA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio.

JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División sede Villavicencio.

ING. YÉSSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana Facultad de Ingeniería Ambiental.

Nota de Aceptación

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de Facultad

IVÁN DARIO ACOSTA SABOGAL

Director Trabajo de Grado

JUAN FELIPE MENDEZ ESPINOSA

Jurado

DORA MARCELA BENITEZ RAMIREZ

Jurado

Villavicencio, 03 de Mayo de 2018

A la memoria de nuestros abuelos,
Que nos están cuidando y guiando por el camino correcto en cada paso que damos,
Aunque no estén presentes su recuerdo permanecerá siempre en nuestro corazón.

A mi madre por ser una mujer luchadora,
Por ser el pilar más importante de toda mi vida,
Su amor, humildad y comprensión hacen de mí una mejor persona.

A mi padre por su filosofía de vida,
Su compromiso con la familia, la perseverancia y la fuerza de seguir adelante.

A mis hermanas que siempre han estado junto a mí,
Sus consejos y apoyo constante me fortalecen para realizar mis sueños.

Mis sobrinos que son fuente y motores de energía para mi vida
Son el tesoro más preciado que tengo.

Nathalia Andrea Vivas Díaz

De manera muy especial dedico este trabajo a mis padres, quienes son el pilar fundamental de mis valores y principios, porque la gran admiración que siento por ellos proviene de todos los obstáculos que han superado en diferentes etapas de sus vidas.
Ellos son la razón por la que creo en todo lo que puedo llegar a ser.

Mauricio Llirán Parrado Montes

Agradecimientos

A nuestras familias por el apoyo incondicional que nos han brindado siempre, siendo los primeros educadores inculcando valores y principios para nuestro crecimiento como persona.

Agradecemos a nuestro director el Ingeniero Iván Acosta, quien nos brindó su apoyo y confianza en la elaboración de la tesis y su capacidad de guiarnos en nuestra formación profesional e investigativa. Por creer en nuestras habilidades y conocimientos, orientándonos positivamente durante el desarrollo de este trabajo, siendo un mentor a quien admiramos por su humildad e inteligencia, tanto a nivel profesional como personal.

A la Ingeniera Yésica Natalia Mosquera Beltrán y al Ingeniero Tito Alejandro Saavedra Ramírez, por fomentar un pensamiento crítico constante a través del conocimiento y la disciplina, generando un aporte en nosotros a nivel personal, académico y profesional.

A nuestros amigos, profesores y compañeros, por las experiencias y momentos agradables compartidos a lo largo de nuestra formación académica, los cuales siguen aportando en el desarrollo de nuestro proyecto de vida.

A todos gracias por ser parte de este logro. Seguramente el destino nos puso justo en el camino correcto...

Contenido

	Pág.
Resumen.....	1
1 Introducción	3
2 Planteamiento del problema.....	5
2.1 Descripción del problema.....	5
2.2 Formulación en torno al problema	8
3 Objetivos	8
3.1 Objetivo general	8
3.2 Objetivos específicos.....	8
4 Justificación	9
5 Alcance	12
5.1 Poblacional	12
5.2 Espacial	12
5.3 Temporal	13
6 Antecedentes	14
7 Marco referencial	18
7.1 Marco teórico	18
7.1.1 Modelos en cuencas hidrográficas	18
7.1.2 Simulación del proceso lluvia-escorrentía	18
7.2 Marco conceptual	19
7.3 Marco Legal	21
7.3.1 Cambio Climático	21
8 Hipótesis	23
9 Metodología	24

9.1	Fase 1: Recolección y procesamiento de la información	24
9.1.1	Información geoespacial, cartografía base y digital	24
9.1.2	Información Climatológica	26
9.1.3	Información hidrológica.....	28
9.1.4	Representación de los períodos proyectados de cambio climático	29
9.2	Fase 2: Simulación del modelo lluvia-escorrentía.	32
9.2.1	Variables morfométricas.....	33
9.2.2	Estimación del Número de Curva.	34
9.2.3	Estimación Pérdidas iniciales.	36
9.2.4	Estimación tiempo de concentración y tiempo de retardo por subcuencas	36
9.2.5	Propagación de caudales en cauces.....	37
9.2.6	Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)	37
9.2.7	Generación de hietogramas de bloque alterno.	38
9.2.8	Estimación de la variabilidad espacial.....	39
9.2.9	Generación de hidrogramas	39
9.2.10	Comparación con el método de Fuller.	41
9.2.11	Transposición de caudales.	42
9.2.12	Evaluación de la calibración de los caudales estimados	43
9.3	Fase 3: Representación de resultados.....	44
9.4	Fase 4: Recomendaciones	44
9.4.1	Caudal y Consumo hídrico.....	45
9.4.2	Dinámica fluvial.....	46
10	Resultados y análisis.	47
10.1	Variables de entrada del modelo lluvia escorrentía.....	47
10.1.1	Variables morfométricas.....	47

10.1.2	Numero de Curva de Escorrentía CN	51
10.1.3	Cambios porcentuales promedio de precipitación por subcuenca.	54
10.1.4	Pérdidas iniciales	55
10.1.5	Tiempo de concentración.....	56
10.1.6	Tránsito entre tramos	57
10.2	Curvas IDF	59
10.3	Hietogramas.....	65
10.4	Caudales e Hidrogramas.....	67
10.4.1	Modelo lluvia escorrentía	67
10.4.2	Comparación de caudales estimados con el método de Fuller	72
10.4.3	Trasposición de Caudales	74
10.4.4	Evaluación de la calibración del modelo lluvia escorrentía.....	76
10.5	Dinámica fluvial en la extracción de material de arrastre	77
10.6	Consumo hídrico en la producción de palma de aceite.	81
Conclusiones		83
Recomendaciones		85
Referencias bibliográficas.....		86
Apéndices.....		94

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Influencia de las estaciones seleccionadas por subcuenca.....	34
Tabla 2. Estaciones meteorológicas seleccionadas.	35
Tabla 3. Estaciones hidrológicas consultadas.	35
Tabla 4. Métodos empleados y parámetros por subcuenca.....	40
Tabla 5. Descripción del cálculo de las variables morfométricas de entrada.	41
Tabla 6. Clasificación de cobertura de la tierra.	42
Tabla 7. Valores máximos anuales de precipitación en 24 horas por estación.....	45
Tabla 8. Valores referenciales del criterio de Schultz.	50
Tabla 9. Resultados obtenidos a partir del procesamiento de la información	51
Tabla 10. Consumo hídrico por producción de aceite de palma en la cuenca Guayuriba.	52
Tabla 11. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Guayuriba.	55
Tabla 12. Parámetros morfométricos por subcuenca de la cuenca del río Guayuriba.	57
Tabla 13. Determinación de la Curva Número (CN).	59
Tabla 14. Estimación de CN por subcuencas.....	60
Tabla 15. Cambio porcentual de precipitación promedio por períodos de cambio climático.	61
Tabla 16. Cuantificación de las pérdidas iniciales por subcuenca.	63
Tabla 17. Tiempo de concentración por subcuenca.....	64
Tabla 18. Calculo del tiempo de retardo para el tránsito entre tramos.	65
Tabla 19. Valores de intensidad de precipitación (mm/h) por estación.....	68
Tabla 20. Precipitaciones de diseño por período de retorno con duración de 2 horas.....	73
Tabla 21. Caudal máximo (m^3/s) por periodo de retorno en los escenarios establecidos.....	78
Tabla 22. Valores de las variables Q_{med} , a y b por estación hidrológica.	80
Tabla 23. Estimación y validación de caudales máximos y mínimos por estación hidrológica. ..	80
Tabla 24. Comparación de caudales extremos entre el método Fuller y lluvia escorrentía.....	81
Tabla 25. Caudales con el método de trasposición para la desembocadura del río Guayuriba. ...	82
Tabla 26. Trasposición del modelo lluvia-escorrentía y la estación Bajo Nare del año 2006....	83
Tabla 27. Desviación de los caudales simulados respecto a observados en la estación Bajo Nare.	84

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de localización general del área de estudio.	13
Figura 2. Diagrama de flujo metodológico del proyecto.	24
Figura 3. Modelos de Elevación Digital utilizados para cuenca del río Guayuriba	26
Figura 4. Aplicación del método de Thiessen de las estaciones en la cuenca del río Guayuriba. 27	
Figura 5. Estaciones hidrológicas, meteorológicas y climatológicas seleccionadas	29
Figura 6. Proyección de los cambios porcentuales de precipitación en los periodos 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 en la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba.....	31
Figura 7. Esquema del modelo hidrológico lluvia-escorrentía.	32
Figura 8. Hidrograma unitario adimensional del SCS.	40
Figura 9. Componentes de un hidrograma de creciente.....	41
Figura 10. Puntos de captación para producción de aceite de palma y polígonos mineros	45
Figura 11. Modelo digital de elevación de la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba.	48
Figura 12. Clasificación de la cobertura del suelo en la cuenca del río Guayuriba	53
Figura 13. Representación del modelo lluvia-escorrentía en la cuenca del río Guayuriba.....	60
Figura 14. Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia por estación	64
Figura 15. Hietograma de precipitación por período de retorno con duración de 2 horas	67
Figura 16. Hidrograma de entrada y salida del río Guayuriba del periodo 1995-2015	69
Figura 17. Hidrograma del río Guayuriba en el multiescenario de cambio climático 2011-2040.70	
Figura 18. Hidrograma del río Guayuriba en el multiescenario de cambio climático 2041-2070.70	
Figura 19. Hidrograma del río Guayuriba en el multiescenario de cambio climático 2071-2100.71	
Figura 20. Cambio del caudal (%) estimadas en el modelo lluvia-escorrentía por proyección....	72
Figura 21. Imagen satelital en la cuenca media-baja del río Guayuriba en el año 2002.	80
Figura 22. Imagen satelital en la cuenca media-baja del río Guayuriba en el año 2009.	80
Figura 23. Imagen satelital en la cuenca media-baja del río Guayuriba en el año 2016.	81
Figura 24. Cambio de turbidez del río Guayuriba cercano a extractoras de material de arrastre. 81	
Figura 25. Extracción de material arrastre sobre cauce activo el río Guayuriba.	82
Figura 26. Puntos de captación de agua para riego en cultivos de palma.....	84

Lista de Apéndices

Apéndice A. Mapa de Zonificación por amenazas naturales, inundación en suelo rural.	96
Apéndice B. Descripción del cálculo de las variables de entrada.....	97
Apéndice C. Listas cartografía base.....	99
Apéndice D. Calculo de intensidad de precipitación	101
Apéndice E. Información base de precipitación máxima 24 horas por estación seleccionada...	102
Apéndice F. Valores de caudales extremos por estación.....	110
Apéndice G. Hidrogramas de creciente de entrada y salida del escenario actual y de cambio climático de la cuenca del río Guayuriba.....	124
Apéndice H. Descripción de los elementos hidrológicos del modelo lluvia-escorrentía.	129
Apéndice I. Hietogramas de las estaciones de la cuenca del río Guayuriba	130

Glosario

ArcGIS: Software que agrupan varias funciones, entre ellas el análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.

Cambio Climático: Según el IPCC es una Importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más).

Cambio porcentual de precipitación: diferencia porcentual entre dos valores de precipitación.

Carga aluvial: es la cantidad real de sedimentos que transporta un río en un lugar y momento determinados.

Caudales máximos: volumen de agua que circula por el cauce de un río en un lugar y tiempo determinados.

Desbordamiento: salida del cauce de su ronda hídrica por el aumento de su caudal.

ENOS: El Niño-Oscilación del Sur. Es un patrón climático que consiste en la oscilación de los parámetros meteorológicos del Pacífico ecuatorial cada cierto número de años.

Escenario de cambio climático: se refiere a una descripción coherente, internamente consistente y convincente del clima a futuro, basados en un conjunto internamente coherentemente de relaciones climatológicas.

Forzamiento radiativo: cambio en la radiación (calor) entrante o saliente de un sistema climático.

GEI: Gas de Efecto Invernadero. Es un gas atmosférico que absorbe y emite radiación dentro del rango infrarrojo. Este proceso es la fundamental causa del efecto invernadero.

HEC-HMS: Programa de modelación que sirve para simular procesos hidrológicos completos en cuencas hidrográficas.

MED: Modelos de Elevación Digital. Es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas de relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

Modelo Hidrológico: modelo matemático que representa física y bidimensional de las componentes hidrológicas generalmente en cuenca hidrográficas.

Modelos Climáticos Globales: sistemas de ecuaciones diferenciales basados en las leyes básicas de la física, la dinámica de fluidos y la química con el fin de simular las interacciones de la atmósfera terrestre, los océanos, el relieve terrestre, y el hielo.

Precipitación efectiva: fracción de lluvia de la precipitación total que se convierte en escorrentía.

RCP: Caminos Representativos de Concentración. Son las distintas trayectorias que puede tener el clima a futuro de acuerdo al forzamiento radiativo producido por los GEI.

Régimen climático: conjunto de reglas o fundamentos que regula el sistema climático.

SCS: Servicio de Conservación de Suelos. Es una agencia del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) que proporciona asistencia técnica a los agricultores y otros propietarios y administradores privados.

Trasvase: desviación de una parte del caudal principal del río excediendo los límites de la ronda hídrica.

Vulnerabilidad: susceptibilidad de los sistemas naturales, económicos y sociales al impacto de un peligro de origen natural o inducido por el hombre.

ZCIT: Zona de Convergencia Intertropical. Es la región del globo terrestre donde convergen los vientos alisios del hemisferio norte con los del hemisferio sur.

Resumen

En las últimas décadas, el cambio climático global ha venido generando impactos ambientales, sociales y económicos por causas naturales y antrópicas, en las que se destaca el aumento de gases de efecto invernadero, los cambios de uso de los suelos y el forzamiento radiativo. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la variación de los caudales máximos en el contexto del cambio climático a partir del método lluvia-escorrentía en la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba. El problema de investigación está enfocado en la influencia de la variabilidad de la precipitación en los caudales máximos, para diferentes períodos de proyección del multiescenario de cambio climático establecido por el IDEAM. Para ello, se realizó una estimación mediante la simulación de un modelo lluvia-escorrentía a través del programa HEC-HMS. Entre los resultados, se observó una disminución de los caudales máximos que oscilan entre -15 y -24% provenientes de un caudal máximo actual de $1179 \text{ m}^3/\text{s}$ con un periodo de ocurrencia de 50 años. Finalmente, se recomienda un mayor control en los métodos de explotación mineras de material de arrastre y estudios que estén relacionados con la oferta y demanda hídrica teniendo en cuenta las temporadas de lluvias y sequías en la cuenca.

Palabras clave: Caudales máximos, multiescenario de cambio climático, modelo lluvia-escorrentía, sistemas de información geográfica, HEC-HMS.

Abstract

In recent decades, global climate change has been generating environmental, social and economic impacts of natural and anthropogenic causes, from which highlights the increase of greenhouse gases, changes in land use and radiative forcing. The objective of this project is to evaluate the variation of maximum flows in the context of climate change from the rainfall-runoff modelling in the Blanco-Negro-Guayuriba river basin. The research problem is focused on the influence of the variability of precipitation on maximum flows, for different periods of projection of the climate change multispectrum established by the IDEAM. To do this, an estimation was made by simulating a rainfall-runoff model through the HEC-HMS program. Among the results, there was a decrease in the maximum flow rates ranging between -15 and -24% from a current maximum flow of 1179 m³/s with a period of occurrence of 50 years. Finally, greater control is recommended in mining methods for trawling material and studies that are related to water supply and demand, taking into account the rainy and drought seasons in the basin.

Key words: Maximum flow, climate change, rainfall-runoff model, geographic information systems, HEC-HMS.

1 Introducción

En las últimas décadas, el cambio climático global ha venido generando impactos ambientales, sociales y económicos por causas naturales y antrópicas, en las que se destaca el aumento de gases de efecto invernadero, los cambios de uso de los suelos y el forzamiento radiativo (García, Botero, Quiroga, & Ardila, 2012; IDEAM, 2015; Coe, Costa, & Soares-Filho, 2009). Por lo tanto, uno de los principales retos para la humanidad es enfrentar las consecuencias de los cambios acelerados del clima.

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), ha realizado monitoreos constantes de las precipitaciones debido al papel fundamental que marca en el comportamiento del cambio climático, de tal forma que, a través de metodologías meteorológicas avanzadas a nivel global, estimaron el comportamiento a futuro de la precipitación y la temperatura a nivel nacional, de acuerdo con resultados de 16 modelos climáticos globales que más se ajustaron, (IPCC, 2002) generando como resultado un informe sobre los *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia* entre el año 2011 y 2100 (IDEAM, 2015) representando a nivel nacional y departamental los cambios porcentuales de la precipitación y temperatura en tres periodos: 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100.

Según los resultados establecidos por el IDEAM en cada periodo, se puede indicar que el país en su conjunto se verá afectado por el cambio climático, sin embargo, no de la misma manera para toda Colombia. Un ejemplo claro, es el contraste entre los departamentos del Meta y Cundinamarca, la cual siendo jurisdicciones vecinas presentan cambios porcentuales de precipitación promedio en el periodo 2011-2040 de -7 y 8 % respectivamente. Estos porcentajes para las cuencas hidrográficas pueden producir una fuerte influencia en el comportamiento de los caudales en los ríos, teniendo en cuenta la intensidad, duración, frecuencia y distribución de las lluvias. A causa de lo anterior, puede modificarse el régimen de caudales produciendo no solamente cambios en los valores medios, sino también en los valores extremos, representando los caudales mínimos como eventos de sequía hidrológica y los caudales máximos como eventos de avenidas.

A partir de esto, surge la necesidad de evaluar la variación de los caudales máximos, en cada periodo del multiescenario de cambio climático generado por el IDEAM en la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba. Para ello, se tienen en cuenta métodos que permitan estimar y analizar la relación entre los caudales y los cambios porcentuales de precipitación en una cuenca con gran impacto por sus actividades económicas. Por lo tanto, se aplicó el modelo hidrológico lluvia-escurrentía del programa HEC HMS, la cual, para la respectiva simulación se debe ingresar una serie de variables morfométricas, climatológicas e hidrológicas; estas variables de entrada son obtenidas a partir de la recolección de información sobre las características biofísicas de la cuenca y el procesamiento de información geoespacial y de cartografía base. El modelo permite determinar los caudales máximos de la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba que, de acuerdo a los cambios porcentuales presentes en el multiescenario de cambio climático establecido por el IDEAM, se puede identificar si las tendencias de los caudales en cada periodo aumentan o disminuyen.

2 Planteamiento del problema

2.1 Descripción del problema

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) a través de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, realizaron estudios que señalan científicamente la influencia de las actividades antropogénicas en el comportamiento actual del clima. Entre sus resultados (IPCC, 2013) destacan la importancia de los escenarios de cambio climático, con el fin de representar el clima bajo diferentes caminos de forzamiento radiativo (Oviedo Torres & León Aristizábal, 2010). De esta manera, el cambio climático puede incidir en factores ambientales como el ciclo hidrológico, los niveles de escorrentía en cuerpos hídricos, entre otros (Lashof, 1997).

Por consiguiente, el IPCC estableció los escenarios de cambio climático mediante diversos modelos climáticos globales, de los cuales el IDEAM utilizó 16 que mejor representaran el clima de Colombia, para poder generar a nivel nacional y regional un informe denominado *Nuevos Escenarios de Cambio Climático* proyectados hasta el año 2100, a través de los escenarios de forzamiento radiativo RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 Y RCP8.5 (IDEAM, 2015). A partir de esta información, se ha investigado acerca de la variabilidad de la precipitación y la temperatura en cuencas hidrográficas mediante la proyección de escenarios en distintos periodos de tiempo (Acevedo Aristizábal, 2009), (Jiménez, 2011), donde se ha identificado una alta influencia de la precipitación en el aumento de la frecuencia de los caudales extremos (Duque, 2014), pronunciándose significativamente en las temporadas de lluvia y de sequía (Burlado & Pellicciotti, 2002). Esto se debe a que Colombia presenta regímenes de caudal que varía entre regiones y la influencia por fenómenos de variabilidad climática como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Poveda & Mesa, 2000). Por lo tanto, la heterogeneidad en el comportamiento de la precipitación en el país aumenta la necesidad de investigar detalladamente la variabilidad de caudales extremos entre regiones, específicamente en cuencas hidrográficas.

El presente trabajo pretende investigar la variación de los caudales máximos en la cuenca del río Guayuriba, teniendo en cuenta la variabilidad de la precipitación y sus características

morfométricas e hidrológicas dadas en un contexto de cambio climático, las cuales podrían cambiar drásticamente el comportamiento de los caudales en el río. En el año 2009 Cormacarena definió dos zonas a partir de la oferta y demanda del recurso hídrico, denominadas “zona productora” y “zona consumidora”.

La zona productora, ubicada en la parte alta de la cuenca, la definen como aquella conformada por una gran cantidad de aportantes hídricos y cobertura de bosques, dando lugar a la frecuencia de caudales máximos de poca duración. Esto es debido a que gran parte de su área son protegidas, entre ellas, se encuentra el Parque Nacional Natural (PNN) Sumapaz, destacándose como el páramo más grande del mundo, y algunas áreas del PNN Chingaza, siendo de especial importancia por el aporte para el abastecimiento de agua potable de la ciudad de Bogotá D.C., capital del país ya su vez la ciudad más poblada de Colombia

Por otra parte, la zona consumidora, ubicada en la parte media y baja de la cuenca, se caracteriza por la alta demanda del recurso hídrico, principalmente por actividades mineras para extracción de material de arrastre como agregados (cantos rodados, gravas y arenas); agropecuarias como cultivos de maíz, arroz, palma de aceite, ganadería y pastoreo; domésticas y turísticas (Alcaldía de Villavicencio, 2013); de explotación y perforación de pozos petroleros. Esta zona presenta pendientes planas a suavemente onduladas, con caudales mayores, pero con corrientes tranquilas, debido a la profundidad y la anchura del lecho que aumenta aguas abajo, por lo cual favorece su uso y aprovechamiento.

“En muchos lugares de Colombia, se ha establecido que el límite entre las zonas de producción y consumo corresponde a la línea de piedemonte que, topográficamente, diferencia las regiones con pendientes superiores al 7 % (zona productora de caudales naturales) que aquellas con pendientes entre 0 y 7 % (zona consumidora)” (Cormacarena, 2009).

De acuerdo con lo anterior, la actividad productiva que predomina según Cormacarena (2009), es agropecuarios con un 68 % correspondiente a cultivos de palma africana, la cual se asocia con la demanda del recurso hídrico, ya que las empresas localizadas sobre la cuenca tienen una demanda entre 1,2 a 1,3 m³/ton de aceite. Por otro lado, en el sector extractivo, se encuentra la minería para la extracción de material de arrastre, la cual anualmente explota 480.700m³. Esto representa una serie de problemáticas relacionadas principalmente con la desviación del cauce principal del río Guayuriba, afectación estructuras e infraestructuras, actividades fuera del

polígono concesionado e iniciación de explotación sin licencia ambiental aprobada. En definitiva, estas actividades juegan un papel relevante en el comportamiento de caudales, por las alteraciones que puedan hacer en la dinámica fluvial del río y el consumo excesivo del recurso hídrico, en un marco actual y a futuro de acuerdo a la proyección multiescenario de cambio climático establecido por el IDEAM (2015).

La influencia de la variación de las precipitaciones en los caudales máximos también se encuentran asociados a fenómenos hidrometeorológicos, tales como amenazas por inundación, trasvases del río o desviación del cauce principal, los cuales se establecen en el Plano N°3 sobre Zonificación por Amenazas Naturales e Inundación en Suelo Rural correspondiente al POT del municipio de Villavicencio (Alcaldía de Villavicencio, 2013), donde se determina un alto grado de amenaza con posibilidad de desborde e inundación, sobrepasando el cauce activo en la margen izquierda del río Guayuriba (ver plano en el Apéndice A). Así mismo, se ha evidenciado hasta el presente año, emergencias sobre el desbordamiento del río en zonas señaladas, debido a frecuentes lluvias en el piedemonte llanero (Restrepo, 2017). Igualmente, en el *Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT)* del año 2000 del municipio de Acacias (CIDER, 2015), se establecen áreas de alto riesgo sobre la margen derecha con amenaza de inundación, incrementado el riesgo de tipo tecnológico por la línea de conducción del gasoducto Cusiana-Apiay-Bogotá.

El posible cambio en los caudales máximos en la cuenca del río Guayuriba pueden definir dos situaciones de contraste: una relacionada con el aumento de los caudales en corto tiempo y la alteración de su dinámica fluvial, en la que puedan afectar directamente las actividades en la zona consumidora por generación de trasvases, modificación del cauce principal, desbordamientos, inundaciones y socavación de estructuras (Jarrett, 1990; Cormacarena, 2009); y otra en que la disminución de los caudales, asociados a la demanda del recurso hídrico por las actividades productivas ubicadas en la zona consumidora, puedan contribuir al deterioro de la cuenca, como pérdida de cobertura vegetal, disminución del recurso hídrico, entre otros (Caro, Torres, & Barajas, 2014).

2.2 Formulación en torno al problema

¿Cómo varían los caudales máximos actuales obtenidos a partir de un modelo lluvia-escorrentía frente a un multiescenario de cambio climático en los periodos 1995-2015, 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 sobre la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba en el departamento del Meta?

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la variación de los caudales máximos obtenidos a partir del modelo lluvia-escorrentía en la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba en el contexto del cambio climático, como insumo base en estudios orientados al manejo y aprovechamiento del recurso hídrico.

3.2 Objetivos específicos

- Calcular las variables climatológicas, hidrológicas y morfométricas requeridas por el modelo lluvia-escorrentía.
- Estimar y analizar la variabilidad de los caudales máximos de la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba, en un multiescenario de cambio climático para los periodos 1995-2015, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100.
- Proponer recomendaciones enfocadas al aprovechamiento del recurso hídrico en las actividades mineras de extracción de material de arrastre y de producción de palma de aceite presentes en la zona consumidora de la cuenca del río Guayuriba, teniendo en cuenta el consumo hídrico y la dinámica fluvial.

4 Justificación

El cambio climático representa oportunidades y riesgos para el desarrollo humano (IPCC, 1988; Mesa, Poveda, Carvajal, & Salazar, 1997). Por esto mismo, lo más conveniente para cualquier sociedad es conocer de manera anticipada los escenarios que plantea el cambio climático con el fin de prepararse para prevenir y mitigar los efectos negativos asociados a los fenómenos naturales, tales como inundaciones, sequías, heladas, entre otros. Por esta razón, el IDEAM ha determinado a través de los escenarios de cambio climático, cambios porcentuales de precipitación y temperatura, en diferentes periodos proyectados a nivel nacional, regional y departamental (IDEAM, 2015). Este se elabora con el propósito de que el sector público, pueda lograr plantear políticas encaminadas a mejorar el ordenamiento del territorio, teniendo en cuenta las actividades económicas asociados al manejo y aprovechamiento del recurso hídrico.

Debido a esto, gran número de estudios que investigan la variación de caudales desde el contexto de cambio climático (Aristizábal & Acevedo, 2009; Duque, 2014), indican la necesidad de seguir trabajando en los nuevos escenarios de cambio climático, de tal forma que permita una mayor visión al compararse entre sí mismos, fijándose en los factores que puedan diferenciar cada estudio, tales como la ubicación geográfica y las metodologías utilizadas.

Recientemente, el proyecto “Orinoquia, juntos frente al cambio climático”, una iniciativa de la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena (Cormacarena), en alianza con Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía (Corporinoquia), Ecopetrol S. A. y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), desarrollaron un *‘Plan de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático para la Orinoquía’* (PRICCO), en el que se realizaron proyecciones que revelan transformaciones climáticas en el departamento. Por lo tanto, es pertinente el desarrollo de la comparación del multiescenario de cambio climático establecido por el IDEAM, mediante la estimación y análisis de caudales máximos como contribución de información base, para fortalecer su articulación en estudios que logren establecer medidas para mitigar los efectos negativos del cambio climático en cuencas hidrográficas. Así mismo, fomenta el interés de la comunidad, puesto que es un aporte primario de las nuevas perspectivas del cambio

climático asociado al comportamiento hidrológico entre los departamentos del Meta y Cundinamarca, concibiendo nuevas estrategias de cambio climático en el ordenamiento territorial a nivel local.

Por otra parte, el fin de comparar los caudales máximos actuales y el multiescenario de cambio climático está basado en la necesidad de identificar los posibles impactos influenciados sobre las actividades que predominan en la zona consumidora de la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba, que actualmente, son actividades productivas y extractivas, y que conforman el 90 % de los sistemas de producción de la misma (Cormacarena, 2009).

De igual manera, se pretende indicar qué tanto incide el cambio porcentual de las precipitaciones en los caudales máximos, para los diferentes periodos proyectados, para así conocer si hay una alteración directa a las actividades económicas en la zona consumidora, especialmente actividades palmeras y mineras; por incremento de caudales y por efectos asociados a la dinámica fluvial, pueden ocasionar impactos como inundaciones, trasvases, modificación del cauce principal, desbordamientos, socavación de estructuras, arrastre de material vegetal, arrastre de sólidos que puedan resultar contaminantes, erosión hídrica, pérdida de cosechas, modificación del paisaje, pérdida o fragmentación de ecosistemas, entre otros; es importante destacar, que la zona consumidora de la cuenca ha sido escenario de estos fenómenos por las fuertes precipitaciones, en las que se ha declarado en alerta roja en zonas aledañas al río (El Tiempo, 2016).

En un caso más reciente se hizo cierre preventivo de la vía que comunica el municipio de Villavicencio con el municipio de Acacías, a causa de los altos niveles del agua y las fuertes crecientes que ya venían ocurriendo en la zona (Caracol Radio, 2017). Igualmente, debido al aumento del caudal del río se vio afectado el jarillón de la margen izquierda, el cual protegía las veredas La Mercedes parte baja, Río Negrito, Cocuy, Vigía, Zuria y demás aledañas en la ribera del río Negrito (Caracol Radio, 2017; Restrepo, 2017).

Por otra parte, en el río Guayuriba no solo se han presentado fenómenos asociados al aumento de los caudales, también ha generado preocupación la disminución de los caudales por la cantidad de captaciones tanto legales como ilegales en la zona consumidora, donde el paso desde la cuenca media hasta terminar la cuenca baja ha disminuido en más de un 65 % su caudal (El

Tiempo, 2010). Por lo tanto, el presente proyecto busca analizar y comparar tanto los caudales máximos como los caudales mínimos para determinar si las proyecciones de precipitación establecidas por los escenarios de cambio climático indican en qué nivel la disponibilidad del agua podría convertirse en un factor limitante para el desarrollo de todas las actividades económicas presentes en la cuenca.

El presente trabajo al ser desarrollado en la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba, está dirigido al cumplimiento de los compromisos, metas, planes y políticas de ámbito nacional y local, que están asociados al séptimo Objetivo de Desarrollo del Milenio, el cual busca garantizar la sostenibilidad del medio ambiente (ONU, 2000); también se incluye al decimotercer Objetivo de Desarrollo Sostenible, que busca 9 (ONU, 2015). Por lo tanto, la población directamente beneficiada corresponde a las autoridades ambientales, instituciones de orden nacional (INGEOMINAS, IDEAM), entidades territoriales, ONGs, empresas prestadoras de servicios públicos, organizaciones y comunidad local. Esta población se define debido a la inmersión en acciones como la conservación y manejo de los recursos naturales, prevención de desastres naturales, estudios de impacto ambiental, mecanismos de adaptación al cambio climático, planes de ordenamiento del territorio, campañas de educación ambiental, entre otros.

5 Alcance

5.1 Poblacional

Los actores beneficiados por el proyecto son las veredas: La concepción, Brisas del Guayuriba, Sardinata, Rio Negrito, El Rosario, El Cocuy, Las Margaritas, La Vigía, Vegas del Guayuriba, San Cayetano, Pompeya, Arrayanes, Puerto Tembleque, El Porvenir, Bocas del Guayuriba, Pajures, Palmeras, Pesqueros y San José de las Palomas. Así como entidades territoriales, organizaciones públicas y privadas, Corporaciones Autónomas Regionales (CAR's) como la CAR Cundinamarca, CORPOGUAVIO, CORMACARENA, CORPORINOQUIA) y Parques Nacionales Naturales (PNN Sumapaz y PNN Chingaza).

5.2 Espacial

El río Guayuriba recorre 202.22 km con una orientación preferencial Oeste-Este hasta su confluencia en el río Metica, entre las coordenadas planas con origen Bogotá: 1026088 E, 1018960 N y 1110800 E, 924618 N. Los límites geográficos de la cuenca se dividen entre las partes Alta, Media y Baja. La parte Alta se encuentran los departamentos del Meta y Cundinamarca, limitando al Norte con los municipios de La Calera, Guasca, Junín y Fómeque; la parte Media al Oeste con los municipios de Pasca, San Bernardo y Bogotá, y al Este con los municipios de Villavicencio y el Calvario; por último, la parte Baja limita al Sur con los municipios de Acacías, San Carlos de Guaroa, Villavicencio y Puerto López.

Según en el Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCH) del río Guayuriba (Cormacarena, 2009) y el Plan de Ordenamiento Territorial (POT Norte) del municipio de Villavicencio (Alcaldía de Villavicencio, 2013), esta cuenca se forma de la unión de los ríos Negro y Blanco; el primer río nace en el páramo de Chamizal y el segundo nace en el cerro de Paila. Una vez desemboca en el río Manzanares en el municipio de Acacias, adopta como nombre río Guayuriba. Esta se denomina técnicamente como la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba (Cormacarena, 2009) con un área total de 353.166,83 ha, del cual 59 % del área total de la cuenca pertenece a Cundinamarca y 41 % al Meta (CAR's, PNN, & Ministerio, 2012).

6 Antecedentes

En los análisis de cambio climático el agua es uno de los factores principales en donde se incluyen cambios en la evaporación, escurrimiento y regímenes de lluvia (Aristizábal & Acevedo, 2009). Por lo tanto, para la realización del análisis comparativo de la condición actual y el multiescenario de cambio climático, se consultó trabajos que implementaran escenarios de cambio climático a nivel global, nacional y local donde se identificaran cambios significativos en el comportamiento hidrológico en cuencas hidrográficas.

A nivel global, el *Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (IPCC, por sus siglas en inglés) ha realizado desde 1988, cinco informes de reporte que estructura una evaluación técnica y científica sobre el cambio climático (IPCC, 1988). En su informe más reciente (2013-2014) se publicaron tres documentos: (1.) **bases físicas**; (2.) **impactos, adaptación y vulnerabilidad**; (3.) **mitigación del cambio climático** (IPCC, 2013; IPCC, 2014). En estos se mencionan los cambios observados en los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, la relación con el aumento de los gases de efecto invernadero (GEI) y las actividades antrópicas con respecto a los cambios de precipitación y temperatura en los últimos años, con la iniciativa de entender las posibles repercusiones ambientales y socioeconómicas que puedan causar el cambio climático en el planeta.

A partir de los informes del IPCC, el IDEAM publica la **Primera Comunicación Nacional de Cambio Climático** (2001), siendo una de las primeras investigaciones que relacionaron los efectos del cambio climático a nivel global en el país, como principal mecanismo de reporte a la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)*, siendo el primer documento técnico que presenta un inventario de emisión y captura de gases de efecto invernadero. También se destaca la creación de las primeras políticas encaminadas a mitigar las emisiones de gases efecto invernadero junto con estudio y análisis de la vulnerabilidad y medidas de adaptación a los efectos del cambio climático. No obstante, al ser el primer comunicado se presentaron limitaciones en cuanto a problemas en la consecución de la información primaria a causa de la falta de apoyo técnico y financiero.

Nueve años después (2010), se publicó la ***Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático*** (IDEAM, 2010), incorporando la vulnerabilidad del recurso hídrico con una metodología más compleja para determinar la vulnerabilidad ambiental del país. Por último, el IDEAM hace su publicación en marzo de 2015 del documento titulado: ***Nuevos Eventos de Cambio Climático para Colombia 2011-2100*** (IDEAM, 2015), siendo el primer resultado del proceso de elaboración de la ***Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático***, donde a diferencia de las dos anteriores comunicaciones, que exhibieron una prospectiva del comportamiento climático a escala nacional, este adiciona resultados a nivel regional y departamental, en la que actualmente contiene información sobre cambios de precipitación y temperatura, por ser las variables que permiten el análisis del cambio climático. De acuerdo a lo anterior, se identificaron en los departamentos donde se encuentra emplazada la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba (Meta y Cundinamarca), cambios porcentuales negativos y positivos respectivamente en la precipitación y cambios porcentuales positivos en la temperatura media en ambos departamentos, en los tres periodos proyectados (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100).

Por otra parte, el tiempo en que el IPCC comenzó la realización de los informes de cambio climático, ya existían varios estudios en diferentes sectores de Colombia relacionados con este mismo contexto. Los primeros estudios se trabajaron en la ciudad de Bogotá por Hense et al. (1988), identificando tendencias positivas en temperatura y humedad relativa. Igualmente, Smith et al. (1996) reportaron tendencias decrecientes en las precipitaciones en la misma zona de estudio. Por consiguiente, Mesa et. al (1997) publica una de las primeras investigaciones detalladas a nivel de búsqueda en señales de cambio climático en Colombia. En sus resultados se observaron cambios estadísticamente significativos en los caudales promedios mensuales para las principales cuencas hidrográficas del país, en las cuales indican, por ejemplo, una disminución de $4\text{m}^3/\text{s}$ por año en Puerto Berrío; aumento en la temperatura media y mínima ($0,1\text{C}^\circ$ por año), y en la humedad relativa (0.3% por año). Burlando y Pellicciotti et. al (2002) afirma los comportamientos de los caudales en una cuenca pueden estar sujetos también a los eventos climáticos extremos presentes, como el aumento o disminución de la precipitación y la temperatura.

Ochoa y Poveda (2008) estudiaron también diversas variables hidrometeorológicas, para identificar aquellas que tuvieran tendencia negativa o positiva al cambio climático en cuencas grandes y pequeñas (hasta 170.000 km^2), concluyendo que en los caudales medios de las cuencas

más grandes tenía tendencia decreciente. Aristizábal y Acevedo (2009) realizaron una caracterización de los cambios futuros en la precipitación y estimación de los balances hídricos en la cuenca del río Magdalena a través de cuatro modelos de circulación general recomendados por el IPCC (2007), indicando un aumento en los caudales medios como consecuencia del aumento de las precipitaciones. Marengo (2009) hizo un análisis de la distribución de los extremos de temperatura y precipitación planteando dos escenarios, en un pasado reciente (1961-1990) y en un futuro (2071-2100), concluyendo que en todas las partes de la región se experimentarían cambios significativos a través de diferencias considerables en los valores de la precipitación y valores extremos de temperatura, proyectando cambios en los extremos de lluvia y periodos de sequía.

Por otra parte, Duque (2014) enfoca los escenarios de cambio climático hacia la cuenca hidrográfica del río Amazonas, a través de metodologías y herramientas como la teoría de escalamiento estadístico, la regionalización hidrológica y la modelación hidrológica, para diferentes escenarios futuros de cambio ambiental global (cambio climático y cambio en los usos del suelo). Entre los resultados Duque concluyó que se esperaría para los diferentes escenarios una disminución generalizada de los caudales máximos en toda la cuenca, y patrones de aumento y disminución (entre 10% y 50%) de caudales medios por región.

Igualmente, Carvajal (2014) trabaja sobre la cuenca del Amazonas, donde se analizó la importancia de considerar análisis no estacionarios para la estimación de caudales máximos en Colombia, determinó que no se cumplía la hipótesis de estacionariedad para los análisis de frecuencia de caudales máximos en el 63% de las 130 estaciones analizadas en la cuenca y el 70% de las 20 estaciones analizadas en Colombia. De tal forma, Carvajal resalta la no estacionariedad como una herramienta de diseño que pueden ser implementadas en las prácticas de ingeniería en Colombia, y que pueden representar de mejor manera la realidad física en la estimación de los caudales máximos.

Finalmente, Valencia (2015) analizó 64 modelos de circulación general del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), 20 pertenecientes a la fase tres (CMIP3) y 44 a la fase cinco (CMIP5), con el fin de evaluar la capacidad de representar correctamente los fenómenos influyentes en la climatología y para resaltar la necesidad de trabajar variables tales como la precipitación en escenarios de cambio climático, justificando el gran impacto de los GEI en el

recurso hídrico. Valencia finalmente selecciona los modelos HAD CM3 del CMIP3 y NORESM 1 M y NORESM 1 ME del CMIP5 el cual cumplen el paso final de verificación de la variabilidad temporal de las anomalías del Pacífico, satisfaciendo la influencia de la variabilidad a nivel espacial y temporal de la oscilación de baja frecuencia que representa el ENSO en la actividad convectiva en Colombia.

En definitiva, en gran parte de los artículos anteriormente mencionados se pueden identificar cambios significativos en los caudales extremos en relación con variables influyentes del cambio climático, tales como la precipitación y la temperatura. Así mismo, cabe destacar la variedad de metodologías y herramientas aplicadas para el planteamiento y análisis de los escenarios de cambio climático a nivel global, nacional y regional. Igualmente, las fuentes de información institucionales resultan ser importantes para entender el comportamiento del cambio climático a futuro, siendo principales fuentes de consulta para la toma de decisiones nacionales, regionales locales, públicas y privadas. Así mismo, sirve para conocer el estado de las acciones que actualmente se adelantan en el país, especialmente aquellos que estén orientados a la adaptación y la mitigación de la producción GEI.

7 Marco referencial

7.1 Marco teórico

7.1.1 Modelos en cuencas hidrográficas

Ponce (Ponce & Hawkins, 1996) menciona en su libro “Engineering Hydrology” publicado en el año 1989, que los modelos matemáticos se dividen en dos clases: (1) material y (2) formal. El modelo material es una representación física del prototipo de la cuenca con simuladores de lluvias y cuencas experimentales. Por otra parte, un modelo formal es una abstracción matemática de la situación que conserva las propiedades estructurales importantes del prototipo, estos modelos son llamados modelos matemáticos. Estos modelos se clasifican en determinísticos, probabilísticos, conceptual y paramétricos; de tipo teórico, conceptual o empírico. Los modelos determinísticos son formulados en términos variables, parámetros y ecuaciones relacionadas a ellos, esto implica la relación causa-efecto entre los valores de los parámetros elegidos y los resultados.

De acuerdo con esto, el presente trabajo se realiza sobre un modelo determinístico, puesto que el método a utilizar es de lluvia-escorrentía. Este se trabaja continuamente procesando datos numéricos para simular los hidrogramas de escorrentía, ya que este tipo de modelo matemático permite contemplar la precipitación, infiltración con las características de la cuenca, tipos y usos del suelo del área de estudio representando las condiciones reales de la zona de estudio.

7.1.2 Simulación del proceso lluvia-escorrentía

Para la creación de modelos a través del proceso lluvia-escorrentía, es necesario saber cuáles son las variables que van a intervenir en los resultados de la influencia o relación que hay entre estos dos fenómenos. Por lo tanto y de acuerdo con Mijares (Mijares, 1992) en su libro “Fundamentos de Hidrología de Superficie” los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son: 1) Área de la cuenca 2) Altura total de precipitación. 3) Características generales o promedio de la cuenca (características morfométricas), 4) Distribución de la lluvia en el tiempo y 5) Distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca. Para el procesamiento de los parámetros, se utilizó el programa HEC-HMS (Hydrologic

Engineering Center Hydrologic Modeling System) para la modelación hidrológica, simulando los hidrogramas de escorrentía para un punto de la red fluvial de la cuenca (Carvajal, 2014), donde sus componentes se basan en relaciones matemáticas simples para representar los procesos que intervienen en la generación de caudales.

7.2 Marco conceptual

Durante años muchos investigadores se han dedicado a entender la importancia de las características morfométricas de una cuenca, los estudios representativos fueron iniciados por Robert Emer Horton (Horton E. H., 1932; Horton R. E., 1945) padre de la hidrología moderna en los Estados Unidos de Norteamérica, a través de sus dos artículos de referencia internacional “Drainage basin characteristics” (1932) y “Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology” (1945). Arthur Newell Strahler (1964) modificó y mejoró el sistema para el análisis de la red de drenaje propuesto por Horton (1945), que consiste en la clasificación de los órdenes por jerarquización para ordenar las redes de drenajes en cuencas hidrográficas. De esta manera Horton y Strahler, se convirtieron en dos de los grandes investigadores de la morfometría de cuencas.

Monsalve (1999) también define una cuenca hidrográfica como un área definida topográficamente que es drenada por un sistema conectado de cursos de agua delimitada por una línea divisoria que une las cotas máximas. Para ello, se delimita la cuenca haciendo uso del programa ARCGIS 10.1. La delimitación de la cuenca permite identificar variables morfométricas como el tiempo de concentración, la cual determina el tiempo que tarda en llegar en la desembocadura de la cuenca el agua que procede del punto más alejado. Existen múltiples expresiones para su cálculo por diferentes autores: Kirpich (1940), Servicio de Conservación de Suelos o Soil Conservation Service por su sigla “S.C.S” (1985), Hathaway (1945), George Rivero, Federal Aviation Administration FAA (1970), California Culverts Practice (1942).

Para Chow et. al (1988) las tormentas de diseño se basan en registros históricos de precipitación en las que existen varios métodos para obtenerlas, estas van desde el desarrollo de la información puntual de precipitación hasta las relaciones de las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF). Estas curvas son resultantes de la unión de puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma

frecuencia o período de retorno (Strahler AN, 1964), de las cuales se obtienen los hietogramas que muestra la intensidad de la precipitación en función del tiempo (WMO, 2012) como hietogramas de diseño y las tormentas estimadas basadas en la precipitación probable. Entre los hietogramas sintéticos, los más usados son aquellos como el Hietograma Triangular del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), Hietograma de Chicago, Curvas de Huff, Hietograma Rectangular del Método Racional, y el Hietograma de Bloques Alternos.

Para la simulación del proceso Lluvia-Escorrentía, se requiere de suficiente información, donde destaca la del tipo espacial. Parte de esos datos pueden ser generados a partir de un análisis y procesamiento de un Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés) y su combinación con imágenes de sensores remotos del área en estudio (WMO, 2012).

El HEC-HMS (siglas que provienen de su nombre en inglés Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) está diseñado para simular el proceso de precipitación-escorrentía de cuencas dendríticas. Este programa posee una vasta gama de modelos matemáticos para simular la precipitación, la infiltración, la transformación de la precipitación neta, el flujo base y el tránsito hidráulico en canales abiertos (WMO, 2012).

Según Joo et al. (2013), este software se puede categorizar como un modelo determinístico, ya que representa el proceso de escorrentía de la cuenca por medio de un modelo de pérdidas, el cual se combina con un hidrograma unitario. Este último es un gráfico que muestra la variación temporal de variables hidrológicas tales como el nivel de agua, el caudal, la velocidad y la carga de sedimentos (WMO, 2012). Por su parte, Villón (2013) indica que el HEC-HMS puede utilizarse en pequeñas cuencas urbanas para simular la respuesta del escurrimiento superficial producto de una precipitación. Este modelo es ampliamente usado a nivel mundial, con aplicaciones enfocadas en estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, observación de flujo. También, debido a que es un programa de simulación hidrológica de eventos, aumenta la importancia para el área de la ingeniería civil, puesto que los resultados obtenidos pueden ser empleados en el diseño de obras de infraestructura. Esto se debe a que estructuras como puentes, alcantarillas y represas, requieren conocer datos de caudales picos o máximos, así como los volúmenes por trasegar (Villón, 2013).

El IPCC ha definido el cambio climático como el cambio en el clima a través del tiempo debido a la variabilidad natural del mismo o como resultado de la actividad humana (IPCC, 1988).

Según la Convención Marco de Cambio Climático, el cambio climático hace referencia al cambio del clima que es atribuido directa o indirectamente por la actividad humana, alterando la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (Naciones Unidas, 1992). Así mismo los escenarios de cambio climático vienen siendo una representación del clima que se realiza bajo condiciones de cambio planetario, de acuerdo a distintas concentraciones de gases de efecto invernadero y cualquier otro factor que afecte el balance energético actual.

7.3 Marco Legal

7.3.1 Cambio Climático

A nivel internacional, en el año 2000 con la Declaración del Milenio 189 estados miembros de la Organización de las Naciones Unidas ONU, acordaron tener un mundo pacífico teniendo como base 8 Objetivos de Desarrollo del Milenio ODM, entre los cuales se encuentra la erradicación de la pobreza extrema y el hambre, garantizar la sostenibilidad del medio ambiente y fomentar una alianza mundial para el desarrollo (ONU, 2000).

Asimismo, en el 2016 con la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se sostiene que durante los próximos 15 años los países deberán marcar pautas relacionadas con los 17 objetivos, entre los que destaca la adopción de medidas urgentes para combatir el cambio climático y garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible (ONU, 2015).

Desde el contexto nacional, se ratificó la convención mediante la Ley 164 de Octubre de 1994, donde se aprueba la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, realizada en Nueva York el 9 de mayo de 1992, la cual pretende lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático.

Igualmente, en la ley 629 del 2000 se aprueba el Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 1997, cuyo propósito es la reducción de emisiones y fomentar a la eficiencia energética, en donde se contempla Mecanismos de Desarrollo Limpio MDL, para que los países no anejos (en vías de desarrollo) ayuden a los países desarrollados a reducir el inventario atmosférico de los Gases Efecto Invernadero GEI a los niveles

establecidos por el Protocolo. Por lo tanto, se introducen modificaciones en la normatividad relacionada con cambio climático, con el objetivo de mejorar el procedimiento de aprobación nacional de proyectos de reducción de emisiones de GEI que optan al MD, esto con el ánimo de reducir los tiempos de respuesta, agilizar el proceso interno de evaluación.

Con respecto al ordenamiento territorial municipal y distrital se contempla los criterios para su formulación y regulación a través de la Ley 388 de 1997. Posteriormente en el Decreto 879 de 1998 se reglamenta los Planes de Ordenamiento Territorial POT, junto con el Decreto 150 de 1999 asegurando su vigencia. En cuanto a los instrumentos de planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas y acuíferos, se tiene el Decreto 1640 de 2012, así como la Guía técnica de planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas POMCAS del Ministerio de Medio Ambiente y desarrollo sostenible. Finalmente, la ley 373 de 1997 establece el programa de uso eficiente y ahorro del agua, a través del diagnóstico de la oferta hídrica de la fuente de abastecimiento y la demanda de agua para el uso adecuado de aguas superficiales, entre otros aspectos definidos por las Corporaciones Autónomas Regionales.

8 Hipótesis

Se espera una incidencia significativa de los cambios de precipitación porcentual del multiescenario de cambio climático sobre la variación de los caudales máximos, especialmente en la parte alta y media de la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba, puesto que el 76 % de la cuenca se encuentra sobre el departamento de Cundinamarca, el cual está representado sobre un cambio de precipitación porcentual positivo. Esto podría conllevar a un aumento del caudal en la cuenca baja, independientemente del cambio de precipitación porcentual negativo representado sobre el departamento del Meta en 24 % del área de la cuenca, debido a la diferencia de aportantes hídricos entre la parte alta-media y la parte baja.

9 Metodología

Para el desarrollo del proyecto y con el fin de cumplir los objetivos, se representa en la Figura 2 las fases que comprenden la secuencia de actividades propuestas para la solución del problema a investigar.

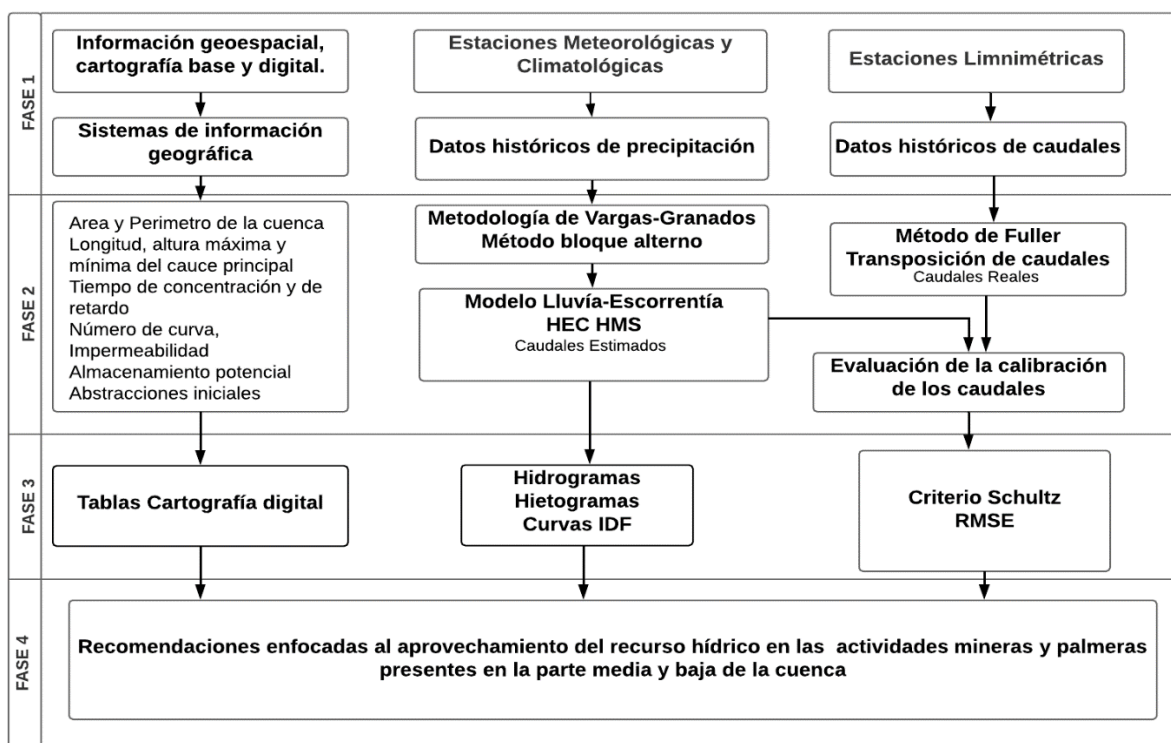


Figura 2. Diagrama de flujo metodológico del proyecto, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

9.1 Fase 1: Recolección y procesamiento de la información

9.1.1 Información geoespacial, cartografía base y digital

Se realizó una recopilación de información a través del Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Villavicencio y el Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) sobre las características ambientales de la cuenca, la cual fue adquirida por parte de entidades públicas asociadas con la zona de estudio, como Cormacarena, Corporinoquia, IDEAM, IGAC y la Alcaldía Municipal de Villavicencio. También se consultaron artículos científicos, para

comparar los estudios que tuvieran condiciones hidrológicas y morfométricas similares a la cuenca del río Guayuriba, con el fin de llevar a cabo un análisis detallado sobre su comportamiento.

De acuerdo con esto, se obtuvo información acerca de las condiciones y el comportamiento de algunas variables morfométricas, topográficas, climáticas y de uso de suelo para la estimación y análisis de los caudales máximos de la cuenca del río Guayuriba. Estas son utilizadas en el modelo hidrológico HEC HMS con la aplicación del método lluvia-escorrentía (Apéndice B).

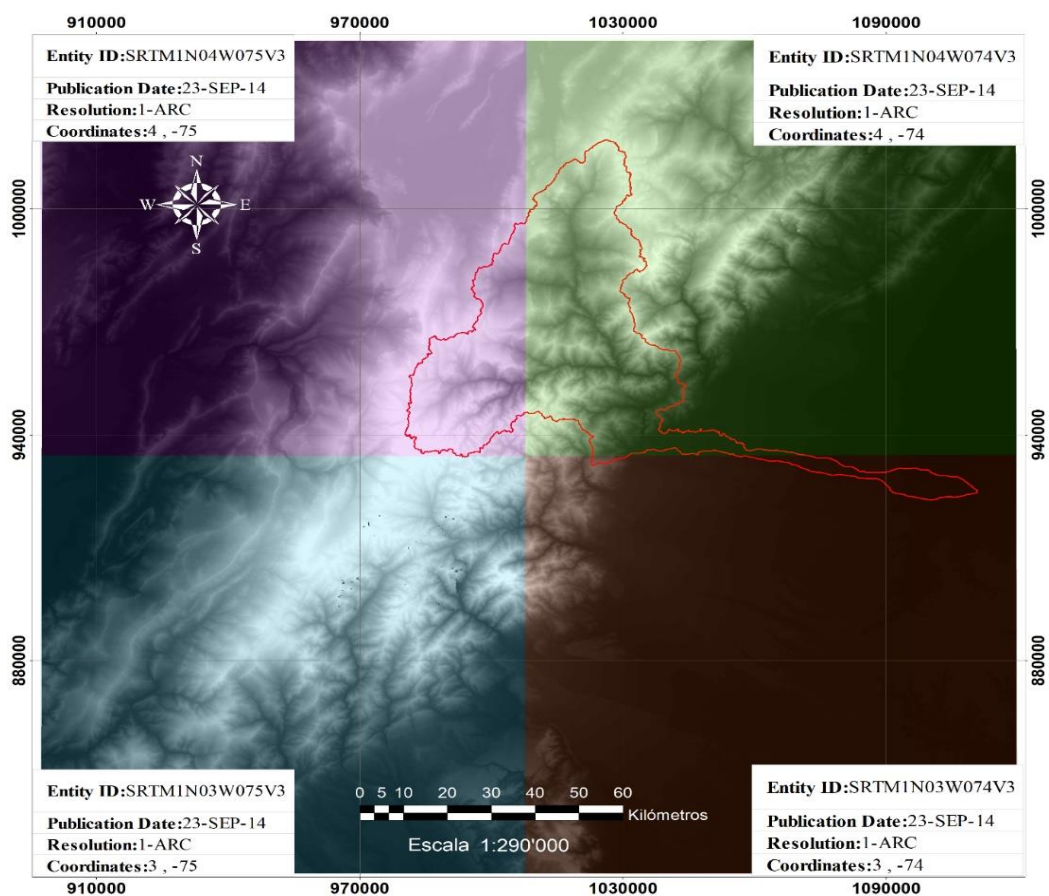


Figura 3. Modelos de Elevación Digital utilizados para cuenca del río Guayuriba, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Se obtuvo información del Marco Geoestadístico Nacional (2012) de los departamentos Meta y Cundinamarca a través del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y del Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial (SIGOT). También, se recopilaron 4 Modelos Digitales de Elevación DEM (Digital Elevation Model por sus siglas en inglés), del Servicio Geológico de los Estados Unidos o USGS (United

States Geological Survey por sus siglas en inglés) provenientes del sensor NASA STRM 1 (Figura 3), en la que posteriormente fueron ajustados con cartografía 1:100.000 del IGAC del año 2006; cartografía Digital 1:100.000 del IGAC; y planchas cartográficas correspondiente a los departamentos del Meta y Cundinamarca. Esta información fue utilizada para obtener una mejor referencia espacial de la zona de estudio (Apéndice C).

9.1.2 Información Climatológica

Se consultaron 27 estaciones meteorológicas y climatológicas activas existentes en la región, con un mínimo de 20 años de registro histórico de precipitación máxima en 24 horas promedio multianual (Apéndice E); la selección de las estaciones se hizo por el método de Polígonos de Thiessen próximas a la cuenca, de las cuales 17 estaciones tuvieron influencia directa en la cuenca (Chow, Maidment, & Mays, 1994). De éstas se consideró un criterio de selección sobre las estaciones que tuvieran mayor área de influencia sobre cada subcuenca, obteniendo así 8 estaciones (Ver Tabla 1). En la Figura 4 se puede observar el área de influencia de las estaciones consultadas sobre la cuenca, y en la Tabla 2 las respectivas características de las estaciones seleccionadas.

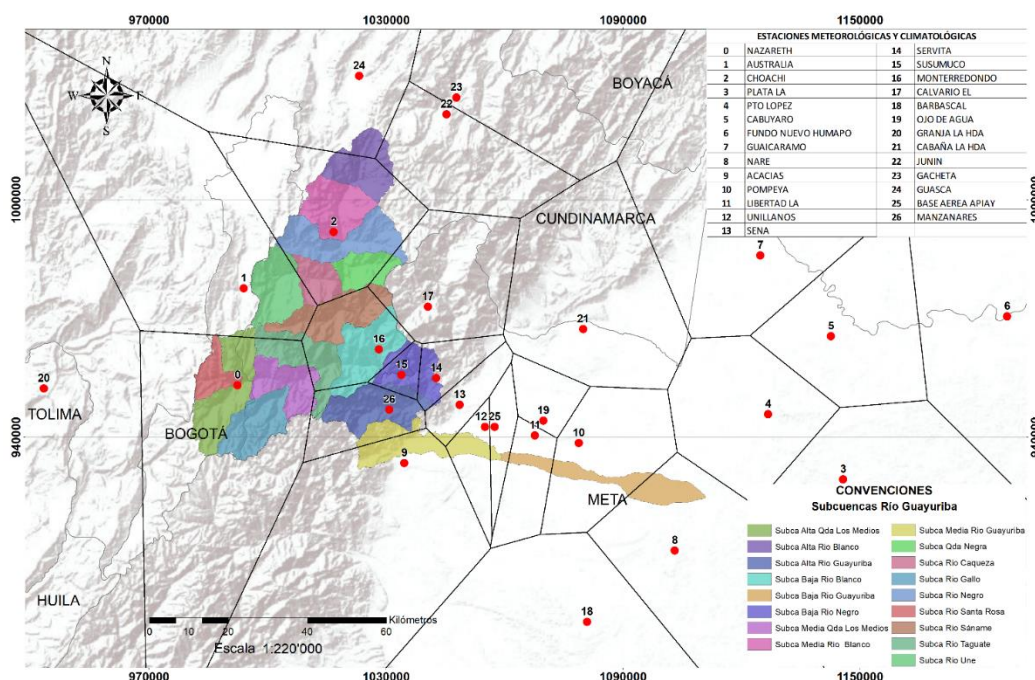


Figura 4. Aplicación del método de Thiessen de las estaciones en la cuenca del río Guayuriba. Las localizaciones de las estaciones meteorológicas y climatológicas fueron obtenidas en formato shapefile a partir base de datos del IDEAM (2017), por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Tabla 1.
Influencia de las estaciones seleccionadas por subcuenca.

Subcuenca	Estación	Influencia (%)
Subcuenca Alta Río Blanco (1)	Choachí	65.60
Subcuenca Media Río Blanco (2)	Choachí	100
Subcuenca Río Negro (3)	Choachí	96.00
Subcuenca Quebrada Negra (4)	Choachí	80.74
Subcuenca Río Cáqueza (5)	Choachí	88.21
Subcuenca Río Une (6)	Australia	96.63
Subcuenca Río Santa Rosa (7)	Nazareth	99.67
Subcuenca Alta Quebrada Los Medios (8)	Nazareth	95.76
Subcuenca Río Gallo (9)	Nazareth	100.00
Subcuenca Media Quebrada Los Medios (10)	Nazareth	93.06
Subcuenca Baja Río Blanco (11)	Monterredondo	89.93
Subcuenca Río Taguate (12)	Monterredondo	41.77
Subcuenca Río Sáname (13)	Monterredondo	68.03
Subcuenca Alta Río Guayuriba (14)	Manzanares	87.49
Subcuenca Baja Río Negro (15)	Susumuco	53.99
Subcuenca Media Río Guayuriba (16)	Acacías	48.24
Subcuenca Baja Río Guayuriba (17)	Nare	46.01

Nota: Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas

Tabla 2.
Estaciones meteorológicas seleccionadas.

Código	Cat	Nombre estación	Depto.	Municipio	Años de registro
35020010	PM	Monterredondo	Cundinamarca	Guayabetal	35
35020020	PG	Susumuco	Cundinamarca	Guayabetal	35
35010020	PM	Acacias	Meta	Acacias	30
35010080	PM	Nare	Meta	Puerto López	35
35020310	PG	Nazareth	Bogotá D.C.	Bogotá D.C.	33
21201300	PM	Australia	Bogotá D.C.	Bogotá D.C.	32
35020280	PM	Choachí	Cundinamarca	Choachí	36
35020030	PM	Manzanares	Meta	Acacias	20

Nota: Cat categoría, PM Pluviométrica, PG Pluviográfica. Adaptado de base del IDEAM (2017) por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

9.1.3 Información hidrológica

Se utilizó una base de datos hidrológica de varias estaciones de la región (Apéndice F). En la Tabla 3 se puede observar la información básica de las estaciones hidrológicas activas y en la Figura 5 su ubicación geográfica junto con las estaciones climatológicas y meteorológicas seleccionadas.

Cabe destacar que la estación hidrológica Bajo Nare se consideró representativa para la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba debido a que es la estación más cercana al punto de desembocadura, la cual es un aspecto importante para la validación del modelo hidrológico.

Tabla 3.

Estaciones hidrológicas consultadas.

Código	Cat	Nombre estación	Depto.	Municipio	Corriente	AR
35017100	LM	Bajo Nare	Meta	Puerto López	Metica	20
35027210	LG	Caseteja-delicias	Cundinamarca	Guayabetal	Negro	35
35027140	LG	Pte carretera-Guayuriba	Meta	Villavicencio	Guayuriba	17

Nota: LM Limnimétricas, HA Hidrológica Automática, LG Limnigráfica, AR años de registro. Adaptado del IDEAM (2017) por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

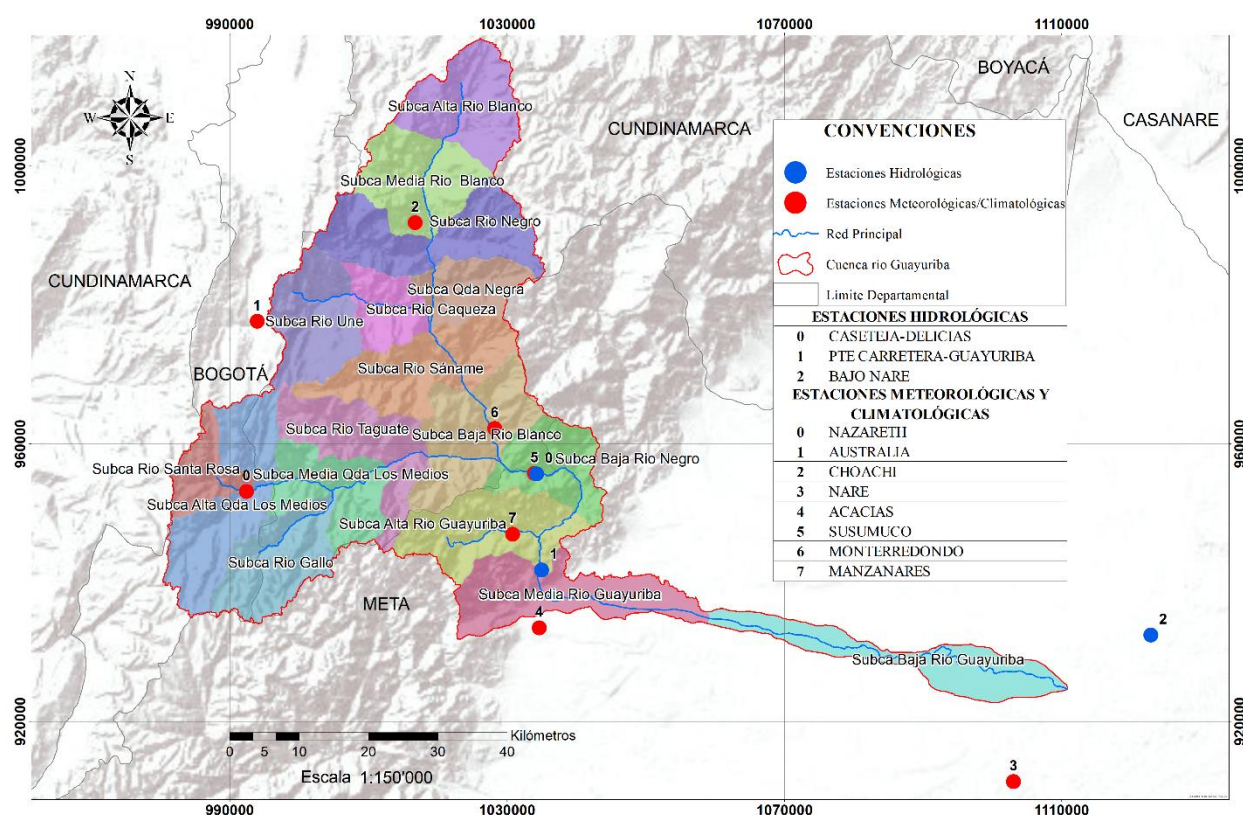


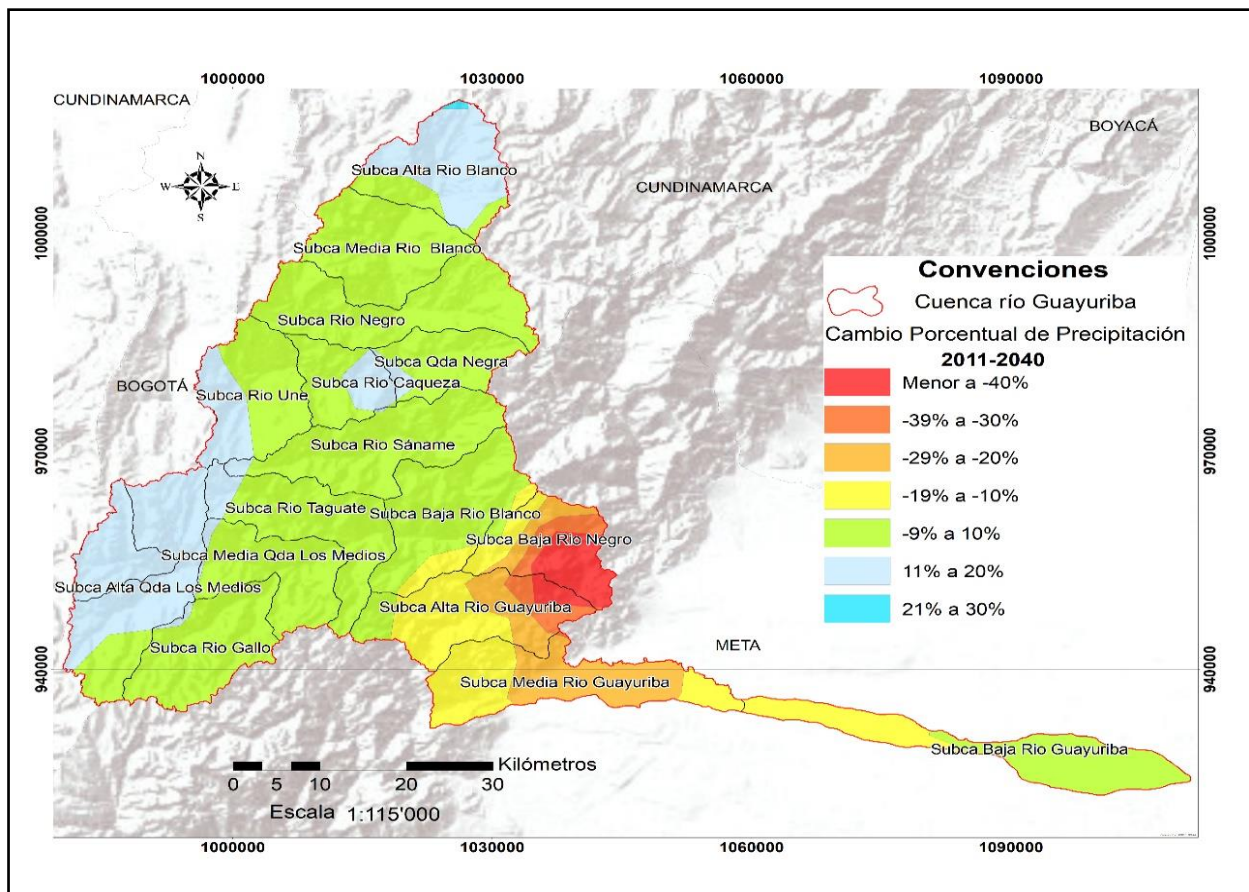
Figura 5. Estaciones hidrológicas, meteorológicas y climatológicas seleccionadas, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

9.1.4 Representación de los períodos proyectados de cambio climático

Se obtuvo información de los cambios porcentuales de precipitación para los períodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, proyectados en el multiescenario de cambio climático establecido por el IDEAM para los departamentos Meta y Cundinamarca (IDEAM, 2015), con el propósito de

representarlos en la cuenca y permitir ajustar los datos históricos de precipitación según la diferencia porcentual promedio de cada periodo proyectados por departamentos.

Cabe destacar que la información geográfica fue adaptada a la cuenca del río Guayuriba. Esta información se encuentra en formato *shapefile* en la base de datos del IDEAM (2017) y en formato PDF en el documento *Nuevos Escenarios de Cambio Climático 2011-2100* (IDEAM, 2015).



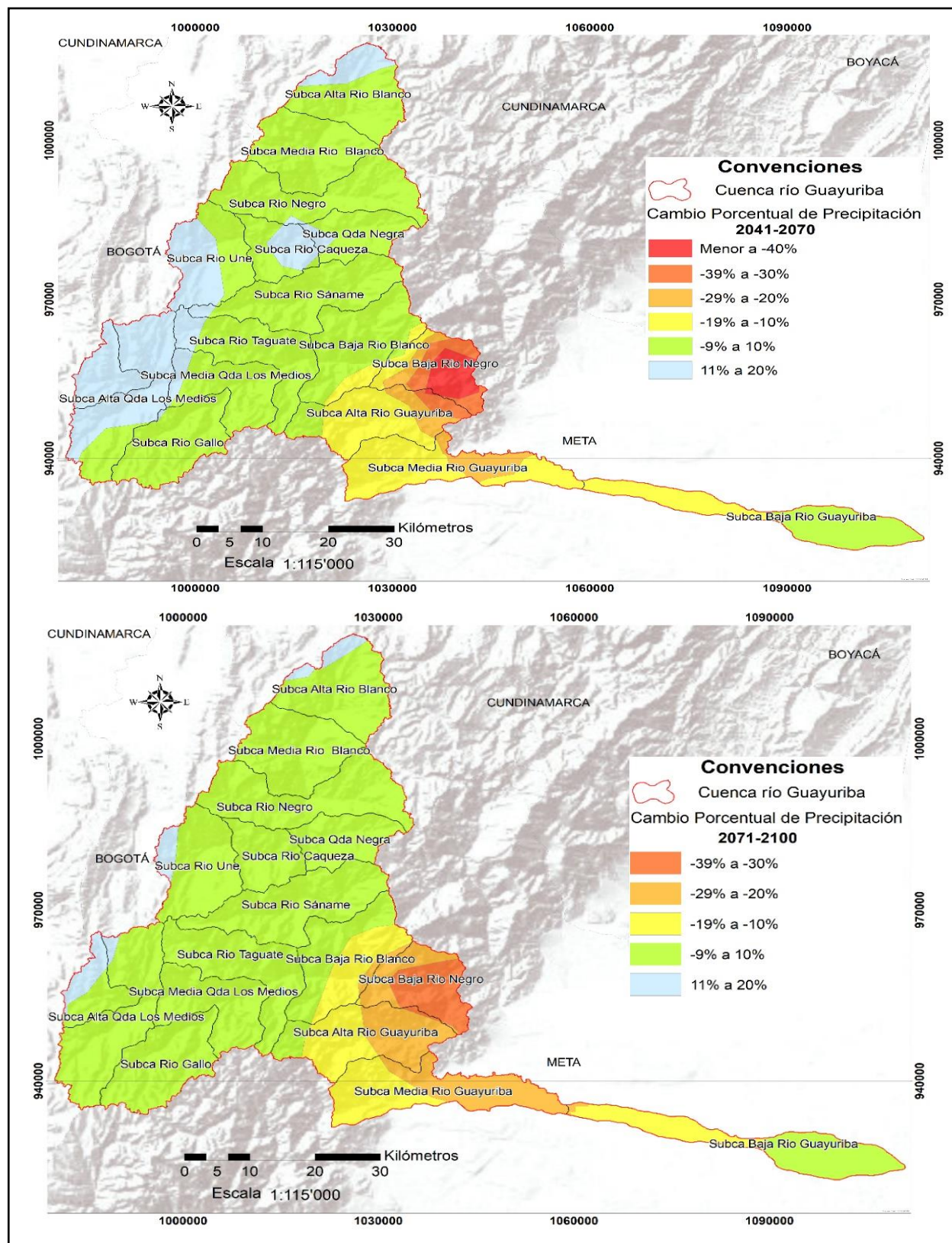


Figura 6. Proyección de los cambios porcentuales de precipitación en los periodos 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 en la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

9.2 Fase 2: Simulación del modelo lluvia-escorrentía.

Para la simulación del proceso lluvia-escorrentía se utilizó el programa HEC-HMS, donde se tuvo en cuenta los elementos hidrológicos existentes por subcuenca, incluyendo procesos y métodos de los componentes del modelo de la cuenca, del modelo meteorológico y de las especificaciones de control y de entrada de datos (Tabla 4).

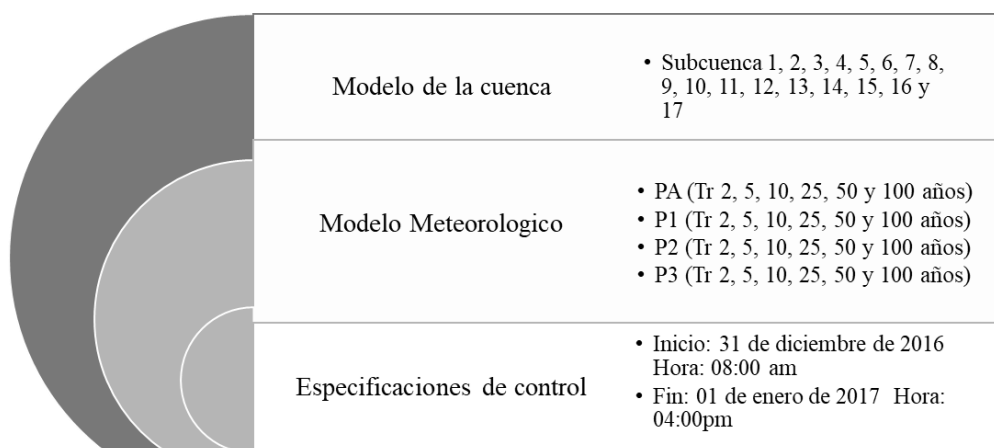


Figura 7. Esquema del modelo hidrológico lluvia-escorrentía. Periodo actual PA (1995-2015), multiescenario P1 (2010-2040), multiescenario P2 (2041-2070), multiescenario P3 (2071-2100) y Tr: período de retorno, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

El tiempo de duración de cada simulación fue de 32 horas, iniciando a las 8:00 am hasta las 4:00 pm del siguiente día. Se hicieron 24 simulaciones donde se incluyeron tanto los datos actuales de precipitación (1995-2015) como los cambios porcentuales de precipitación promedio de los periodos del multiescenario de cambio climático (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) por cada periodo de retorno (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años), con el fin de hacer el análisis comparativo de los caudales máximos. También se hicieron 10 simulaciones equivalentes a la longitud de registro de caudales máximos considerados en la estación Bajo Nare (1999-2009), la cual fue la estación seleccionada para la validación y calibración del modelo. Cabe resaltar que en este modelo no se consideraron variables que, a excepción de la precipitación, pudieran contribuir en los resultados de los caudales máximos a causa de la influencia en el cambio climático.

Tabla 4.
Métodos empleados y parámetros por subcuenca.

Elemento hidrológico	Procesos	Método	Parámetros
Subcuenca	Pérdidas	Número de curva (CN) SCS	CN, pérdidas iniciales.
	Transformación lluvia escurrimiento	Hidrograma Unitario (HU) SCS	Área de la cuenca, Tlag hietograma de lluvia de diseño.
Tramo de río	Tránsitos de crecientes	Lag	Tlag tramo.

Nota: por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Para ello, fue necesario la cuantificación de variables morfométricas, climatológicas e hidrológicas (López, y otros, 2012) con la finalidad generar los caudales, como variables de salida, representados a través de hidrogramas.

Es importante resaltar que se utilizó el método Número de Curva CN debido a que es una de las técnicas más empleada para la transformación de la precipitación total en precipitación efectiva. Esta fue desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) para estimar la infiltración y las pérdidas iniciales (US Army Corps of Engineers, 2000; Ponce & Hawkins, 1996; Méndez Morales, 2012; Grimaldi, Petroselli, & Romano, 2013; Lavao, 2014). Asimismo, se utilizó el método del Hidrograma Unitario del SCS dado a que su diseño fue basado en el análisis de un gran número de hidrogramas unitarios naturales en una cantidad considerada de cuencas hidrográficas, de diferentes tamaños y lugares del mundo (Monsalve, 1999).

9.2.1 Variables morfométricas.

Inicialmente se cuantificó las variables morfométricas necesarias para la simulación del modelo lluvia-escorrentía, con base en el mosaico de los modelos digitales de elevación representados en la Figura 3. Se realizaron geoprocesamientos a través del programa ArcGIS 10.1. En la Tabla 5 se observa las variables que se consideraron con su respectiva descripción.

Tabla 5.
Descripción del cálculo de las variables morfométricas de entrada.

Variable	Descripción
Área de la cuenca (A)	Es el espacio geográfico que ocupa la cuenca. Se obtiene generando y calculando el polígono que representa toda la cuenca hidrográfica.
Perímetro de la cuenca (P)	Es la delimitación de la cuenca. Se obtiene generando un trazo a través de la línea divisoria de aguas de toda la cuenca.
Longitud del Cauce Principal (L)	Es la distancia que recorre el cauce principal de la cuenca. Se obtiene generando un trazo en el cauce principal de la cuenca, desde el punto de nacimiento, hasta su desembocadura.
Altura máxima del cauce (H máx.)	Es el punto más alto del cauce principal de la cuenca. Se obtiene identificando la cota ubicada en el punto de nacimiento del cauce.
Altura mínima del cauce (H min.)	Es el punto más bajo del cauce principal de la cuenca. Se obtiene identificando la cota ubicada en el punto de desembocadura del cauce.
Pendiente del cauce principal (Sc)	Es el declive entre el punto más alto y más bajo del cauce principal de la cuenca. Se calcula por la diferencia de elevación entre el punto más alto y más bajo del cauce principal dividido entre la longitud del mismo.

Nota: Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

9.2.2 Estimación del Número de Curva.

Las pérdidas iniciales asociadas a la infiltración se calculan por el Numero de Curva CN. El CN es una técnica desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) para estimar la infiltración, siendo la más empleada para transformar la precipitación total en precipitación efectiva (US Army Corps of Engineers, 2000; Ponce & Hawkins, 1996; Méndez Morales, 2012; Grimaldi, Petroselli, & Romano, 2013; Lavao, 2014). Esta varía en función del tipo de suelo (A, B, C y D) y las condiciones de la superficie (Bueno, Regular y Malo) (Monsalve, 1999; Chow, Maidment, & Mays, 1994). Como resultado de varios estudios, el SCS obtuvo un conjunto de curvas estandarizadas a partir de un numero adimensional de curvas CN, que varía de 0 a 100,

según el grado de escorrentía directa. Por lo tanto, un número de curva CN=100 indica que toda la lluvia escurre y un CN=0 indica que toda la lluvia se infiltra (Lavao, 2014).

De acuerdo con esto, se determinó el CN en la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba a través de la adaptación entre la caracterización de la cobertura del suelo del SIGOT con la clasificación de suelos del geoportal del IGAC, con la finalidad de obtener información de cobertura representativa y actualizada hasta el momento (2008), manteniendo la clasificación definida por el IGAC, la cual es la clasificación que permite trabajar con mayor eficiencia el método SCS. En la Tabla 6 se describe brevemente el tipo de cobertura y su clasificación.

Tabla 6.
Clasificación de cobertura de la tierra.

Tipo	Símbolo	Uso predominante	Clase
Pastos	Ap	Pastoreo extensivo y recolección de madera, fibras y frutos para uso doméstico.	Asociación de pastos, rastrojos, matorrales y relictos
Bosques	Bi	Extracción de flora y fauna; cultivos y pastos en área de bosques en transición a potrero.	Bosques naturales fragmentados
	Bn	Reservas forestales; resguardos y territorios indígenas y de comunidad.	Bosques naturales
	Bp	Plantaciones forestales para producción y recuperación de suelos.	Bosques plantados
Cultivos	Cu	Agricultura intensiva con especies anuales como arroz, algodón, sorgo, maíz, frijol, papa, en todos.	Transitorios
Herbáceas, leguminosas y/o arbustiva	Ma	Extracción selectiva de productos como leña, fibras y frutos; usos silvopastoriles y tierras en descanso.	Arbustos naturales y/o inducidos
	Pn	Cobertura de herbáceas que han sido plantadas, generalmente utilizada para actividad ganadera. Pastos limpios, arbolados, enmalezados o en rastrojados.	Pastos naturales o naturalizados
	Vp	Parques Nacionales Naturales, áreas protegidas; pastoreo ganado.	Vegetación de paramo
Urbano	Urbano	Tejidos urbanos y suburbano, centros poblados, redes de comunicación, etc.	
Vegas de Aguas	Aguas	Son los ríos, lagunas, lagos o zonas inundadas.	

Nota: elaboración propia a partir de la información de caracterización de la cobertura del SIGOT adaptado a la clasificación del IGAC, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

9.2.3 Estimación Pérdidas iniciales.

La fracción de lluvia que no interviene en la formación de escorrentía superficial se denomina pérdidas o abstracciones iniciales (Aroca, 2014). Estas pérdidas se representan por la intercepción, infiltración y almacenamiento en la superficie, la cual ocurre antes de comenzar el proceso de escorrentía (Baltas, Dervos, & Mimikonu, 2007). Las pérdidas iniciales de una precipitación se determinan relacionando la precipitación efectiva con la precipitación total, teniendo en cuenta la capacidad de infiltración en función de las características del suelo y la cobertura vegetal (obtenido mediante el CN). Para la cuantificación se empleó la ecuación del SCS (1986):

$$Ia=0.2S.$$

Donde Ia representa las abstracciones iniciales y S el almacenamiento potencial. Este método aplica una distribución específica a una tormenta con una duración total de 24 horas (Bastidas, 2011) para determinar la lluvia neta (U.S.D.A., 1985).

9.2.4 Estimación tiempo de concentración y tiempo de retardo por subcuencas

El tiempo de concentración es un parámetro que mide el tiempo que se necesita para que toda la cuenca contribuya con la escorrentía superficial en un punto considerado. Para la estimación se emplearon dos métodos: Kirpich (1940) y California Culvert Practice (1942).

El tiempo de concentración se determinó de acuerdo al tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto más lejano. Las siguientes ecuaciones fueron utilizadas:

Kirpich: Dónde, L = Longitud de cauce principal, en pies y S_c = Pendiente del cauce, en (pies/pies).

$$T_c = 0.0078 * \left(\frac{L^{0.77}}{S_c^{0.385}} \right)$$

California Couverts Practice: Dónde, L = Longitud del cauce de la cuenca (millas) y H = Diferencia de nivel entre al punto más alto de la divisoria de aguas y el punto de salida de la cuenca (pies).

$$T_c = 60 * \left(\frac{11.9L^3}{H} \right)^{0.385}$$

El tiempo de retardo T_r es un intervalo comprendido desde el punto medio del hietograma, donde se presenta la máxima precipitación, hasta el punto medio del hidrograma, donde se presenta el caudal pico (Monsalve, 1999). Se calcula de la siguiente manera:

$$T_r = 0.6 * T_c$$

9.2.5 Propagación de caudales en cauces

Para el transporte de caudal en un canal generado desde algún punto de la cuenca hacia otro, se usa el método de tiempo de retardo Lag (Ampuero, 2012); para ello ambos puntos se deben encontrar definidos en el modelo de la cuenca. La respuesta a este transporte es un retardo y una atenuación en el hidrograma de entrada por subcuenca.

Se obtiene mediante la fórmula: $TLagS = T_c * 0.6$

Para el transito del caudal por cada tramo, se obtiene con la ecuación:

$$TlagT = \frac{(100 * L_s^{0.8} * \frac{1000}{CN} - 9)^{0.7}}{1900 * S_{cs}^{0.5}}$$

Dónde: L_s = Longitud del cauce principal en la subcuenca, en pies, S_{cs} = Pendiente (%) del cauce principal y CN por subcuenca.

9.2.6 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Se elaboraron las curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) mediante el método simplificado (Vargas & Díaz Granados, 1998), presentado en el *Manual de Drenaje de Carreteras* del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2009), el cual se explica su procedimiento en el Apéndice D. Posteriormente, se calcula el hietograma por el Método de Bloque Alternativo (Chow, Maidment, & Mays, 1994; Ortiz Higuera, 2015), que corresponde a la tormenta de diseño para los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. En la Tabla 7 se observa los valores máximos anuales de precipitación en 24 horas por estación que se utilizaron para el cálculo de las curvas IDF.

Se define el comportamiento de la intensidad de la precipitación en un tiempo de 120 minutos, puesto que es la duración promedio en la que se presentan los eventos con mayor intensidad. Usualmente la intensidad de la precipitación tiene un punto de quiebre donde después de un determinado intervalo de tiempo, las diferencias entre sus valores se vuelven constantes o poco significativas.

Tabla 7.
Valores máximos anuales de precipitación en 24 horas por estación

Año	1	2	3	4	5	6	7	Año	8
1995	62	27	29	68	119	117	112	1980	139
1996	42	45	31	65	137	130	103	1981	151
1997	23	30	38	70	165	125	117	1982	136
1998	34	41	43	106	136	131	100	1983	80
1999	28	34	34	77	106	123	136	1984	179
2000	25	31	30	75	110	112	132	1985	36
2001	28	39	33	52	106	135	150	1987	130
2002	38	45	48	70	138	135	120	1988	125
2003	33	30	27	63	91	135	102	1989	130
2004	36	31	31	115	150	164	102	1992	130
2005	65	46	49	67	166	126	124	1993	110
2006	41	39	50	84	148	125	82	1994	138
2007	29	30	38	45	127	136	187	1995	148
2008	45	40	33	91	156	115	87	1996	135
2009	30	29	28	73	92	118	85	1997	135
2010	29	34	38	99	145	136	136	1998	138
2011	77	31	37	45	97	170	100	1999	105
2012	35	30	6	69	107	130	90	2000	99
2013	30	32	45	66	106	131	111	2001	126
2014	28	28	38	84	136	103	160	2002	90
2015	37	20	29	60	110	140	72		
Máximos	77	56	119	115	168	170	187	Máximos	179
Medios	37	34	38	74	131	130	115	Medios	123
Mínimos	13	20	6	45	91	103	72	Mínimos	36

Nota: La numeración representa las estaciones utilizadas: 1: Choachí, 2 Australia, 3 Nazareth, 4: Monterredondo, 5: Susumuco, 6: Acacias, 7: Nare y 8: Manzanares. Adaptado del IDEAM (2017), por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

9.2.7 Generación de hietogramas de bloque alterno.

Para la generación del hietograma de una lluvia, se debe calcular la precipitación efectiva. Para ello, se debe tener en cuenta el período de retorno de diseño, el intervalo de tiempo y la intensidad

de la lluvia (Cruz & Peralta, 1989). Por lo tanto, se utilizó el método de bloque alterno, que consiste en el procedimiento a continuación (Oliveras, 2014):

- *Dividir el tiempo de duración en intervalos de tiempo Δt*
- *Seleccionar el período de retorno para obtener el hietograma*
- *Obtener de la curva IDF los valores de intensidad de precipitación para cada intervalo Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$... hasta la duración total de la precipitación*
- *Calcular la profundidad o volumen de precipitación caída en cada intervalo, multiplicando la intensidad por la duración del intervalo (en horas)*
- *Restar los valores sucesivos de profundidad de precipitación (en mm) calculados antes*
- *Reordenar los resultados de manera que el mayor valor esté en medio de la serie, y se vayan alternando en orden descendente alternativamente a lado y lado de ese máximo*

Este método facilita el uso de los datos de precipitación obtenidos de las curvas IDF en programas de modelamiento hidrológico como HEC-HMS.

9.2.8 Estimación de la variabilidad espacial

La variabilidad espacial de la intensidad pluviométrica es un fenómeno importante, especialmente cuando la superficie de la cuenca es grande, puesto que la intensidad no es homogénea sobre toda la cuenca en donde se presenta la precipitación (Torres Abello, 2004) . Por lo tanto, se aplicó el coeficiente de variabilidad espacial en la precipitación efectiva obtenida del procesamiento de los datos con el método de bloque alterno sobre la cuenca del río Guayuriba, con la fórmula de Burkli-Ziegler:

$$\alpha_s = A^{-\varepsilon}$$

Dónde: α_s = coeficiente de variabilidad espacial; A = superficie de la cuenca, en ha.; ε = 0.063 a 0.2 (Bertrand-Krajewski, 1999/2000). (Se recomienda ε = 0.05.)

9.2.9 Generación de hidrogramas

El hidrograma consiste en el comportamiento de los caudales en un tiempo determinado. Para su diseño, se realizó a través del programa HEC-HMS el método de Hidrograma Unitario Sintético (HUS) del SCS, quien fue desarrollado por Victor Mockus (1950) (SCS, 1986).

El HUS del SCS fue diseñado con base en el análisis de un gran número de hidrogramas unitarios naturales en una cantidad considerada de cuencas hidrográficas, de diferentes tamaños y lugares. Este método se ha aplicado usualmente a cuencas de mediano tamaño en todo el mundo (Monsalve, 1999). Como resultado, se expresa la relación del caudal Q con respecto al caudal pico Q_p y la relación del tiempo t con respecto al tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma t_p Figura 8.

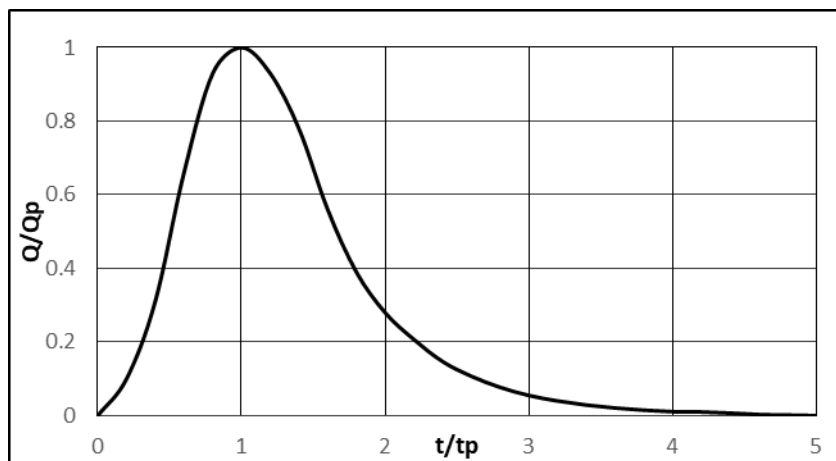


Figura 8. Hidrograma unitario adimensional del SCS. Tomado de Monsalve (1999).

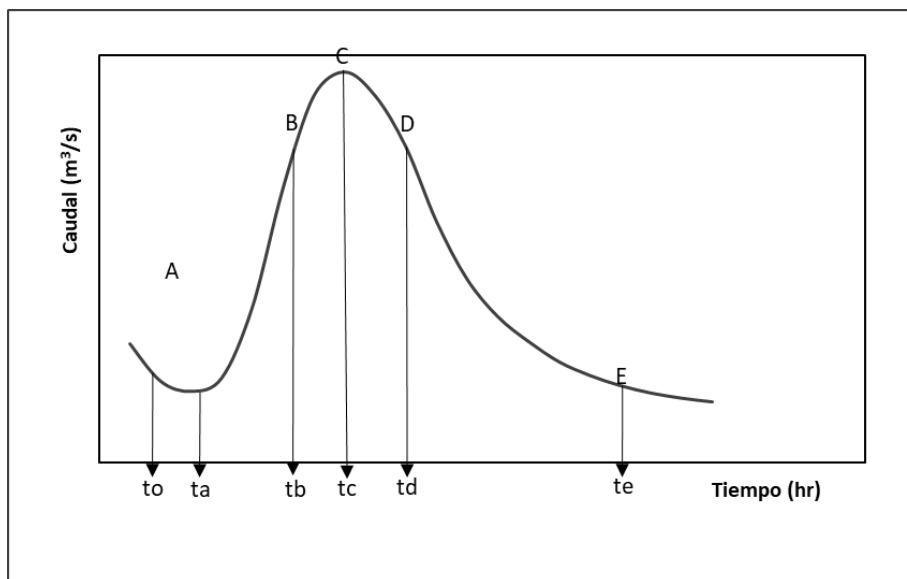


Figura 9. Componentes de un hidrograma de creciente. Tomado de Monsalve (1999).

Para un análisis más detallado de los hidrogramas se tuvo en cuenta los siguientes componentes

Punto A: momento en que el caudal empieza a aumentar.

Punto A – B: curva de concentración. El lapso t_a a t_b solamente tres componentes del hidrograma están contribuyendo a la alimentación del caudal: escorrentía superficial directa, precipitación directa sobre la corriente.

Punto B – D: cresta del hidrograma. El caudal aumenta hasta alcanzar un máximo en el punto C. la duración de la lluvia neta o de exceso es menor o igual al intervalo del tiempo t_o a t_c .

Punto D – E: curva de descenso. Es el momento que disminuye la escorrentía superficial directa.

Punto E: curva de agotamiento. Este punto indica la terminación de toda la escorrentía superficial.

9.2.10 Comparación con el método de Fuller.

Se realizó la comparación con los datos históricos de caudales máximos y mínimos de las estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM. De este modo, se obtiene la información en un período de tiempo que contenga mayor registro histórico de datos, de las 4 estaciones instrumentadas con medición de caudales sobre la cuenca del río Guayuriba y la cuenca del río Metica.

Seguidamente, para la comparación de los caudales se utilizó la metodología de Fuller (Monsalve, 1999), el cual comprende un método de extrapolación de datos históricos con el uso de una regla de probabilidades, donde se comprueba la similitud de los datos de caudales máximos estimados entre el modelo lluvia-escorrentía y los registrados en campo por las estaciones, a razón de realizar un correcto análisis estadístico. La regla es la siguiente:

- El valor más probable del periodo de retorno del caudal de orden i es n/i , siendo n el número de años de datos.*
- El valor más probable Q del caudal orden j es la media progresiva de los valores de los caudales Q_i colocados en orden decreciente.*

$$Q_j = \frac{1}{j} * \sum_{i=1}^j Q_i \quad \text{para } j = 1, 2, 3, \dots, n$$

- Existe entre los caudales y los periodos de retorno más probables la siguiente relación que permite la extrapolación:*

$$r_j = \frac{Q_j}{Q_{med}} = a + b * \log T = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (z_i)$$

$$\text{siendo } z_i = \frac{Q_i}{Q_{med}} \quad \text{para } j = 1, 2, 3, \dots, n$$

En donde:

Q_{med} : media de los caudales de las crecientes consideradas

a y b: constantes que se determinan con los datos de caudal históricos.

Por medio de las parejas de puntos (r_j , $\log T$), se puede determinar a través de un análisis de mínimos cuadrados, los valores a y b de la línea que mejor ajusta los puntos. Dichos valores se utilizan en la ecuación que permite extrapolar para determinar los caudales Q con un determinado periodo de retorno T:

$$Q = Q_{med} * (a + b * \log T)$$

9.2.11 Transposición de caudales.

Se aplicó el método de transposición de caudales, recomendado por INVÍAS (2009), para estaciones que no se encuentran situadas en el punto de desembocadura de la cuenca (caudal de salida); esta ecuación permite estimar el caudal en el punto de interés teniendo en cuenta el caudal de la estación hidrológica más cercana y la relación entre el área de la cuenca de estudio y el área que representa la estación respectiva. La ecuación se conforma de la siguiente manera:

$$Q_{sp} = Q_{eh} \times \left(\frac{A_{sp}}{A_{eh}} \right)^x$$

Donde:

Q_{sp} : Caudal en el sitio de proyecto, en metros cúbicos por segundo (m^3/s).

Q_{eh} : Caudal en la estación hidrométrica, en metros cúbicos por segundo (m^3/s).

A_{sp} : Área hoya hidrográfica hasta el sitio de proyecto, en kilómetros cuadrados (km^2).

A_{eh} : Área hoya hidrográfica hasta la estación hidrométrica, en kilómetros cuadrados (km^2).

El exponente x es un valor que fluctúa usualmente entre 0.5 y 0.75 y se selecciona dependiendo de la cantidad de datos disponibles en la investigación.

9.2.12 Evaluación de la calibración de los caudales estimados

Finalmente, con el objetivo minimizar la diferencia entre los datos simulados y los datos observados, se tuvo en cuenta un “criterio de exactitud”, el cual se apoya en la cuantificación de

la bondad de ajuste del modelo. Para ese fin, se utilizó dos de las diferentes medidas de bondad de ajuste: Criterio de Schultz y RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio). Para ello se trabajó con los caudales máximos registrados en un periodo de 10 años (1999-2009) en la estación Bajo Nare.

El Criterio de Schultz (D) representa la desviación de los caudales simulados respecto de los observados. Se calcula como:

$$D = 200 \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{sim,i} - Q_i| Q_i}{n(Q_{max})^2}$$

Donde Q_{max} es la descarga máxima observada en el período de estudio.

El resultado es un valor adimensional que determina el nivel de ajuste que tiene el modelo con respecto a los valores observados.

Tabla 8.

Valores referenciales del criterio de Schultz.

D	Ajuste
0 – 3	Muy bueno
3 – 10	Bueno
10 – 18	Suficiente
>18	Insuficiente

Nota: Tomado de Molnar (2011).

El RMSE permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. Se calcula de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sm} - Q_i)^2}{n}}$$

El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito (positivo). El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste.

9.3 Fase 3: Representación de resultados

La representación de los resultados del presente trabajo está basada principalmente en los caudales máximos e hidrogramas obtenidos a partir del modelo lluvia-escorrentía. Sin embargo, con el fin

de complementar el análisis comparativo de los caudales, se implementaron resultados metodológicos, tales como tablas, gráficos de barra, gráficos lineales, cartografía digital, curvas IDF, hietogramas, entre otros, productos del procesamiento de herramientas de análisis de datos estadísticos y de software SIG. En la Tabla 9 se puede observar las herramientas utilizadas para el procesamiento de los resultados.

Tabla 9.
Resultados obtenidos a partir del procesamiento de la información

Herramienta	Tipo de resultado
Sistema de información geográfica	• Tablas • Cartografía digital
Modelo lluvia-escorrentía	• Curvas IDF • Hietograma de diseño • Hidrograma Unitario Sintético
Programa estadístico informático	• Tablas • Gráficos

Nota: por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

9.4 Fase 4: Recomendaciones

Las recomendaciones fueron basadas en el aprovechamiento del recurso hídrico, enfocado hacia dos actividades que predominan en la zona consumidora sobre la cuenca media y baja del río Guayuriba: la minería de extracción de material de arrastre y la producción de palma de aceite. Para ello, se tuvo en cuenta dos factores asociados al comportamiento de los caudales: la dinámica fluvial y el consumo hídrico (Figura 10).

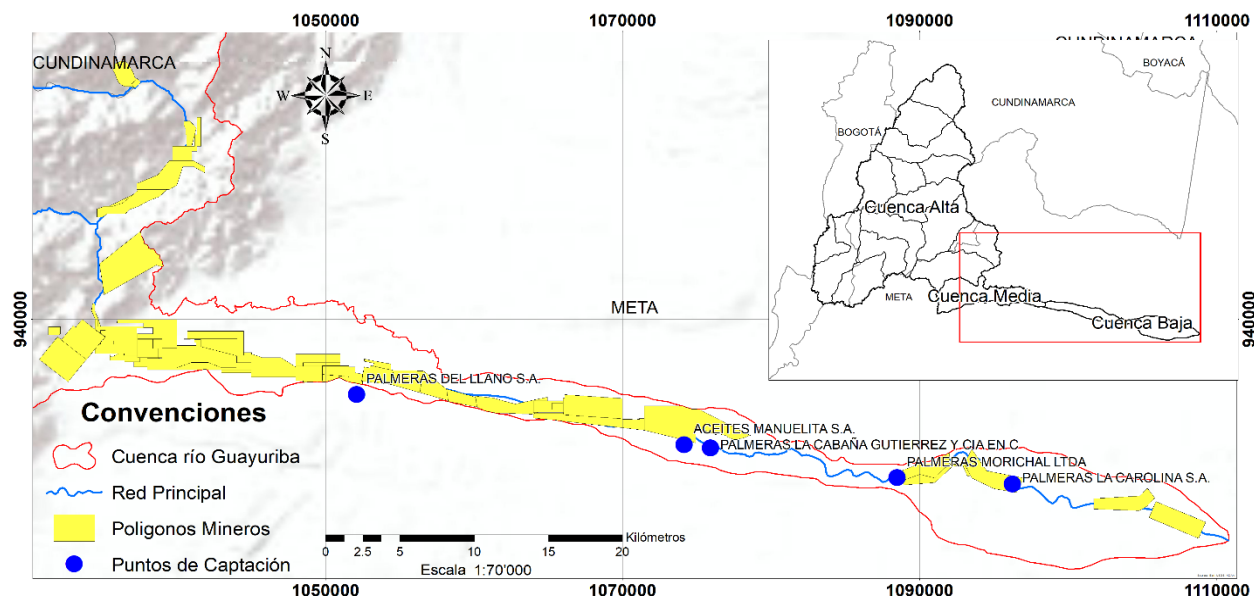


Figura 10. Puntos de captación para producción de aceite de palma y polígonos mineros, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

9.4.1 Caudal y Consumo hídrico

Se tuvo en cuenta la información obtenida a través de la autoridad ambiental Cormacarena, en la que se menciona una descripción de los puntos de captación registrados en la cuenca del río Guayuriba (ubicación, usuarios, uso, caudal, entre otros) (Cormacarena, 2009). A partir de esto se identificaron los puntos de captación pertenecientes a las empresas productoras de palma de aceite.

Tabla 10.

Consumo hídrico por producción de aceite de palma en la cuenca Guayuriba.

Empresa	Uso	Ubicación		Q Total (L/S)
		Y	X	
Aceites Manuelita S.A.	Riego	1074137	931321	1954
Palmeras del Llano S.A.	Riego	1052116	934800	500
Palmeras La Carolina S.A.	Riego	1096235	928594	300
Palmeras Morichal Ltda.	Riego	1088481	929030	300
Palmeras La Cabaña Gutierrez Y Cia En C.	Riego	1075920	931081	600

Nota: Adaptado de Cormacarena (2018), por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas

9.4.2 Dinámica fluvial

Las cuencas hidrográficas constituyen áreas bien delimitadas de acuerdo a su geomorfología y la dinámica fluvial, en las que, además, existe una relación con las actividades económicas que allí se puedan desarrollar. Por lo tanto, en la cuenca del río Guayuriba fue necesario identificar aquellos puntos de confluencia entre la dinámica fluvial y la minería de extracción de material de arrastre como la mayor actividad económica presente en la cuenca.

Para ello, previamente se obtuvo información de todos los polígonos mineros concesionados por Cormacarena (2009) donde la mayor parte fueron ubicados en la cuenca media y baja (ver Figura 10). Finalmente, se definió la zona de confluencia y se recopiló una serie de imágenes representativas a la dinámica fluvial que ha tenido la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba en los últimos 10 años.

10 Resultados y análisis.

10.1 Variables de entrada del modelo lluvia escorrentía

10.1.1 Variables morfométricas

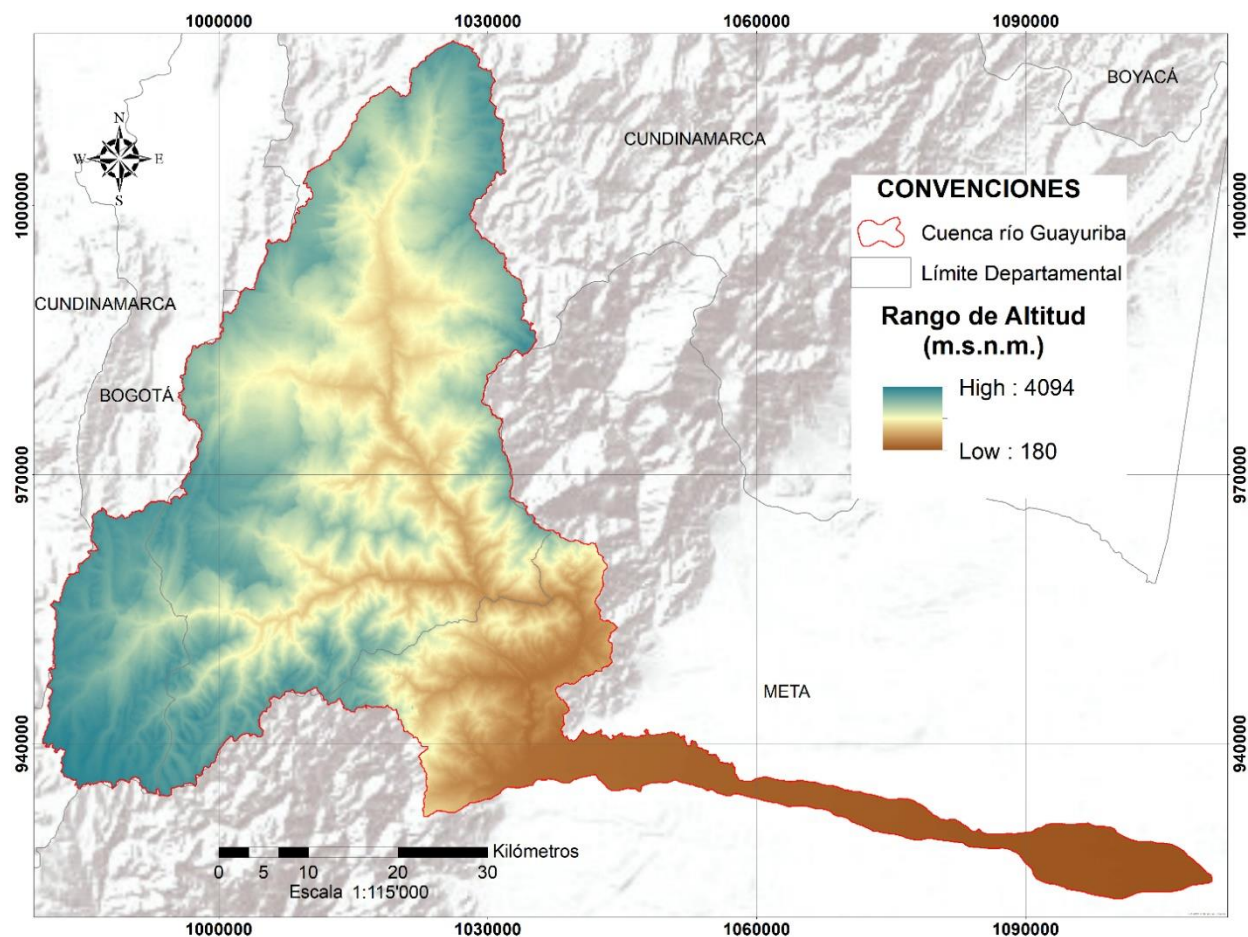


Figura 11. Modelo digital de elevación de la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba. Adaptado del USGS (2014), por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

A través de la delimitación y extracción del modelo digital de la cuenca y su red de drenajes, se cuantificaron los parámetros morfométricos relacionados con las características fisiográficas de la cuenca en general; como área, elevación, pendiente, etc. Dado que la cuenca es grande y tiene una superficie de 3260 km^2 , se subdividió en 17 subcuencas con el fin de lograr una mayor precisión en sus características morfométricas, las cuales permitieron inferir sobre su comportamiento

hidrológico. De esta forma, fueron utilizadas como variables de entrada para el modelo lluvia escorrentía.

La cuenca del río Guayuriba tiene una cota máxima de 4094 m.s.n.m. y mínima de 180 m.s.n.m. (Figura 11), en esta se presentan ecosistemas propios de alta montaña ecuatorial, dividido en zonas de superárreamos, páramo medio, páramo bajo, zona de transición de paramo a bosque, que desempeñan un papel esencial en la regulación hídrica y la provisión de servicios ecosistémicos (Robert Hofstede, 2014); además, consta de una zona de bosque sobre el piedemonte llanero caracterizada por tener valles aluviales con bosques de galería (Cormacarena, 2009).

Por otra parte, la forma de la cuenca es muy singular sobre todo porque la parte Alta de la cuenca es ensanchada, lo que podría reflejar una mayor incidencia en generar caudales máximos en poco tiempo. Por el contrario, la parte media y baja de la cuenca es alargada donde el tiempo de concentración podría ser mayor, generando caudales menos súbitos. En la Tabla 11 se puede observar algunos parámetros de la cuenca, en donde, existe una relación entre la morfometría con el hidrograma de caudal para los eventos de precipitación.

En cuanto a la pendiente del cauce principal determinada con la ecuación establecida en el Apéndice B, presenta un cauce con un relieve llano. No obstante, se calculó la pendiente promedio del cauce principal de todas las subcuencas, resultando una pendiente de 3.68 %, indicando un relieve ligeramente mayor con respecto a la del cauce principal, debido a que la mayoría de las subcuencas se encuentran en zona montañosa. Sin embargo, es importante resaltar que la pendiente del cauce principal no representa todo el relieve de la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba.

Tabla 11.

Parámetros morfométricos de la cuenca del río Guayuriba.

Parámetro	Unidad	Valor
Área de drenaje de la cuenca (A)	km ²	3260.06
Perímetro de la cuenca (P)	km	523.33
Longitud del Cauce Principal (L)	km	202.22
Altura máx. del cauce principal	m.s.n.m.	3658.60
Altura min del cauce principal	m.s.n.m.	193.00
Pendiente del cauce principal (Sc)	%	1.71

Nota: por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

En la Tabla 12, se observa los parámetros morfométricos de cada subcuenca. Con respecto al área, la cuenca Blanco-Negro-Guayuriba cuenta con 17 subcuencas cuya distribución es relativamente proporcional, presentando un rango entre 88.85 y 250.52 km². También se presentan las longitudes del cauce principal por subcuenca entre 3.9 hasta 61.06 km a una altitud entre 193 y 3770 m.s.n.m., así mismo se tiene pendientes entre 8.8 % y 0.26 %, que de acuerdo con Jarrett (1990) esto se asocia con ríos de montaña, ya que su valor es superior a 0.2 %, lo que demuestra el condicionamiento del sistema montañoso de la cordillera Oriental.

Con respecto a la cuenca alta, el río Blanco-Negro-Guayuriba comprende una superficie de 2814 km² con una elevación entre 589 hasta 3770 m.s.n.m., su pendiente oscila entre 0.8 y 8.8 %; un caso particular es la subcuenca 8, dado que la relación entre el área (250.52 km²) con la longitud de su cauce (3.9 km), podría representar caudales con velocidades importantes en un tiempo relativamente corto. Igualmente, la subcuenca 9 posee la elevación y longitud del cauce mayor de la cuenca alta y la tercera con una pendiente de 6.73 %, después de la subcuenca 1 (8.16 %), y la subcuenca 6 (8.81 %) lo que se asocia según Heras (1976) a un relieve accidentado medio. Por lo tanto, se pueden desatacar fenómenos erosivos, de desprendimiento y de abrasión, de acuerdo al material rocoso y el tipo de suelo; estos suelen presentar sedimentos más gruesos.

Por otra parte, la cuenca media comprende la subcuenca 16 con un área predominante de 238 km², luego de la subcuenca 8 (258.52 km²) y 3 (248.63 km²); posee un cauce de 30.48 km de longitud a una elevación a partir de los 353 hasta 589 m.s.n.m. y una pendiente de 0.78%, ligeramente ondulado a plano, se destaca porque presenta un relieve de piedemonte. Finalmente, la cuenca baja tiene una extensión de 208 km² en cuya área se encuentra la subcuenca 17, con el cauce con mayor longitud de toda la cuenca, de 61.06 km en una altitud entre 193 hasta 353 msnm, desplazándose en un relieve plano y una pendiente de 0.26 % sobre la llanura aluvial.

Tabla 12.

Parámetros morfométricos por subcuenca de la cuenca del río Guayuriba.

Subcuencas Río Blanco-Negro-Guayuriba	Área de drenaje de la cuenca (A)	Perímetro de la cuenca (P)	L. Cauce Principal (L)	Altura máx. del cauce principal	Altura mín. del cauce principal	Pendiente
	km ²	km	km	msnm	msnm	%
Subcca 1 (Alta Rio Blanco)	199.68	68.74	19.11	3658.6	2100	8.16
Subcca 2 (Media Rio Blanco)	200.75	66.14	16.69	2100	1553	3.28
Subcca 3 (Rio Negro)	248.63	105.32	5.01	1553	1492	1.22
Subcca 4 (Qda. Negra)	116.70	53.92	9.15	1942	1421	5.69
Subcca 5(Rio Cáqueza)	105.66	48.65	15.84	1886	1421	2.94
Subcca 6 (Rio Une)	191.93	70.94	14.23	3138	1885	8.81
Subcca 7 (Santa Rosa)	88.85	55.61	19.03	3763	2539	6.43
Subcca 8 (Alta Qda. Los Medios)	250.52	108.70	3.99	2540	2338	5.06
Subcca 9 (Rio Gallo)	191.15	73.47	29.38	3770	1792	6.73
Subcca 10 (Media Qda. Los Medios)	165.69	73.69	20.81	2344	1499	4.06
Subcca 11 (Baja Rio Blanco)	230.00	77.86	12.87	1313	1083	1.79
Subcca 12 (Rio Taguate)	204.33	92.92	7.05	1499	1245	3.60
Subcca 13 (Rio Saname)	237.36	94.34	11.53	1421	1313	0.94
Subcca 14 (Alta Rio Guayuriba)	225.98	82.17	12.39	687.3	589	0.79
Subcca 15 (Baja Rio Negro)	156.27	63.56	18.81	1083	687.3	2.10
Subcca 16 (Media Rio Guayuriba)	238.41	111.04	30.48	589	352.6	0.78
Subcca 17 (Baja Rio Guayuriba)	207.85	114.18	61.06	352.6	193	0.26

Nota: La descripción del cálculo de las variables se encuentra en el Apéndice B. Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

10.1.2 Numero de Curva de Escorrentía CN

De acuerdo a las características de cobertura de la Tabla 6 se obtiene una representación cartográfica de la clasificación de cobertura de la tierra en la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba (Figura 12), donde se observa una mayor distribución de la cobertura del suelo en la cuenca alta en contraste la cuenca media-baja.

Se identifica en la cuenca alta suelos con cobertura predominante de pastos naturales, rastrojos, matorrales, relictos, bosques naturales y fragmentados mayores a 500 km², en comparación con las clasificaciones asociadas a los cultivos. Esto se debe a que gran parte de la cuenca alta está destinada como áreas de protección, reservas forestales y parques nacionales naturales, enmarcando objetivos de conservación del agua, especies y ecosistemas únicos en el territorio. Igualmente, el tipo de cobertura en la cuenca alta está asociada a la descripción mencionada en el POMCH (Cormacarena, 2009), como una “zona productora” de gran cantidad de aportantes hídricos. Por otra parte, en la cuenca media y baja se observa una alta predominancia de agricultura intensiva y semi-intensiva (mayor a 200 km²), con cultivos como arroz, soya, maíz y palma, puesto que la ubicación de la cuenca media-baja es identificada como la “zona consumidora” del recurso hídrico de la cuenca (Cormacarena, 2009), por su alta productividad de alimentos y biocombustibles.

Posteriormente, En la Tabla 13 se estableció para la determinación del CN el tipo y uso de suelo con las descripciones geomorfológicas, geológicas y climatológicas del POMCH de las cuencas alta, media y baja del río Blanco-Negro-Guayuriba (Cormacarena, 2009). No obstante, en la cobertura Cultivos (Cu), se considera en la cuenca alta un tipo suelo C dado que se presentan terrenos ondulados a fuertemente escarpado; su material parental consiste principalmente en areniscas, arcillas y lutitas con presencia de material rocoso expuesto; por otro lado en la cuenca media y baja se considera de tipo D, debido a que se encuentra material parental de areniscas y conglomerado no consolidados, por lo que son suelos que han sido afectados por erosión, alta acidez y baja fertilidad (Cormacarena, 2009).

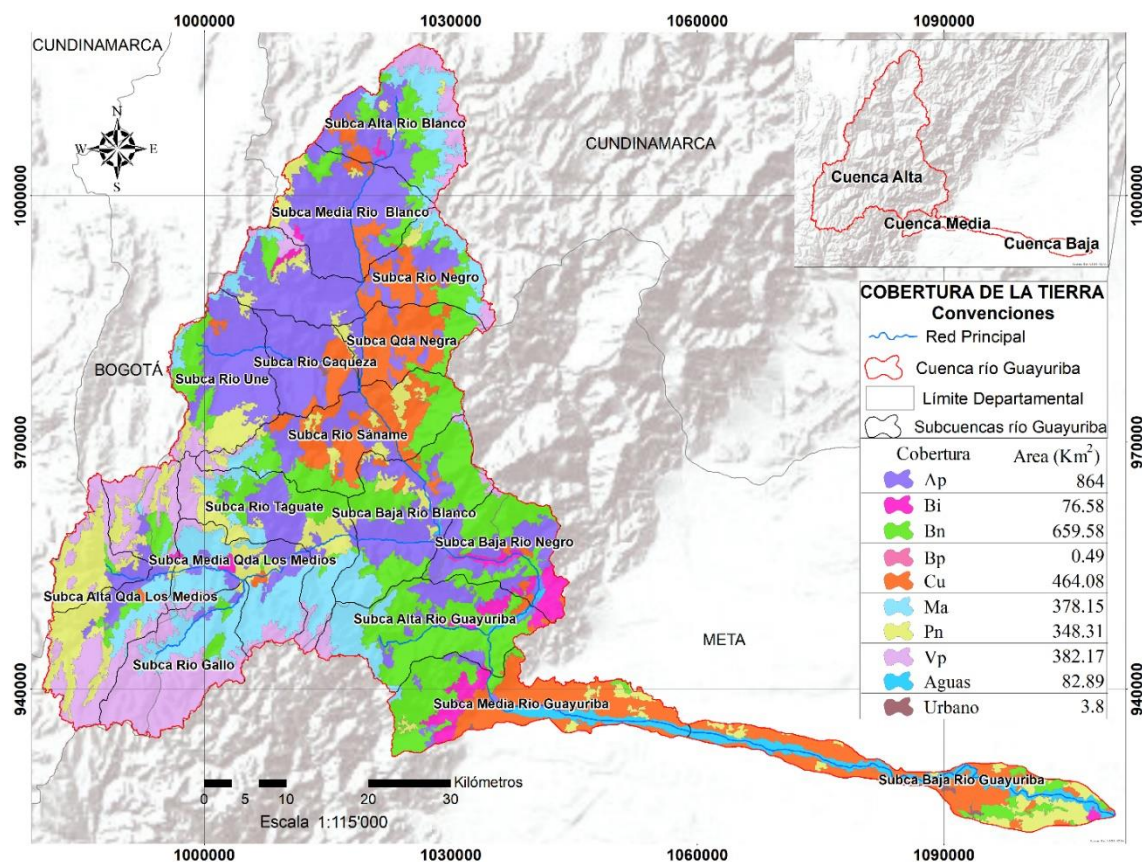


Figura 12. Clasificación de la cobertura del suelo en la cuenca del río Guayuriba, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Tabla 13.

Determinación de la Curva Número (CN).

Tipo	Símbolos	Grupo de suelos			Condición hidrológica
		B	C	D	
		Cuenca Alta	Cuenca Media	Cuenca Baja	
Pastos	Ap	79	86	89	Mala
Bosques	Bi	66	77	83	Mala
	Bn	60	73	79	Regular
	Bp	60	73	79	Regular
Cultivos	Cu	85	89	89	Buena, CDD*
Herbáceas,	Ma	77	85	89	Mala
Leguminosas y/o arbustiva	Pn	72	81	85	Buena
	Vp	72	81	85	Buena
Urbano	Urbano	85	90	92	Residencial
Vegas de Aguas	Aguas	78	78	78	D

Nota. B = moderadamente bajo potencial de escorrentía, C = moderadamente alto potencial de escorrentía, D = alto potencial de escorrentía. El rango de los valores de CN varían entre 0 y 100, donde 0 es una superficie sin escurrimiento y 100 es una superficie impermeable. Para la determinación de los valores de CN se utilizaron los cuadros 4.4 y 4.5

del libro hidrología en la ingeniería (Monsalve, 1999) y la tabla 5.5.2 del libro de hidrología aplicada (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Adaptado de Monsalve (1999) y Chow (1994), por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

De acuerdo a los valores de CN establecidos en la Tabla 13, se pudo determinar el CN total teniendo en cuenta el área y el porcentaje de cobertura sobre cada subcuenca (Ver Tabla 14).

Tabla 14.
Estimación de CN por subcuencas.

Estimación de CN por subcuencas.											CN
Subcuencas	Porcentaje de cobertura por subcuenca (%)										Total
río											
Guayuriba	Ap	Bi	Bn	Bp	Cu	Ma	Pn	Vp	Urbano	Aguas	
Subcca 1	28.80	0.85	19.65	0.11	5.93	24.22	2.08	18.35			74
Subcca 2	70.91	0.75	9.86	0.12	7.66	1.85	6.97	1.88			77
Subcca 3	45.90	1.17	11.96		15.96	13.75	5.72	5.54			76
Subcca 4	15.88		17.76		61.53	0.31	3.36	1.16			79
Subcca 5	75.75				21.83		1.36		1.07		80
Subcca 6	55.08		17.21		1.44	3.55	16.45	6.27			74
Subcca 7	11.68		2.65				59.77	25.90			72
Subcca 8	9.97	0.52	8.38		0.51	9.89	29.23	41.49			72
Subcca 9	2.24		4.38			29.18	0.59	63.61			73
Subcca 10	17.35	2.63	0.78		1.44	52.63	13.23	11.94			76
Subcca 11	36.32	0.04	42.13		3.95	10.19	5.29	1.52		0.55	71
Subcca 12	22.90		22.37			22.07	19.30	13.36			72
Subcca 13	18.10		26.92		37.66	3.73	10.44	3.16			75
Subcca 14	14.06	5.90	57.34		1.70	16.89		2.69		1.42	67
Subcca 15	40.74	16.83	37.44		3.24			0.63		1.13	70
Subcca 16	3.76	9.76	29.08		40.73	0.64	5.29		0.16	10.57	81
Subcca 17		0.89	9.78		44.06		19.43		1.10	24.74	85

Nota: por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Se puede observar que hay un rango de los valores CN entre 67 y 85, esto demuestra de forma general que en la cuenca hay poca capacidad de infiltración, lo que hace que, en gran parte de los eventos de una tormenta, el agua precipitada se convierta en escorrentía.

Sin embargo, se identifica que los valores CN son menores en la cuenca alta y media en comparación con la cuenca baja, esto es debido a que gran parte de la cobertura, al ser zonas de reserva y conservación de especies, exista una alta cantidad de suelos de tipo forestal, a diferencia de la cuenca baja, que gran parte de los suelos son de tipo agrícola. Esta diferencia se evidencia en la velocidad de infiltración en relación con la cantidad de materia orgánica de los suelos que soportan la vegetación natural, en donde el suelo forestal es muy superior a la que presentan los suelos agrícolas (Martínez de Azagra & Navarro Hevia, 1996).

10.1.3 Cambios porcentuales promedio de precipitación por subcuenca.

El cambio porcentual de precipitación promedio por subcuenca, se define como la sumatoria del promedio de cada rango del cambio porcentual de precipitación del multiescenario establecido por el IDEAM, por el área porcentual que representa cada uno sobre la subcuenca.

$$CPS = \sum \frac{CP * AP}{100}$$

Donde,

CPS: Cambio porcentual de precipitación promedio por subcuenca (%).

CP: Promedio de cada rango del cambio porcentual de precipitación (%).

AP: Área porcentual que representa el cambio porcentual de precipitación sobre la subcuenca (%).

El promedio de cada rango del cambio porcentual de precipitación se puede observar en la Tabla 71 del documento *Nuevos Escenarios de Cambio Climático 2011-2100* (IDEAM, 2015), clasificados de acuerdo al rango de cambio porcentual de precipitación perteneciente en cada período proyectado a nivel departamental.

Tabla 15.

Cambio porcentual de precipitación promedio por períodos de cambio climático.

Cambio Porcentual de Precipitación Promedio (%)			
Subcuencas Río Guayuriba	2011 - 2040	2041 - 2070	2071 - 2100
Subcca 1 (Alta Río Blanco)	11.80	4.68	1.85
Subcca 2 (Media Río Blanco)	0.02	1.00	0.00
Subcca 3 (Río Negro)	0.00	1.17	0.00
Subcca 4 (Qda. Negra)	1.38	2.52	0.00
Subcca 5(Río Cáqueza)	4.95	7.16	0.00
Subcca 6 (Río Une)	5.33	8.88	1.83
Subcca 7 (Santa Rosa)	15.00	15.00	6.24
Subcca 8 (Alta Qda. Los Medios)	11.80	11.81	0.43
Subcca 9 (Río Gallo)	0.32	1.10	0.00
Subcca 10 (Media Qda. Los Medios)	0.56	2.79	0.00
Subcca 11 (Baja Río Blanco)	-1.80	-1.09	-7.12
Subcca 12 (Río Taguate)	1.64	2.87	0.00
Subcca 13 (Río Sáname)	0.42	1.47	0.00
Subcca 14 (Alta Río Guayuriba)	-19.68	-16.26	-17.55
Subcca 15 (Baja Río Negro)	-31.58	-32.98	-31.29
Subcca 16 (Media Río Guayuriba)	-19.51	-17.02	-19.76
Subcca 17 (Baja Río Guayuriba)	-4.91	-5.33	-5.94

Nota: Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Se identifica que hay una relación entre los cambios porcentuales de precipitación con respecto a la ubicación de las subcuencas, donde las subcuencas que tienen cambios porcentuales negativos se encuentran emplazadas en las cuencas media y baja, y las subcuencas con cambios porcentuales positivos ocupan aproximadamente la totalidad de la cuenca alta.

Por otra parte, se puede observar que aproximadamente el 68% de la cuenca tiene proyecciones de cambio porcentuales positivos de precipitación. Desde esta perspectiva, se puede decir que estos valores tienen una representación sobre la cuenca. Sin embargo, la cantidad que estos valores figuran en cada subcuenca son poco significativas en relación con los cambios porcentuales negativos que están proyectados en un 32% de la cuenca, aproximadamente una tercera parte de la cuenca, donde el rango de disminución de la precipitación esta entre -1 y -33 %, si se tiene en cuenta las 3 períodos del multiescenario de cambio climático. Esto refleja que la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba tiene tendencia a que se vea disminuida la precipitación a pesar del área que representa su cambio porcentual en la misma; esto se evidencia calculando para cada proyección el promedio del cambio de precipitación porcentual de la totalidad de la cuenca según el área que representa cada subcuenca, donde el período 2011-2040 tiene un cambio porcentual promedio de -12 %, el período 2041-2070 de -8 %, y el período 2071-2100 de -27 %.

Cabe destacar que hay una singularidad en el comportamiento del cambio porcentual de la precipitación entre los períodos 2011-2040 y 2041-2070, en la que se presenta menos variación, con respecto a las demás proyecciones. Por lo tanto, debido a que es un cambio promedio de la totalidad de la cuenca, este comportamiento puede verse manifestado en los resultados de los caudales máximos del modelo lluvia escurrentía, la cual hay una influencia directa entre los eventos de precipitación y la escurrentía superficial (Aristizábal & Acevedo, 2009) (Ochoa & Poveda, 2008).

10.1.4 Pérdidas iniciales

Las pérdidas iniciales es una de las variables más importantes dado que existe una fracción de la lluvia total que no contribuye a la escurrentía superficial, por efectos tales como la infiltración, evapotranspiración, interceptación por la vegetación, o almacenamiento en depresiones de la superficie topográfica (Aroca & Bodoque, 2014). Por lo tanto, los resultados plasmados en la Tabla 16 tienen estrecha relación con los valores CN mencionados en la Tabla 13, donde los resultados

están sujetos a variables como la cobertura vegetal y tipo de suelo, la cual difieren entre la cuenca alta, media y baja.

Tabla 16.

Cuantificación de las pérdidas iniciales por subcuenca.

Subcuencas del río Guayuriba	CN	S(mm)	Pérdidas iniciales (mm)
Subcca 1 (Alta Rio Blanco)	74	91.23	18.25
Subcca 2 (Media Rio Blanco)	77	76.69	15.34
Subcca 3 (Rio Negro)	76	78.16	15.63
Subcca 4 (Qda. Negra)	79	67.54	13.51
Subcca 5(Rio Cáqueza)	80	62.40	12.48
Subcca 6 (Rio Une)	74	88.52	17.70
Subcca 7 (Santa Rosa)	72	96.35	19.27
Subcca 8 (Alta Qda. Los Medios)	72	97.69	19.54
Subcca 9 (Rio Gallo)	73	93.52	18.70
Subcca 10 (Media Qda. Los Medios)	76	81.17	16.23
Subcca 11 (Baja Rio Blanco)	71	106.08	21.22
Subcca 12 (Rio Táguate)	72	98.67	19.73
Subcca 13 (Rio Sáname)	75	84.13	16.83
Subcca 14 (Alta Rio Guayuriba)	67	125.68	25.14
Subcca 15 (Baja Rio Negro)	70	109.70	21.94
Subcca 16 (Media Rio Guayuriba)	81	57.84	11.57
Subcca 17 (Baja Rio Guayuriba)	85	46.58	9.32

Nota: S es la retención máxima potencial el cual se determina con el número de curva CN. La ecuación utilizada para el cálculo de S se encuentra en el Apéndice B. Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

10.1.5 Tiempo de concentración.

Se calcularon los tiempos de concentración con los métodos Kirpich y California Culverts con la finalidad de obtener el tiempo de retardo en cada subcuenca.

La cuenca cuenta un tiempo de concentración promedio de 173.70 minutos, puesto que gran parte de las subcuencas superan un tiempo de concentración promedio de 100 minutos. Sin embargo, existe un rango significativo entre estos valores, donde el menor tiempo se presenta en la subcuenca Alta Qda. Los Medios (Subcca 8) con un valor de 35.69 minutos, y el mayor se sitúa en la subcuenca Baja río Guayuriba (Subcca 17) con un valor de 912.73 minutos. Por otra parte, cabe destacar que estos valores son dependientes de la ubicación de cada subcuenca, debido a que el tiempo de concentración está directamente relacionada con la pendiente y la longitud del cauce, que a su misma vez dependen de las condiciones topográficas y morfológicas, lo que puede

representar diferentes comportamientos en la respuesta de la escorrentía superficial consecuentes de los eventos de precipitación.

Tabla 17.

Tiempo de concentración por subcuenca.

Subcuencas del río Guayuriba	Kirpich (min)	California Culverts Practice (min)	Tiempo concentración Promedio (min)	Tiempo de retardo (min)
Subcca 1	101.17	97.27	99.22	59.53
Subcca 2	129.48	124.50	126.99	76.19
Subcca 3	75.05	72.16	73.61	44.16
Subcca 4	65.90	63.36	64.63	38.78
Subcca 5	129.76	124.77	127.26	76.36
Subcca 6	78.28	75.26	76.77	46.06
Subcca 7	110.50	106.24	108.37	65.02
Subcca 8	36.39	34.99	35.69	21.41
Subcca 9	151.69	145.85	148.77	89.26
Subcca 10	141.31	135.87	138.59	83.15
Subcca 11	133.88	128.72	131.30	78.78
Subcca 12	64.30	61.82	63.06	37.84
Subcca 13	157.74	151.67	154.70	92.82
Subcca 14	177.73	170.89	174.31	104.59
Subcca 15	168.40	161.91	165.16	99.09
Subcca 16	358.58	344.77	351.68	211.01
Subcca 17	930.65	894.81	912.73	547.64

Nota: La ecuación utilizada para el cálculo del tiempo de concentración y tiempo de retardo se encuentra en el Apéndice B. Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Por otra parte, los resultados del Tlag mencionados en la Tabla 18 está directamente relacionado con el tiempo de concentración T_c , debido a que representa la diferencia de tiempo entre el centroide de hietograma de exceso de lluvia y el del hidrograma unitario (Upegui & Gutiérrez, 2010). El Tlag promedio de toda la cuenca es de 104.22 minutos (1.74 horas).

10.1.6 Tránsito entre tramos

Tanto el tiempo de concentración como el tiempo de retardo están gráficamente representados como las características hidrológicas que tienen cada tramo de las respectivas subcuencas. El tránsito entre tramos hace parte de los componentes del modelo de la cuenca denominado *Reach*, la cual, en este caso, se utilizó para determinar el comportamiento del agua superficial generada en algún punto de una subcuenca hacia aguas abajo, hasta el otro punto de la subcuenca. Por lo

tanto, se obtuvo un total de 15 tramos con las características mencionadas en la Tabla 18. Por otro lado, en la Figura 13 se observa gráficamente el conjunto de elementos que hicieron parte para la construcción del modelo hidrológico de la cuenca del río Guayuriba. Se utilizaron los elementos *Subbasin*, *Reach*, *Junction*, *Sink* y *Conect Downstream* para la representación física de la cuenca. Estos elementos describen los procesos físicos que se producen a través de modelos matemáticos (Nanía, 2007). Las descripciones se encuentran anexados en el Apéndice H.

Tabla 18.

Calculo del tiempo de retardo para el tránsito entre tramos.

Tramo entre subcuenca	Ls- (ft)	CN	Scs (%)	T lag tramo (min) ²
Tramo Subcca 1-2	54757.22	77	3.28	19.83
Tramo Subcca 2-3	16437.01	76	1.22	16.63
Tramo Subcca 3-4	30019.69	79	5.69	10.53
Tramo Subcca 6-5	51968.51	80	2.94	19.72
Tramo Subcca 7-8	13090.55	72	5.06	7.47
Tramo Subcca 8-10	31694.96	76	4.06	13.24
Tramo Subcca 9-10	36579.32	76	4.06	14.34
Tramo Subcca 13-11	42224.41	71	1.79	24.64
Tramo Subcca 12-11	35232.81	71	1.79	22.26
Tramo Subcca 10-12	23129.92	72	3.60	12.21
Tramo Subcca 4-13	37828.09	75	0.94	30.62
Tramo Subcca 15-14	40649.61	67	0.79	37.56
Tramo Subcca 11-15	61712.60	70	2.10	28.28
Tramo Subcca 14-16	100000.00	81	0.78	54.80
Tramo Subcca 16-17	200328.09	85	0.26	135.76

Nota: Ls=Longitud del cauce principal en la subcuenca en pies, Scs = Pendiente (%) del cauce principal por subcuenca, CN por subcuenca, Tlag tramo= Tiempo de retardo para el tránsito entre tramos. Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

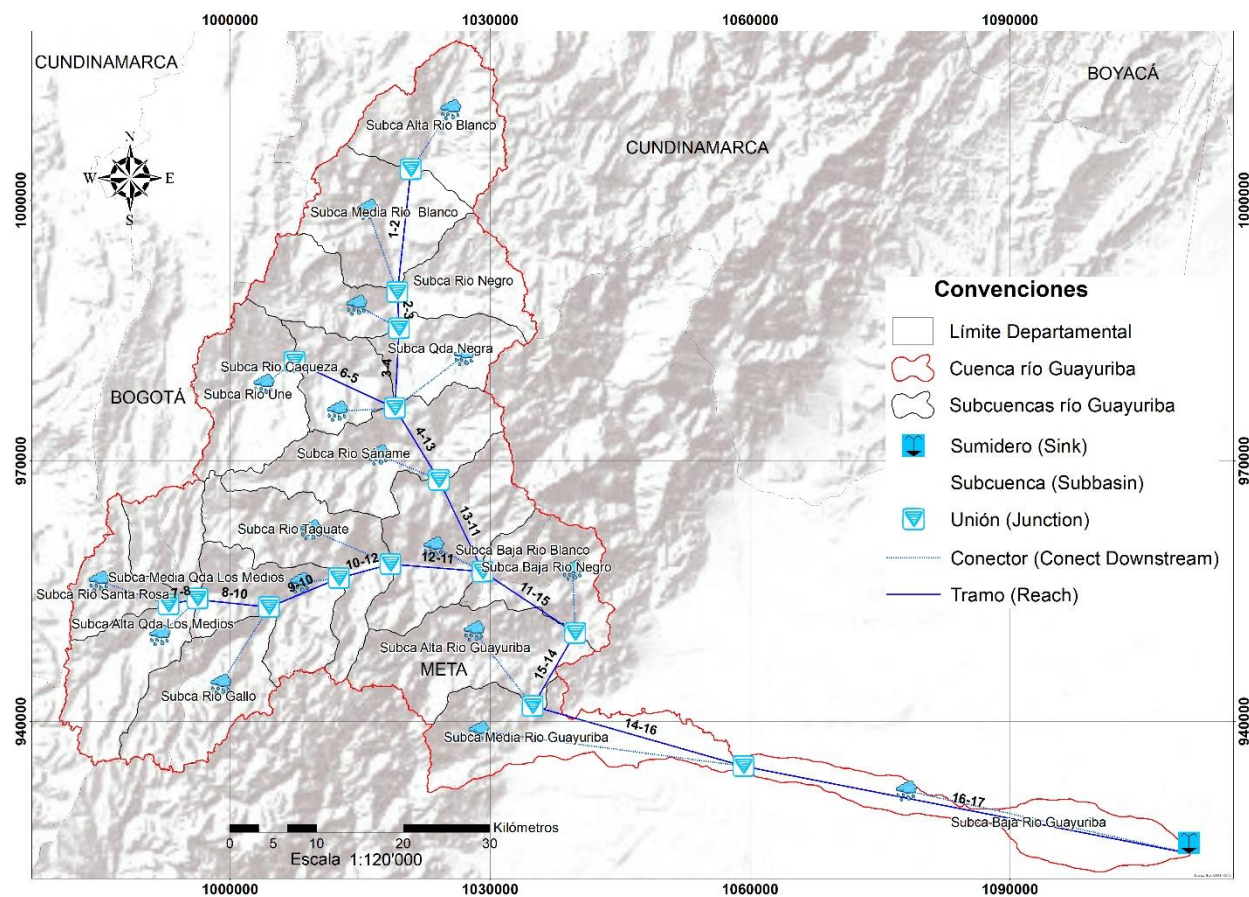


Figura 13. Representación del modelo lluvia-escorrentía en la cuenca del río Guayuriba, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

10.2 Curvas IDF

Es necesario conocer las relaciones entre cuatro características fundamentales de las lluvias intensas: intensidad, duración, frecuencia y distribución (Monsalve, 1999); las curvas IDF permiten analizar el comportamiento histórico de las precipitaciones en una zona influenciada e igualmente permite la estimación de volúmenes de drenaje a través de modelos lluvia-escorrentía (Vargas & Díaz Granados, 1998). Por lo tanto, se construyeron las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia, adicionando el coeficiente de variabilidad espacial, como valor que representa la distribución de la precipitación en la cuenca de río Guayuriba. En el conjunto de datos de la Tabla 19 se observa los resultados cuantificados en cada una de las estaciones representativas en la cuenca y en la Figura 14 se observa el diseño de las curvas IDF para cada estación.

Se identifica las precipitaciones con mayor intensidad máxima registrados en las estaciones Manzanares, Susumuco, Acacias y Nare, representando las subcuencas Baja Río Negro, Alta,

Media y Baja Río Guayuriba, con valores estimados entre 250 y 300 mm/h. Cercano a estos valores se registra en la estación Monterredondo, que presenta intensidades máximas entre 200 y 250 mm/h, la cual contribuye a las subcuencas Río Taguate, Río Saname y Baja Río Blanco; finalmente las estaciones Choachí, Australia y Nazareth, influentes en el restante de subcuencas, cuentan registros de intensidad máxima entre 110 y 150 mm/h, siendo los registros de menor intensidad máxima. Los rangos mencionados se sitúan para periodos de retorno de 50 y 100 años.

Todas las estaciones registran un comportamiento similar en la duración de la intensidad; se observa en un intervalo de media hora (10 a 40 minutos) disminuciones que pueden llegar hasta los 87 mm/h (estación Acacías), 20 minutos después (40 a 60 minutos) ronda por un promedio de 20 mm/h; a partir de hora y media (90 a 120 minutos), la intensidad disminuye hasta 10 mm/h con una variación en el tiempo poco significativa.

Los resultados de las curvas IDF en la cuenca del río Guayuriba tienen un comportamiento dependiente del tamaño y la ubicación entre los departamentos del Meta y Cundinamarca, delimitación que también coincide con las regiones Andina y Orinoquia. Por lo tanto, existen condiciones por factores climatológicos y geomorfológicos que contrasta una zona con la otra.

En referencia con el tamaño de la cuenca, la precipitación es una variable meteorológica susceptible a una variabilidad espacial que es directamente proporcional al área de la cuenca (Oster, 1979), es decir, a medida que la cuenca sea de mayor tamaño, la variabilidad espacial de la lluvia tenderá a ser heterogénea. Esto conlleva a que, a la hora de ingresar los datos de precipitación al modelo lluvia-escorrentía, no simule un proceso de conversión de precipitación-caudal bajo la suposición de un evento de tormenta uniforme en toda la cuenca, puesto que los procesos climáticos no se pueden considerar lineales, por lo tanto, los resultados no serían una representación de la realidad del comportamiento hidrológico de la cuenca.

En cuanto a la ubicación geográfica, la influencia de variables geomorfológicas y climatológicas son determinantes en los resultados de intensidad de la precipitación de la cuenca, tales como la altura, el ancho, la longitud, la distancia entre barreras sucesivas, dirección del viento, perfil vertical y estabilidad de la atmosfera, debido al gran tamaño de la cuenca (Jaramillo Á. , 2005; Cortés, 2010).

Tabla 19.

Valores de intensidad de precipitación (mm/h) por estación.

Est. Choachí		Periodo de retorno				
D(min)	2	5	10	25	50	100
20	45	53	60	71	80	91
40	28	33	38	45	51	57
60	22	26	29	34	39	44
80	18	21	24	28	32	36
100	15	18	21	24	28	31
120	14	16	18	22	25	28

Est. Australia		Periodo de retorno				
D(min)	2	5	10	25	50	100
20	41	48	55	64	73	83
40	26	31	35	41	46	52
60	20	23	26	31	35	40
80	16	19	22	26	29	33
100	14	17	19	22	25	29
120	13	15	17	20	22	25

Est. Nazareth		Periodo de retorno				
D(min)	2	5	10	25	50	100
20	42	50	56	66	75	85
40	27	31	35	42	47	54
60	20	24	27	32	36	41
80	17	20	22	26	30	34
100	15	17	19	23	26	29
120	13	15	17	20	23	26

Est. Monterredondo		Periodo de retorno				
D(min)	2	5	10	25	50	100
20	78	92	104	123	139	157
40	49	58	66	78	88	100
60	38	44	50	59	67	76
80	31	37	42	49	56	63
100	27	32	36	42	48	54
120	24	28	32	38	43	48

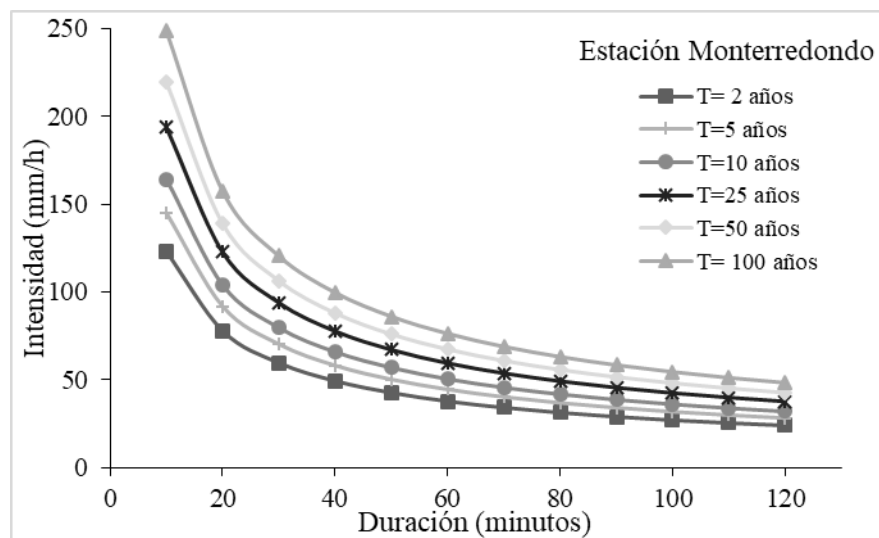
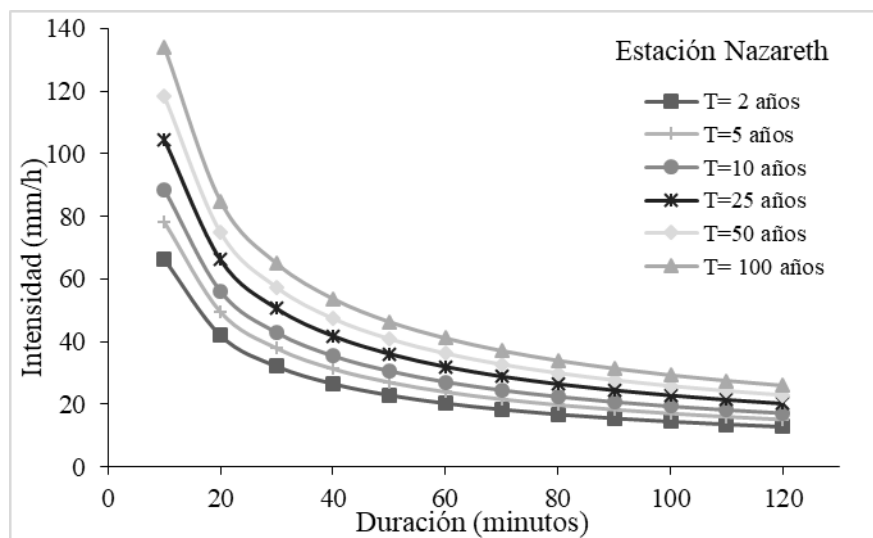
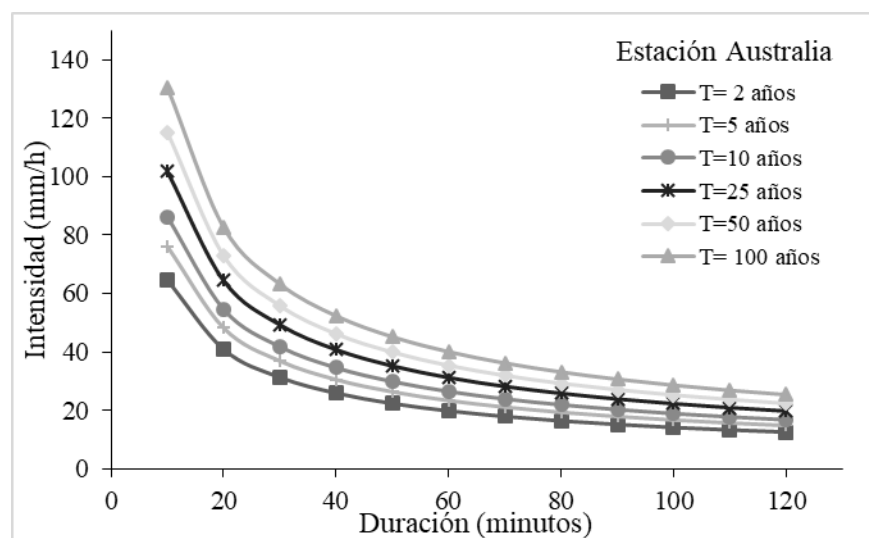
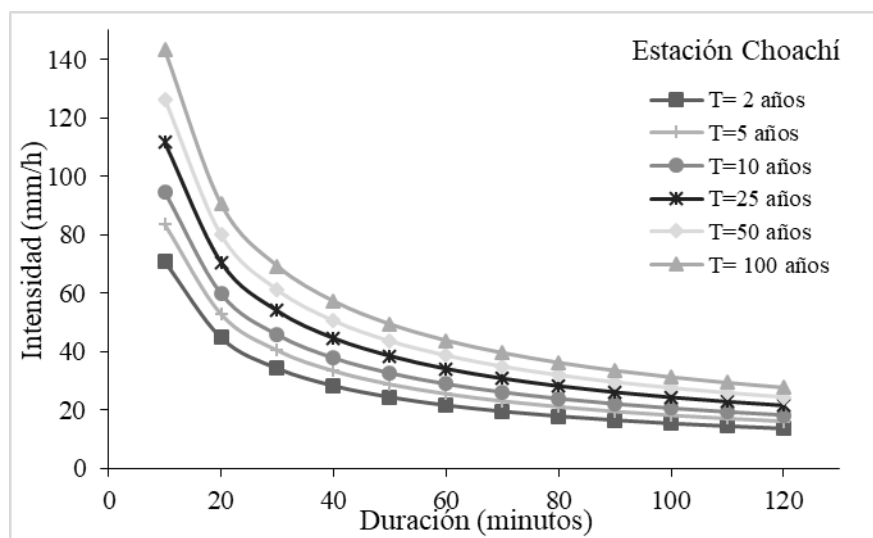
Est. Manzanares		Periodo de retorno				
D(min)	2	5	10	25	50	100
20	94	110	123	144	162	182
40	61	71	80	93	105	118
60	47	55	62	72	81	91
80	39	46	52	60	68	76
100	34	40	45	52	59	66
120	30	35	40	47	52	59

Est. Susumuco		Periodo de retorno				
D(min)	2	5	10	25	50	100
20	95	111	125	146	164	184
40	61	72	81	94	106	119
60	47	55	62	73	82	92
80	40	46	52	61	68	77
100	34	40	45	53	59	67
120	31	36	40	47	53	60

Est. Acacias		Periodo de retorno				
D(min)	2	5	10	25	50	100
20	96	112	126	148	166	187
40	62	73	82	95	107	121
60	48	56	63	74	83	94
80	40	47	53	62	69	78
100	35	41	46	54	60	68
120	31	36	41	48	54	60

Est. Nare		Periodo de retorno				
D (min)	2	5	10	25	50	100
20	91	106	120	140	157	177
40	59	69	77	90	102	114
60	46	53	60	70	79	89
80	38	44	50	58	66	74
100	33	39	43	51	57	64
120	29	34	39	45	51	57

Nota: D = duración. Los periodos de retorno son en años. Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.



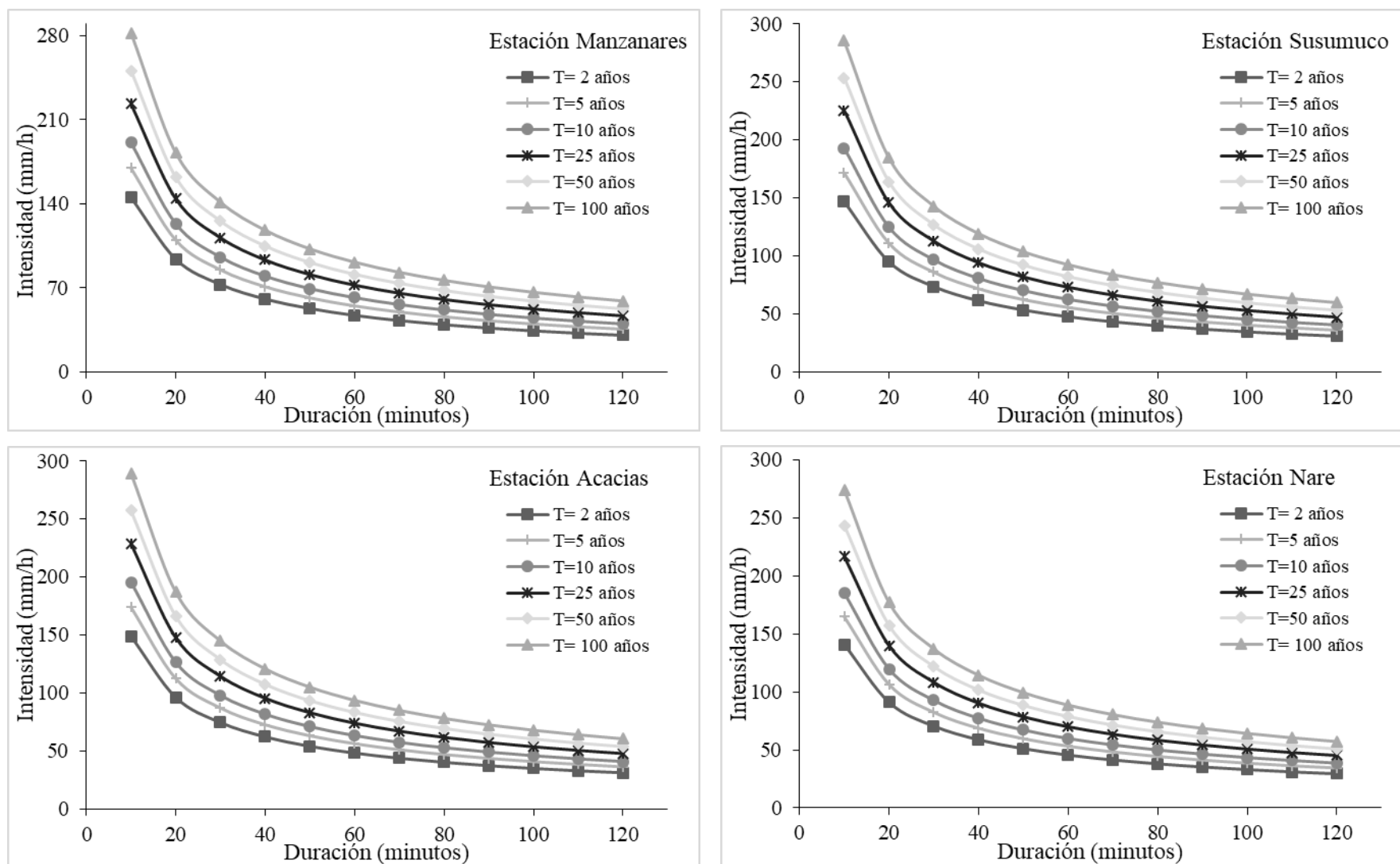


Figura 14. Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia por estación, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Un suceso particular que se presenta en la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba es la división regional, conformado por el sistema montañoso andino (Cundinamarca) que representa la cuenca alta, y las ligeras ondulaciones o llanuras orientales (Meta), que representa la cuenca baja del río Guayuriba. Asimismo, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), se define como “una franja donde se encuentran las corrientes de aire cálido y húmedo provenientes de los cinturones de alta presión situados en la zona subtropical de los hemisferios norte y sur. Este encuentro da origen a la formación de grandes masas de nubes y abundantes precipitaciones” (Jaramillo Á. , 2005). Eso podría explicar el aporte de precipitaciones por la influencia que tienen en el país los vientos alisios procedentes del noreste (NE) y del sureste (SE) (Jaramillo & Chaves, 2000). Sin embargo, pueden presentarse excepciones cuando la ZCIT se encuentra en la zona más sur de la vaguada, provocando períodos por debajo del promedio de precipitación, en la que a su misma vez puede verse influenciados por el ENSO.

Esto se puede ver reflejado en la ubicación de las estaciones y las subcuencas que estas mismas representa. Si se asocia estas condiciones, se pueden inferir en los resultados de intensidad a fenómenos como la lluvia orográfica, la cual es un resultante del choque perpendicular del aire en las barreras montañosas, que genera un ascenso forzado a las masas del aire, las cuales se expanden adiabáticamente. Esto genera una disminución de temperatura por realización de trabajo. En las masas de aire se presenta un proceso de condensación, convirtiéndose en líquido y generando así el proceso de precipitación (Whiteman, 2000). Este fenómeno se presenta frecuentemente y con gran intensidad en el piedemonte y parte de la zona montañosa de la cuenca, debido al cambio drástico en la transición de su relieve, por lo que podría explicar las intensidades máximas registradas por las estaciones Manzanares, Susumuco y Acacías. De igual forma se explicaría las bajas intensidades en las estaciones ubicadas en los máximos de la cuenca alta, debido a que en esa zona las alturas son superiores a 2000 m.s.n.m. puesto que a partir de los 1500 m.s.n.m. la lluvia comienza a disminuir con la altura. (Jaramillo A. , 2005).

Por lo tanto, el tamaño y la ubicación de la cuenca entre dos regiones son fundamentales en la intensidad y distribución espacial de la lluvia en la cuenca del río Guayuriba, debido a que enmarca una diferencia significativa en componentes geomorfológicos y climatológicos, donde implícitamente ya se tienen en cuenta y se reflejan en los coeficientes de variación de los ajustes

de regresión en las ecuaciones para la identificación de curvas IDF del método simplificado de Vargas (Vargas & Díaz Granados, 1998).

10.3 Hietogramas

Para los modelos lluvia-escorrentía es necesario calcular los hietogramas de precipitación en intervalos de tiempo congruentes con la duración de la lluvia efectiva del hidrograma de escorrentía superficial seleccionado (INVÍAS, 2009). Por ello, se crearon las tormentas en los diferentes períodos de retorno en la cuenca del río Guayuriba, aplicando el método del bloque alterno para cada estación. Se observa en la Figura 15 el hietograma de la estación Acacias, y sus respectivos valores en la Tabla 20, representando los valores de mayor precipitación en la cuenca del río Guayuriba. Los hietogramas de las demás estaciones se encuentran en el Apéndice I.

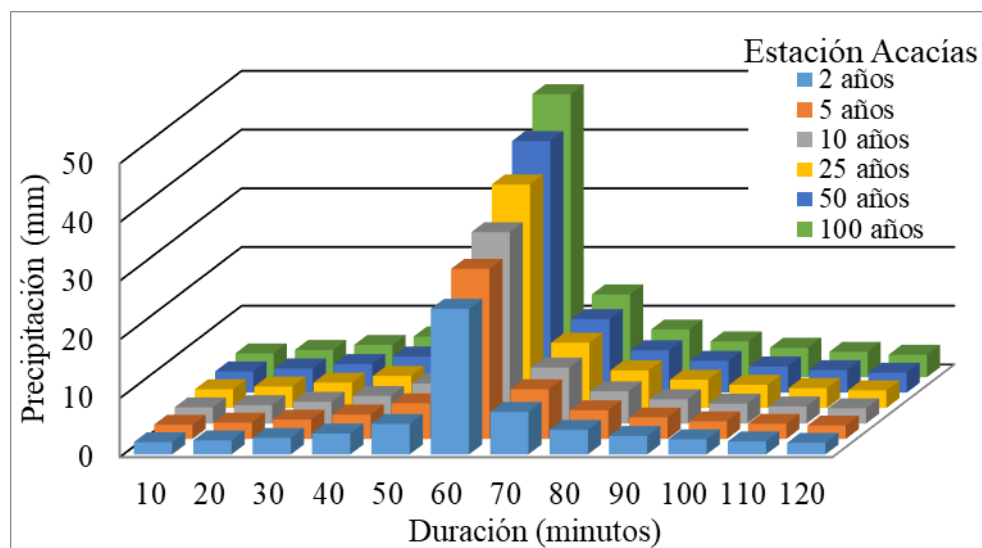


Figura 15. Hietograma de precipitación por período de retorno con duración de 2 horas, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Los hietogramas de cada estación mostraron resultados con diferencias en la cantidad de agua precipitada, donde sus valores explican también la relación de la precipitación con la ubicación de las estaciones sobre la cuenca (mencionado anteriormente en análisis de curvas IDF) debido a que si se relaciona la precipitación máxima del hietograma con respecto a la ubicación de cada estación, se puede distinguir un aumento progresivo de la precipitación de cuenca alta a cuenca baja.

Tabla 20.

Precipitaciones de diseño por período de retorno con duración de 2 horas.

Duración (min)	Período de retorno					
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
10	2.1	2.4	2.7	3.2	3.6	4.1
20	2.4	2.8	3.1	3.7	4.1	4.6
30	2.8	3.3	3.7	4.3	4.9	5.5
40	3.6	4.2	4.7	5.5	6.2	6.9
50	5.2	6.1	6.8	8.0	9.0	10.1
60	24.8	29.0	32.6	38.1	42.8	48.2
70	7.2	8.5	9.5	11.1	12.5	14.1
80	4.2	4.9	5.5	6.4	7.2	8.1
90	3.1	3.7	4.1	4.8	5.4	6.1
100	2.6	3.0	3.4	4.0	4.5	5.0
110	2.2	2.6	2.9	3.4	3.8	4.3
120	2.0	2.3	2.6	3.0	3.4	3.8

Nota: Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Por otro lado, en los resultados se identificaron una semejanza en las estructuras de los hietogramas, que se traduce al comportamiento de la lluvia en función del tiempo, a razón de que se observa un aumento visible justo en la hora de haber iniciado la tormenta (60 minutos), con valores cercano a los 20 mm para las estaciones Choachí, Australia y Nazareth; y cercano a los 40 mm para las estaciones Nare, Acacías, Susumuco, Manzanares y Monterredondo (período de retorno de 50 años), haciendo un alto contraste con los demás valores de precipitación registrados antes y después del valor pico de la tormenta (10 - 50 y 70 - 120 minutos), donde se proyectan valores que oscilan entre 1 y 5 mm en todas las estaciones.

Estos valores pueden indicar un resultante de caudales máximos de alta variabilidad, independientemente del emplazamiento de las subcuencas del río Guayuriba, sin embargo, es una afirmación vertiginosa puesto que ante el proceso de lluvia-escorrentía interviene la vegetación, el tipo de suelo de la zona y la pendiente (Aroca & Bodoque, 2014).

Siguiendo el ejemplo en el hietograma de la estación Acacías (Figura 15), el valor máximo que se refleja es el resultante de una intensidad máxima de 257 mm/h ($Tr = 50$ años) (ver curva IDF de la estación en la Figura 14), que puede corresponder a un tipo de lluvia torrencial, aunque de corta duración, debido a que el aumento excesivo solo se presenta a los 60 minutos de la

tormenta. Esto es debido a que en la región donde se sitúa la estación Acacías, junto a Nare y Manzanares (Orinoquia) comprende de precipitaciones con estacionalidad de carácter monomodal, donde existe una época de lluvias de abril a noviembre y una época seca de diciembre a abril, la cual concuerda con la ubicación de la ZCIT (Guzmán, Ruíz, & Cadena, 2014).

En definitiva, los hietogramas son clave para determinar la cantidad de agua precipitada sobre la cuenca, sin embargo, no se puede representar el comportamiento real de los caudales si no se tiene en cuenta variables que puedan intervenir en la transformación de la lluvia en escorrentía.

10.4 Caudales e Hidrogramas

10.4.1 Modelo lluvia escorrentía

Se obtiene los hidrogramas de caudal estimados en las proyecciones establecidas por período de retorno (Apéndice G) y presenta el hidrograma mostrando de manera gráfica la variación del caudal (m^3/s) con respecto al tiempo (hora). Los análisis a continuación hacen énfasis a los hidrogramas generados por el modelo lluvia-escorrentía para períodos de retorno de 50 años, puesto que es el período de ocurrencia que más coincide con los caudales máximos reales de la cuenca. Igualmente, los períodos de retorno menores usualmente están orientados para el diseño de obras de ingeniería (puentes, represas, vías, etc), la cual requieren períodos relativamente cortos para considerar parámetros relacionados con la vida útil de las estructuras y riesgo de fallas admisibles (MTC, 2011). Por lo tanto, difiere con el enfoque del trabajo, el cual está dirigido hacia actividades económicas coligadas en el consumo hídrico y la dinámica fluvial en amplias proyecciones de cambio climático, permitiendo considerar períodos de retorno prolongados.

Se realizó la simulación de la precipitación en un tiempo de 32 horas (8:00 am a 4 pm del siguiente día). Parte de la precipitación que relacionada con el CN, es interceptada por la vegetación e infiltrada en el suelo. Luego, en el momento en que se excede la capacidad de infiltración se produce la escorrentia superficial suficiente, para alcanzar un caudal pico (máximo) hasta su descenso, con un intervalo de 10 min.

La línea roja es el caudal resultante hasta la penúltima subcuenca, específicamente sobre el tramo 16-17 (Figura 16); la línea azul es el caudal de salida y la gris es el caudal generado por la subcuenca Baja del río Guayuriba (subcuenca 17).

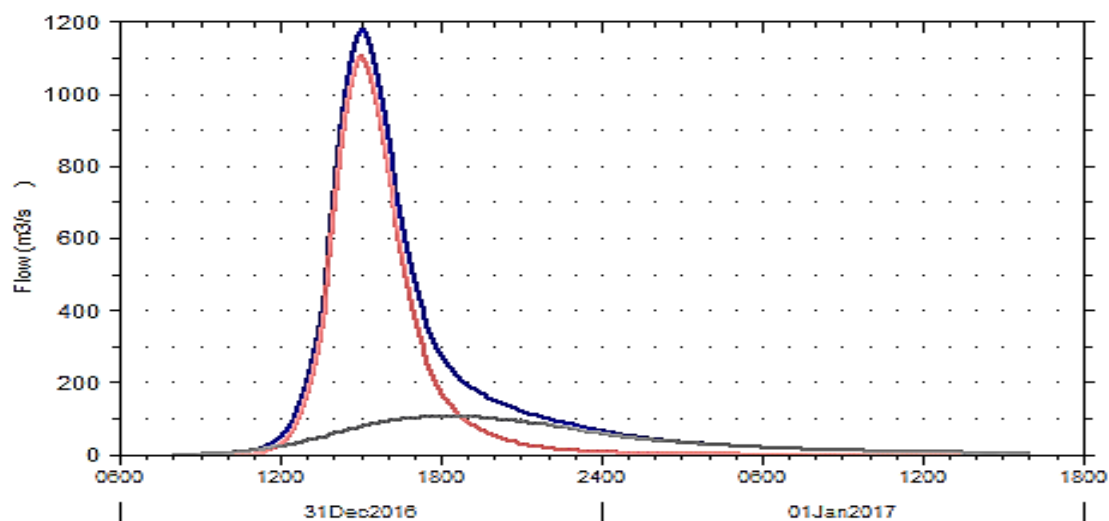


Figura 16. Hidrograma de entrada y salida del río Guayuriba del periodo 1995-2015, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

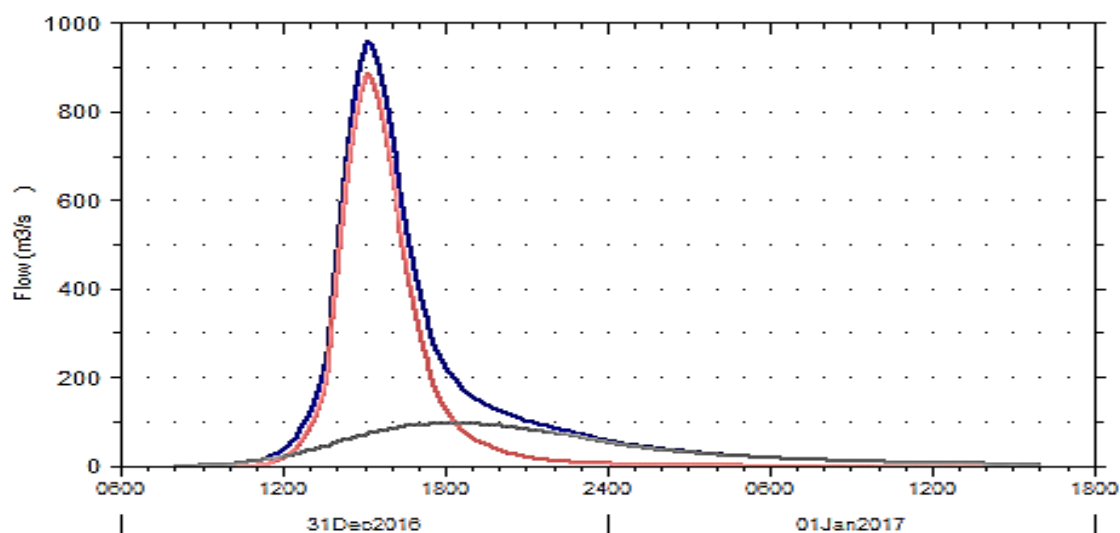


Figura 17. Hidrograma del río Guayuriba en el multiescenario de cambio climático 2011-2040, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Con base en la Figura 16 y Figura 17, se puede comparar el comportamiento del caudal pico entre el periodo 1995-2015 y el multiescenario de cambio climático 2011-2040, donde se observa una disminución de $222.82 \text{ m}^3/\text{s}$ como producto de la variación de la precipitación de 0.42 mm entre ambos escenarios.

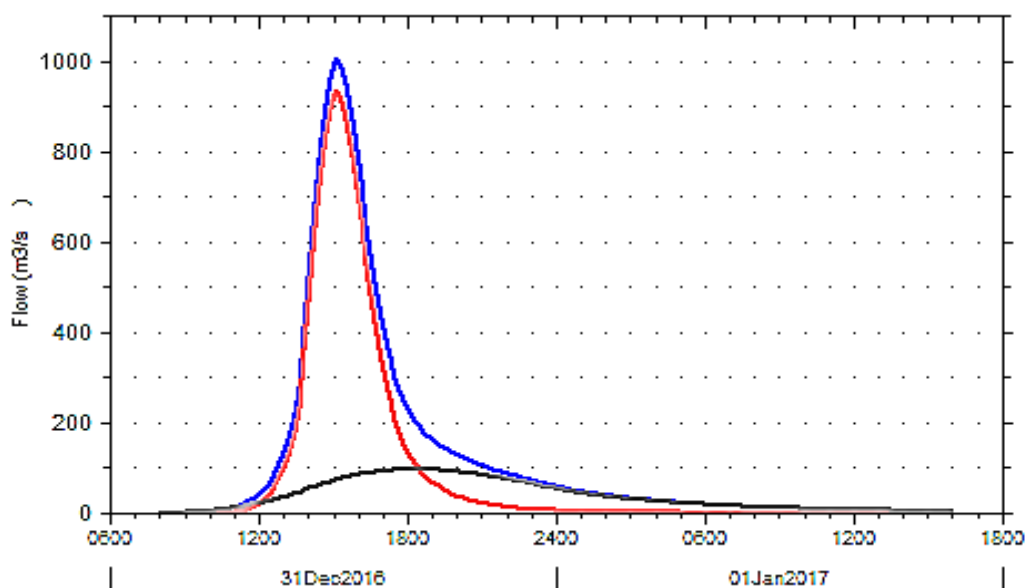


Figura 18. Hidrograma del río Guayuriba en el multiescenario de cambio climático 2041-2070, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

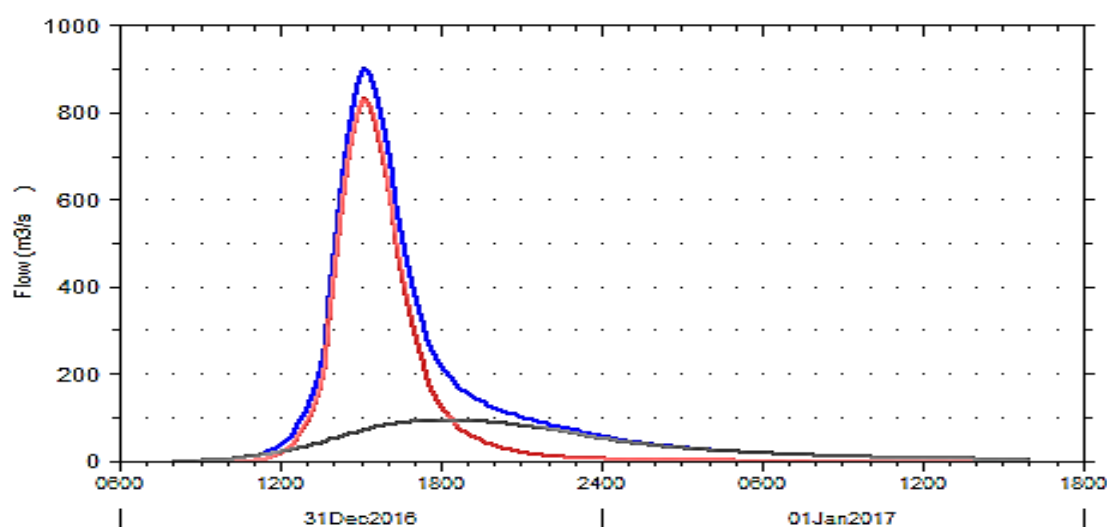


Figura 19. Hidrograma del río Guayuriba en el multiescenario de cambio climático 2071-2100, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Si se compara los valores entre el hidrograma actual y las proyecciones de cambio climático, se puede observar que los caudales disminuyen a causa de los cambios porcentuales de precipitación proyectados. Cabe resaltar que, con la excepción de los caudales actuales, los resultados de los períodos del multiescenario de cambio climático registrados por el modelo lluvia-escorrentía, están solamente bajo la suposición de un cambio porcentual en la precipitación en

función del tiempo, y no de variables que también pueden ser susceptibles al cambio en el mismo trayecto temporal que, asimismo, puedan influir en el comportamiento de los caudales.

Entre estas variables, el número de curva (CN), determinado a través del tipo cobertura del suelo, es una de las que presentan mayor susceptibilidad al cambio, tanto por causas naturales como antrópicas; el número de curva puede variar ya sea por degradación o eliminación de la cobertura, permitiendo el incremento y formación de escorrentía superficial (Benito, Santiago, & Varela, 2003), como por aumento de cobertura a través de procesos que favorezcan la conservación o reforestación del suelo, incrementando las capacidades de infiltración tanto a nivel del cauce como a nivel de la cuenca, puesto que la vegetación es un retardador de flujo (Bateman, 2007). En definitiva, la cobertura del suelo es primordial en la morfología fluvial, y se considera como estabilizador de terreno (Bateman, 2007), por lo que puede responder drásticamente en el comportamiento de los caudales máximos si se lleva a cabo una alteración en sus componentes.

Tabla 21.

Caudal máximo (m^3/s) por periodo de retorno en los períodos establecidos.

Período de retorno (T)	Actual	P1	P2	P3
2 años	160.11	98.16	106.54	93.58
5 años	305.49	203.45	218.67	194.06
10 años	475.72	336.60	358.74	322.24
25 años	810.12	624.02	658.54	589.66
50 años	1179.30	956.48	1003.20	900.53
100 años	1680.60	1413.40	1382.70	1332.20

Nota: P1: Multiescenario de cambio climático 2011-2040, P2: Multiescenario de cambio climático 2041-2070, P3: Multiescenario de cambio climático 2071-2100. Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Por otra parte, cabe subrayar que la estimación de los caudales máximos permite dar una idea de la diferencia porcentual de las proyecciones con respecto al caudal actual; se ilustra en la Figura 20 que todas las proyecciones arrojan resultados de disminución que oscilan entre el -15% y el -24% para un periodo de retorno 50 años, por lo que se traduce a una disminución de caudales máximos desde 176 hasta 278 m^3/s , provenientes de un caudal actual de 1179 m^3/s (ver Tabla 21). Esto puede demostrar un cambio significativo en el aporte hídrico que ya no produciría para las actividades económicas que se encuentran emplazadas en la cuenca, principalmente en la zona consumidora definida por el POMCH.

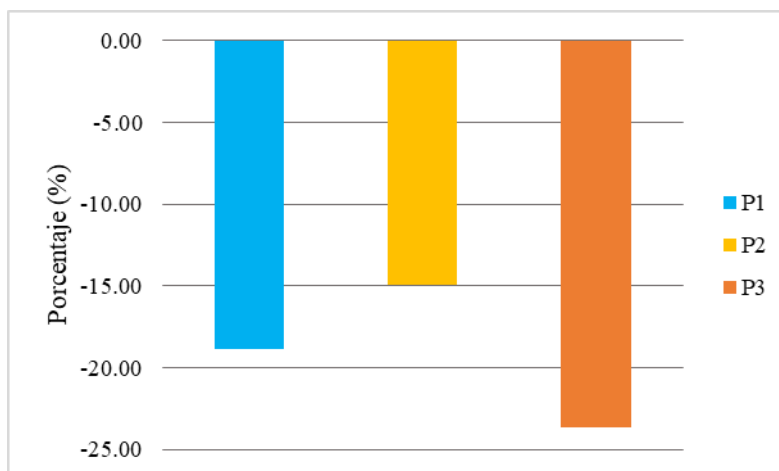


Figura 20. Cambio del caudal (%) estimadas en el modelo lluvia-escorrentía por proyección. P1: Proyección de cambio climático 2011-2040, P2: Proyección de cambio climático 2041-2070, P3 Proyección de cambio climático 2071-2100. Los cambios porcentuales se presentan para el período de retorno de 50 años. Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Los resultados arrojan caudales con cambios porcentuales negativos donde su disminución con respecto al tiempo no es directamente proporcional, puesto que se evidencia en la proyección de cambio climático 2041-2070 (P2) un aumento del caudal con respecto a la proyección anterior, de tal forma que coincide e igualmente responde al comportamiento particular de los cambios porcentuales de precipitación de ese mismo período registrados en las subcuencas del río Guayuriba (ver Tabla 15).

Finalmente, los caudales estimados en el modelo son resultante de diversos procesos que indican: una cuenca alta con gran cantidad de aportantes hídricos a pesar de la baja precipitación que se registran en una zona de gran extensión forestal, traduciendo a unas pérdidas por infiltración y formación de pequeños drenajes que logran permitir sus condiciones morfométricas; asimismo se compensa con una cuenca media y baja de ondulado relieve y suelos agrícolas, destacando lluvias de gran intensidad causado por fenómenos climáticos adyacentes en el piedemonte llanero, contribuyendo así un caudal susceptible a gran variabilidad. Al considerar las proyecciones de cambio climático, se observa una cuenca con tendencia a disminuir hasta una cuarta parte su caudal, a razón de que una tercera parte de ella refleja un cambio porcentual negativo fuerte de precipitación en las subcuencas que presentan lluvias de mayor intensidad, por lo que sus valores influirían incluyendo aquellas donde las precipitaciones proyectadas presentan cambios porcentuales positivos.

10.4.2 Comparación de caudales estimados con el método de Fuller

Se estimaron los caudales extremos a través del método de extrapolación de datos históricos de Fuller, por lo que se obtuvieron registros de caudales máximos y mínimos de las estaciones hidrológicas Caseteja-Delicias, Puente Carretera y Bajo Nare; se consideró el cuadro 7.3 del libro de *Hidrología en la Ingeniería* (Monsalve, 1999) para determinar las variables necesarias como el caudal medio (Q_{med}) de los caudales extremos y las constantes a y b , posteriormente utilizadas en el cálculo de caudales máximos y mínimos en los periodos de retorno establecidos.

En la Tabla 22 se muestra las variables cuyos valores fueron empleados en la ecuación del método de Fuller, obteniendo los caudales máximos y mínimos para cada estación (Ver Tabla 23).

Tabla 22.
Valores de las variables Q_{med} , a y b por estación hidrológica.

Estaciones	Caseteja-Delicias		Puente Carretera		Bajo Nare	
Caudales	Máximos	Mínimos	Máximos	Mínimos	Máximos	Mínimos
$Q_{med} (m^3/s)$	350.10	57.88	595.77	102.67	667.64	224.47
a	1.08	0.99	1.05	1.01	1.15	1.16
b	1.65	1.47	1.29	1.77	0.54	1.27

Nota: Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Tabla 23.
Estimación y comparación de caudales máximos y mínimos por estación hidrológica.

Estación Caseteja-Delicias (Est. 1)					
T (años)	5	10	25	50	100
Caudales Máximos m^3/s	2264	2438	2668	2842	3016
Caudales Mínimos m^3/s	335	361	395	420	446
Estación Puente Carretera (Est. 2)					
T (años)	5	10	25	50	100
Caudales Máximos m^3/s	3130	3361	3667	3898	4129
Caudales Mínimos m^3/s	697	751	824	878	933
Estación Bajo Nare (Est. 3)					
T (años)	5	10	25	50	100
Caudales Máximos m^3/s	1933	2041	2184	2291	2399
Caudales Mínimos m^3/s	1194	1280	1394	1480	1566

Nota: Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Por otra parte, en la Tabla 24 se realiza la comparación de los caudales extremos obtenidos con los métodos Fuller y lluvia-escorrentía. Debido a la complejidad del estudio, los caudales se analizan para un periodo de retorno de 50 años, teniendo en cuenta, que este es el tiempo promedio durante el cual existe una probabilidad en que el caudal es superior o igual una vez cada “T” años.

Tabla 24.

Comparación de caudales extremos entre el método Fuller y lluvia escorrentía.

Método	Estimación	Caudal máximo (m³/s)	Caudal mínimo (m³/s)
Fuller	Est. Caseteja-Delicias	2842	420
	Est. Puente Carretera	3898	878
	Est. Bajo Nare	2291	1480
lluvia-escorrentía	Actual (1995-2015)		1179
	Periodo 2011-2040 (P1)		956
	Periodo 2041-2070 (P2)		1003
	Periodo 2071-2100 (P3)		901

Nota: Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas

Los caudales máximos estimados por el método de Fuller presentan una variación debido a factores asociados con el relieve, el clima, el consumo hídrico (acciones antrópicas) y la ubicación de las estaciones, esta variación puede verse representada en el aumento y disminución del caudal. En relación con las estaciones Caseteja-Delicias y Puente Carretera, se presenta una diferencia entre los caudales de 1056 m³/s, lo cual indica que este incrementa 37 % en la estación Puente Carretera con respecto a Caseteja-Delicias; un elemento importante es el área, el cual influye sobre la cantidad de aportantes hídricos que abarca cada estación, debido que Caseteja-Delicias comprende una superficie (2479 km²) menor en comparación con Puente Carretera (2814 km²). Otro factor corresponde a la ubicación de la estación sobre la cuenca, la primera se sitúa sobre la parte alta de la cuenca en el municipio de Guayabetal y la otra en la parte media, en el límite del municipio de Villavicencio y Acacias, siendo el lugar donde se presentan velocidades mayores influenciadas por la geomorfología del sector, propiciando el desarrollo de la dinámica de un abanico fluvial.

Al comparar los caudales máximos entre las estaciones Puente Carretera y Bajo Nare, se presenta una disminución en el caudal de la estación Bajo Nare de 41 % con respecto al caudal estimado en Puente Carretera, demostrando un descenso de 1607 m³/s en el caudal del río, después de su desembocadura en el río Metica, esto puede corresponder a la captación y la desviación del agua del cauce principal para el consumo hídrico y uso en actividades económicas.

En cuanto a los caudales mínimos, fue estimado en la estación Caseteja-Delicias un caudal de 420 m³/s, menor con respecto a las estaciones Puente Carretera y Bajo Nare; presentando un aumento de 52 % en la estación Puente Carretera y una diferencia 458 m³/s. De igual manera, se observó un incremento de 41 % entre la estación Puente Carretera y Bajo Nare, en donde el caudal mínimo para esta última fue de 1480 m³/s.

10.4.3 Trasposición de Caudales

Teniendo en cuenta los dos métodos utilizados, se utilizó la ecuación para la trasposición de caudales obtenido del *Manual de drenaje para carreteras* (INVÍAS, 2009). Este método tiene en cuenta la relación de áreas de drenaje que abarca la estación Bajo Nare emplazada sobre el río Metica (7775 km²) y la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba, con el fin de transferir los caudales de la estación más cercana al punto de desembocadura (Bajo Nare), dado a que se encuentra ubicada aproximadamente a 20 km del río Blanco-Negro-Guayuriba. Para ello, se tuvo en cuenta que la cuenca del río Guayuriba ocupa 42 % del área de la cuenca del río Metica hasta la estación, debido a que es necesario no sobrepasar el 50 % del área total del drenaje para la correcta aplicación de la ecuación.

De acuerdo a lo anterior, se observa una disminución en ambos de 48 % con respecto a los caudales estimados en la estación Bajo Nare. A partir de estos resultados, se obtuvo una diferencia de 14 m³/s respecto al caudal estimado en el método lluvia-escurrentía, es decir que los caudales máximos obtenidos con el modelo hidrológico presentan una disminución de 1.2 % con respecto al caudal máximo estimado con el método de trasposición.

Tabla 25.

Caudales con el método de trasposición para la desembocadura del río Guayuriba.

Punto de estudio	Método	Área (km ²)	Caudal	
			máximo	mínimo
Estación Bajo Nare	Fuller	7775	2291	1480
Cca. Guayuriba	Trasposición desembocadura	3260	1194	771

Nota: Las unidades de caudal máximo y mínimo están en m³/s. Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Seguidamente se ingresaron al modelo los registros históricos de precipitación hasta el año 2006 de la estación Nare, debido a que es el año que presenta el caudal máximo anual registrado reciente con mayores datos de registro, por lo cual es una representación considerable para los

caudales máximos registrados en la cuenca. Por consiguiente, se genera en el modelo el caudal de salida y se repite el proceso de transposición con el motivo de comparar su resultado con la estación referente.

Tabla 26.

Transposición del modelo lluvia-escorrentía y la estación Bajo Nare del año 2006.

Punto de estudio	Área (km ²)	Tipo información	Caudal máximo (m ³ /s)
Estación Bajo Nare	4515	Dato representativo IDEAM	1158
		Transposición a Cca Guayuriba	907
Cca. Guayuriba	3260	Lluvia escorrentía	1225
		Transposición a Bajo Nare	1564

Nota: Cca. Guayuriba es el punto de estudio que representa el modelo lluvia-escorrentía en el punto de desembocadura del río Guayuriba. Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Se observa en la comparación el método de transposición tanto para el caudal de la estación Bajo Nare como para el punto de desembocadura del río Guayuriba, una diferencia porcentual del 25%, donde el caudal estimado en el modelo lluvia escorrentía es el de mayor valor, por lo que se traduce a una efectividad de estimación del 75% para ese año. La diferencia porcentual se puede explicar destacando que el modelo lluvia-escorrentía no tiene en cuenta los componentes del modelo de la cuenca (características de la cuenca) para el año respectivo.

Sin embargo, los caudales del modelo lluvia-escorrentía rondan por los valores de los caudales máximos registrados por la estación Bajo Nare, donde expresamente el caudal máximo multianual registrado es de 1551 m³/s (ver Tabla A 16 del Apéndice F), la cual se aproxima de manera significativa a la trasposición del modelo (1564 m³/s). Por lo tanto, se considera que los caudales estimados por el modelo lluvia-escorrentía pueden representar la cuenca del río Guayuriba, debido a que el criterio del balance del mismo con respecto al caudal real es cercano al 80%, sin tener las características físicas respectivas de su temporalidad, la cual es apropiado su aplicación.

Esto quiere decir que los resultados están bajo la suposición de condiciones morfométricas y procesos físicos recientes, que por diferencia temporal (9 años), aumenta la posibilidad de variabilidad, por lo que pueden estar sujetos a cambios como transformación de cobertura vegetal, intensidad de las actividades económicas y cambio climático.

10.4.4 Evaluación de la calibración del modelo lluvia escorrentía

Dos conceptos importantes a tener en cuenta antes de utilizar modelos hidrológicos son “exactitud” y “precisión”. La exactitud mide el desempeño de un modelo, es decir, la cercanía entre los valores simulados y los observados; un modelo exacto no arroja los mismos resultados, pero estos se encuentran siempre dentro de un rango alrededor de la medida observada. Por lo tanto, se utilizó el criterio de Schultz (D) y RMSE representando la magnitud de la desviación de los caudales simulados por el modelo lluvia-escorrentía con respecto a los observados en la estación Bajo Nare (Tabla 27).

Los resultados evidencian que el modelo cuenta con un nivel de ajuste suficiente, indicando que es funcional en medidas aceptables pese a la limitación de los datos. Estas limitaciones se pueden relacionar con la calidad y procesamiento de la información utilizada, principalmente asociados con errores sistemáticos o aleatorios de los datos de ingreso. Un ejemplo podría ser la calidad de los modelos digitales de elevación, los cuales cuentan con una baja resolución, por lo que infieren en la delimitación y caracterización real de la cuenca. De igual manera, la información sobre la cobertura del suelo no es reciente y la escala no presenta un nivel de detalle suficiente para el cálculo de las pérdidas por infiltración. Asimismo, la falta de una mayor red meteorológica puede contribuir a la incertidumbre en relación con el tamaño de la cuenca.

Tabla 27.

Desviación de los caudales simulados respecto a observados en la estación Bajo Nare.

N	Año	Q_i	Q_{sim}	$Q_{m\acute{a}x}$	$ Q_{sim}-Q_i $	$(Q_{sim}-Q_i) \cdot Q_i$
1	1999	888	1240.5	1551	353	313020
2	2000	969	1200.1	1551	231	223788
3	2001	725	1138.3	1551	414	299705
4	2002	1205	1144.9	1551	60	72300
5	2003	1003	1115.3	1551	112	112637
6	2004	1132	1191.8	1551	60	67694
7	2005	1044	1217.7	1551	174	181343
8	2006	1158	1225.2	1551	67	77818
9	2007	860	1198.0	1551	338	290680
10	2009	879	1203.4	1551	324	285148
Total		9863	11875.2		2132	1924132

Nota: n: son números de datos simulados, Q_i : es el caudal observado, Q_{sim} : es el caudal simulado, $Q_{m\acute{a}x}$: es la descarga máxima observada en el período en estudio. Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

$$D = 200 \cdot \frac{1924132}{10 \cdot (1551)^2} = 16$$

Tabla 28.

Calculo de la raíz del error cuadrático medio de los caudales estimados.

n	Año	Qi	Qsim	Qsim-Qi	(Qsim-Qi) ²
1	1999	888	1240.5	353	124256
2	2000	969	1200.1	231	53315
3	2001	725	1138.3	414	170982
4	2002	1205	1144.9	-60	3612
5	2003	1003	1115.3	112	12611
6	2004	1132	1191.8	60	3576
7	2005	1044	1217.7	174	30172
8	2006	1158	1225.2	67	4516
9	2007	860	1198.0	338	114244
10	2009	879	1203.4	324	105235
Total		9863	11875.2	2012	622520

Nota: Por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

$$RMSE = \sqrt{\frac{622520}{10}} = 250$$

Sin embargo, es importante resaltar que no se puede representar totalmente la cuenca en el modelo, puesto que se debe tener en cuenta los procesos naturales como sistemas dinámicos cambiantes. Adicionalmente, la cantidad de variables morfométricas, climatológicas e hidrológicas aumentan la complejidad del modelo y por lo tanto la sensibilidad al cambio.

10.5 Dinámica fluvial en la extracción de material de arrastre

La cuenca del río Guayuriba al tener un cauce trenzado presenta gran cantidad de canales y brazos que se entrelazan y separan dentro del cauce principal. Estos cambios son debido a variables como la pendiente longitudinal y transversal. Es por esto que la mayoría de las actividades mineras extractivas de material de arrastre se ubican entre las cuencas media y baja del río Guayuriba debido a los incrementos de la carga aluvial durante los eventos de alta torrencialidad en esas zonas, así como la pérdida de la capacidad de arrastre al disminuir la pendiente o el caudal del mismo.

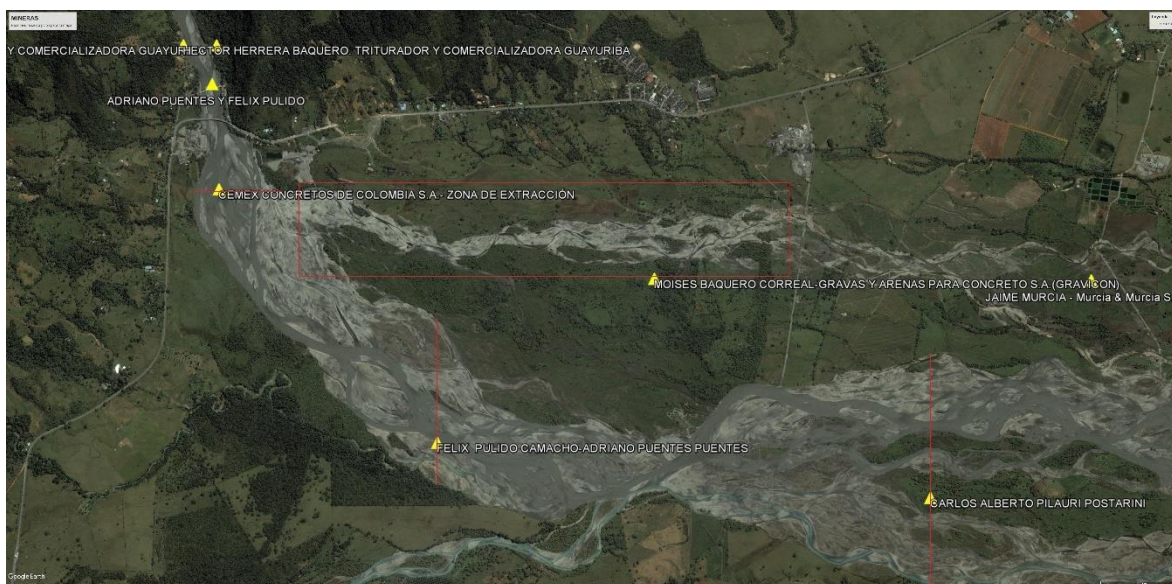


Figura 21. Imagen satelital en la cuenca media-baja del río Guayuriba en el año 2002. Adaptado de Google Earth (2002), por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

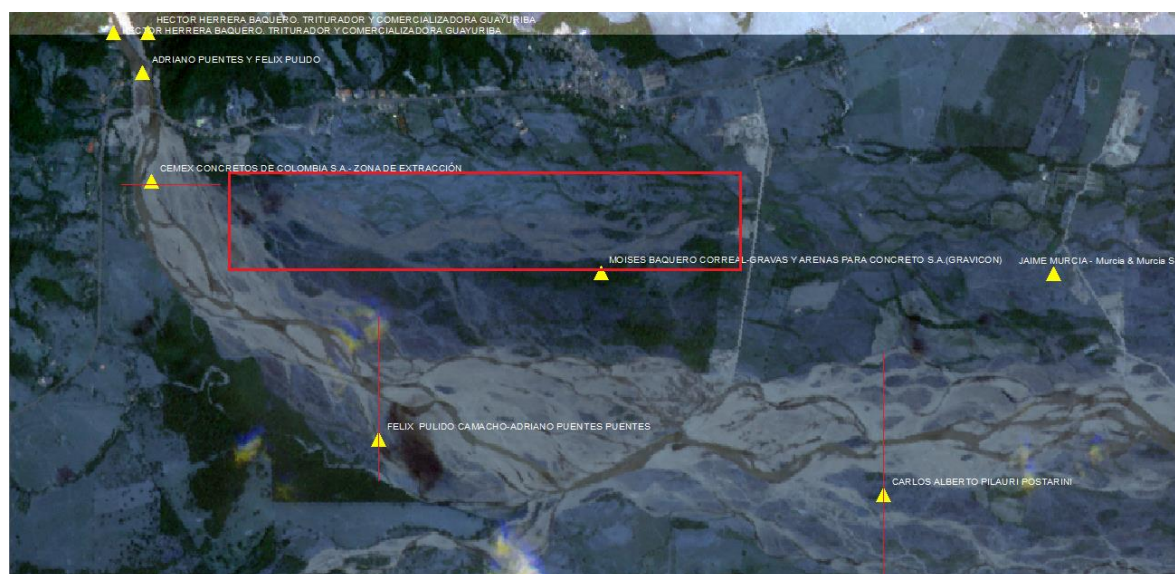


Figura 22. Imagen satelital en la cuenca media-baja del río Guayuriba en el año 2009. Adaptado de Rapid Eye (2009), por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

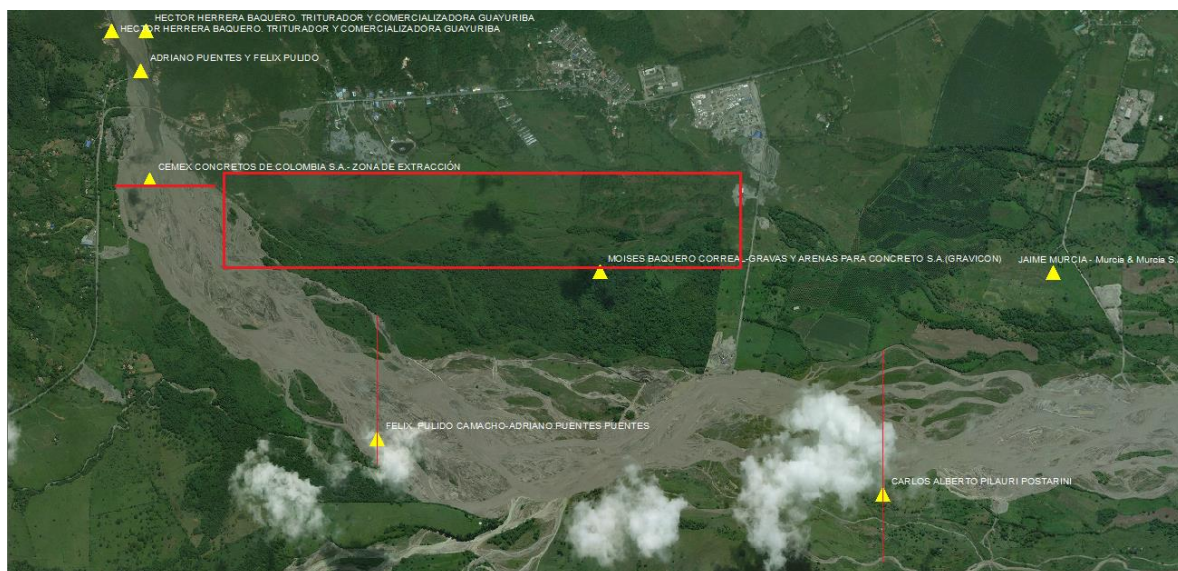


Figura 23. Imagen satelital en la cuenca media-baja del río Guayuriba en el año 2016. Adaptado de Bing (2016), por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.



Figura 24. Cambio de turbidez del río Guayuriba cercano a extractoras de material de arrastre. Adaptado de Bing (2016), por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.



Figura 25. Extracción de material arrastre sobre cauce activo el río Guayuriba. Adaptado de Bing (2016), por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

Al observar una proyección de disminución en los caudales, se destaca la formación de las islas o zonas de sedimentos, aumentando así la actividad de las mineras extractivas. Sin embargo, estas tendencias de disminución en los caudales pueden generar un aumento en los impactos ya realizados actualmente. La consecución de esto impactos provocan un deterioro ambiental significativo.

Es necesario tener cuenta medidas de control frecuente del recurso, puesto que el aumento de la extracción puede aumentar las socavaciones laterales por desviación del cauce, que por su caudal aumenta alteración de la dinámica fluvial. La modificación frecuente de la dirección del cauce da a lugar a cambios en la velocidad de la corriente y efectos sobre la flora, fauna y suelo por fragmentación de ecosistemas, generando fenómenos erosivos desestabilizando los taludes, por métodos de explotación no acordes a su temporalidad.

Por lo tanto, es importante la implementación de los métodos de explotación adecuados, los cuales deben cumplir con los estándares de diseño de acuerdo a la dinámica y forma que presenta el río, respetando las márgenes o rondas de protección tanto de márgenes como de fondo.

Cabe aclarar que para un mismo tramo se pueden implementar varios métodos de explotación adecuados a las condiciones particulares de la dinámica fluvial y considerando los regímenes climáticos propios de la región y los aportes de la corriente de agua. Estos deben ser

flexibles y ajustados en consecuencia, para lo cual se deben implementar medidas de control verificables a corto y mediano plazo.

10.6 Consumo hídrico en la producción de palma de aceite.

De acuerdo al consumo de agua por parte de actividades destinadas a la producción de palma de aceite, se realizó una comparación en los caudales estimados anteriormente teniendo en cuenta la una posible disminución debido a la captación del caudal en algunos sectores del río Guayuriba (Ver Figura 26), los cuales se encuentran ubicados en la cuenca baja sobre la zona denominada consumidora. A partir de la información de Cormacarena, se obtuvo un caudal captado total de 7528.88 L/s representando 7.53 m³/s, sin embargo, para la producción de palma se estima un caudal de 3654 L/s lo que equivale a 3.65 m³/s.

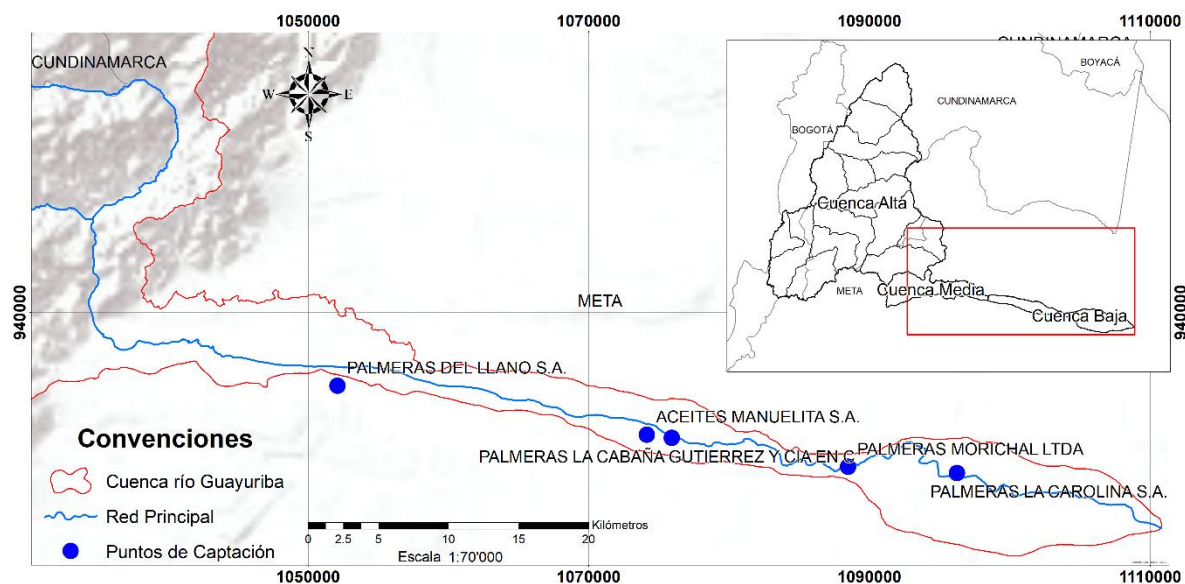


Figura 26. Puntos de captación de agua para riego en cultivos de palma, por Mauricio Parrado y Nathalia Vivas.

A partir de ello, se observa una disminución de aproximadamente 1% del caudal, en donde la producción de palma aporta 0.35 %. Una característica importante es que el cultivo de palma demanda grandes cantidades de agua. Según Cormacarena la demanda de agua del río Guayuriba se divide por su uso, en donde el mayor volumen de agua es usado en actividades agropecuarias, donde el 68 % del total se utiliza en producción de palma (Cormacarena, 2009). Así mismo, en meses de poca precipitación (diciembre y febrero) en la cuenca se presentan los mayores índices de escasez de consumo en donde la demanda de agua es mayor que el caudal del río.

La problemática no solo radica en el caudal captado, si no en la forma en que se ejecuta la captación y su distribución, ya que sobre el río Guayuriba se encuentran alrededor de 8 canales para la desviación de parte del caudal con fines en su mayoría para cultivos de palma, los cuales parte de estos canales a través de los años han sido arrastrados por el río y que a su vez han tenido gran influencia sobre la dinámica fluvial del río. No obstante, no se descarta el comportamiento natural del río, la geología y el impacto de actividades mineras, ya que se observan zonas de transvases influenciados por el desplazamiento natural del río hacia la margen izquierda del cauce, que se magnifica por la acción antrópica.

Por lo tanto, la cantidad de caudal permitido debe estar condicionado por la capacidad de oferta de agua con respecto a la demanda en las temporadas de sequía e invierno, la cual es de gran importancia para el sostenimiento del recurso hídrico a futuro, teniendo en cuenta las proyecciones.

Conclusiones

Al ser una cuenca de gran tamaño (3260 km²) y su ubicación entre dos regiones, definen la intensidad y distribución espacial de la lluvia en la cuenca del río Guayuriba debido a que enmarca una diferencia significativa en los componentes geomorfológicos y climatológicos como la altura, el ancho, la longitud, la distancia entre barreras sucesivas, entre otros.

Al comparar los valores entre el hidrograma actual y las proyecciones de cambio climático, se puede observar que los caudales disminuyen a causa de los cambios porcentuales de precipitación proyectados. Sin embargo, la causa de la disminución de los caudales en el modelo lluvia-escorrentía también está directamente relacionada con procesos como la infiltración, evapotranspiración, interceptación por la vegetación, o almacenamiento en depresiones de la superficie topográfica, consideradas en la construcción del modelo como las abstracciones iniciales.

La estimación de los caudales máximos permite dar una idea de la diferencia porcentual de las proyecciones con respecto al caudal actual, donde arrojan resultados de disminución que oscilan entre el -15 y el -24% para un periodo de retorno de 50 años. Por lo tanto, se observa una cuenca con tendencia a disminuir hasta una cuarta parte su caudal, a razón de que una tercera parte de ella refleja un cambio porcentual negativo de precipitación en las subcuencas que presentan lluvias de mayor intensidad, por lo que sus valores influirían en aquellas donde las precipitaciones proyectadas tienen cambios porcentuales positivos.

Los caudales estimados en el modelo lluvia-escorrentía son resultante de diversos procesos que indican una cuenca alta con gran cantidad de aportantes hídricos a pesar de la baja precipitación que se registran en una zona de gran extensión forestal, traduciendo a unas pérdidas por infiltración y formación de pequeños drenajes que logran permitir sus condiciones morfométricas; asimismo se compensa con una cuenca media y baja de ondulado relieve y suelos agrícolas, destacando lluvias de gran intensidad causado por fenómenos climáticos adyacentes en el piedemonte llanero, contribuyendo así un caudal susceptible a gran variabilidad.

El resultado en la evaluación de la calibración del modelo arroja un nivel de ajuste suficiente, indicando que el modelo es funcional en medidas aceptables pese a la limitación de los datos. Estas limitaciones se pueden relacionar con la calidad y procesamiento de la información utilizada, principalmente asociados con errores sistemáticos o aleatorios de los datos de ingreso.

Para la extracción de material de arrastre con respecto a la dinámica fluvial, se recomienda la implementación de los métodos de explotación adecuados, los cuales deben cumplir con los estándares de diseño de acuerdo a la dinámica y forma que presenta el río, respetando las márgenes o rondas de protección tanto de márgenes como de fondo. La extracción de material de arrastre del río en forma excesiva puede causar la degradación de su lecho, por lo tanto, se debe observar las medidas preventivas correspondientes, aún más allá de los sitios de extracción.

Para el consumo hídrico en la producción de aceite de palma se sugiere que la cantidad de caudal permitido debe estar condicionado por la capacidad de oferta de agua con respecto a la demanda en las temporadas de sequía e invierno, la cual es de gran importancia para el sostenimiento del recurso hídrico a futuro, teniendo en cuenta las proyecciones, evitando el deterioro ambiental de la cuenca.

Recomendaciones

Plantear y fortalecer políticas encaminadas a generar líneas de acción y proyectos sobre las medidas mitigación y adaptación con el fin de mejorar el ordenamiento del territorio, teniendo en cuenta las actividades económicas asociadas al manejo y aprovechamiento del recurso hídrico de la cuenca, para impulsar el desarrollo social y económico frente a un futuro clima cambiante.

Tomar medidas de control inmediatas con relación a las captaciones del recurso hídrico y plantear alternativas detalladas relacionadas con las estructuras en que se ejecutan, la distribución de la cantidad del caudal y las desviaciones del cauce sobre la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba con el fin de minimizar los efectos derivados por la modificación del cauce.

Elaborar estudios detallados sobre la oferta y demanda hídrica con respecto a la disponibilidad de agua, relacionados con el cambio climático y las temporadas de sequía y de lluvias, con el fin de facilitar la inclusión de estudios de cambio climático en planes de desarrollo de los municipios presentes en la cuenca y desarrollar una gestión integral del recurso y de los riesgos que se deriven para dar cumplimiento a la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico PNGIRH.

Generar acciones pertinentes entre el comportamiento natural del río, la geología, transporte de sedimentos, hidráulica y las actividades económicas, para minimizar los efectos e impactos del desplazamiento natural del río hacia la margen izquierda del cauce, que se magnifica por la acción antrópica.

Planificar e implementar métodos de extracción de acuerdo a los aportes de la corriente de agua en el contexto del cambio climático. Estos deben ser flexibles y ajustados en consecuencia.

Ejercer medidas de control a corto, mediano y largo plazo sobre los límites de fondo y los volúmenes máximos de extracción de material de acuerdo al nivel de recarga del río que podrían presentar respecto a los caudales del multiescenario de cambio climático.

Generar mayor participación y conocimiento entre las actividades económicas, la comunidad y las entidades ambientales para la tomar medidas de adaptación al cambio climático sobre la

cuenca e identificar las actividades en que se realiza uso y el aprovechamiento del recurso hídrico con el fin prevenir sus consecuencias

Referencias bibliográficas

- Acevedo Aristizábal, L. (2009). *Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Alcaldía de Villavicencio. (2013). *Síntesis diagnóstica, Norte Plan de Ordenamiento Territorial de Villavicencio*. Villavicencio.
- Ampuero, J. (2012). Modelamiento Hidrológico en la Cuenca Taquiña, Considerando el Tránsito de Hidrología del Embalse.
- Aristizábal, & Acevedo, L. (2009). *Estimación Hidrológica Bajo Escenarios de Cambio Climático en Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Aroca, E. (2014). *Importancia de las abstracciones iniciales para la génesis de avenidas en cuencas de montaña*. España: Universidad de Cantabria.
- Aroca, E., & Bodoque, J. M. (Octubre de 2014). *Importancia de las abstracciones iniciales para la génesis de avenidas en cuencas de montaña*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/301898892_Importancia_de_las_abstracciones_iniciales_para_la_genesis_de_avenidas_en_cuencas_de_montana
- Baltas, E. A., Dervos, N. A., & Mimikonu, M. A. (2007). Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. *Hidrology and Earth System Sciences*, 1825-1829.
- Bastidas, C. (2011). *Manual para el uso del modelo hidrológico HEC-HMS*. Venezuela: Departamento Ingeniería Hidrometeorológica Fac. Ingeniería – UCV.
- Bateman, A. (2007). *Hidrología Básica y Aplicada*. Obtenido de Universidad Politécnica de Cartagena: <http://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>
- Benito, E., Santiago, J. L., & Varela, M. E. (2003). Influencia de la degradación de la cubierta vegetal tal en la generación de sedimentos y en su composición: experiencias con simulación de lluvia. *Edafología. ResearchGate*, 181-185. Obtenido de ResearchGate.

- Burlado, P., & Pellicciotti, F. (2002). Modelling Mountainous Water Systems Between Learning and Speculating Looking for Challenges. *Nordic Hydrology*, 33(1), 47-74.
- Caracol Radio. (13 de Junio de 2017). *Por desbordamiento de río cierran la vía Villavicencio - Acacías*. (Caracol Radio) Recuperado el 04 de Agosto de 2017, de http://caracol.com.co/radio/2017/06/13/regional/1497362217_058671.html
- Caro, C. I., Torres, M. A., & Barajas, M. P. (2014). Ecosistemas estratégicos y disponibilidad de hábitat de la avifauna del piedemonte llanero (Colombia), como posible peligro aviar. *Luna Azul*, 39, 25-39.
- CAR's, PNN, & Ministerio. (2012). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba*.
- Carvajal, A. C. (2014). *Estimación de Caudales Máximos en Contexto de Cambio Climático*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrologia Aplicada*. Santa fe de Bogotá: McGraw-Hill interamericana s.a.
- CIDER. (2015). *Documento de seguimientos y evaluación del PBOT de Acacias*. Acacias.
- Coe, M. T., Costa, M. H., & Soares-Filho, B. S. (2009). The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River – Land surface processes and atmospheric feedbacks. *Journal of Hydrology*, 369(1-2), 165–174.
- Cormacarena. (2009). *Plan de Ordenamiento de la Cuenca del Río Guayuriba*. Villavicencio: Contrato de cooperación científica 28208026/2008.
- Cortés, A. C. (2010). *Análisis de la Variabilidad Espacial y Temporal de la Precipitación en una Ciudad de Media Montaña Andina*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Cruz, M., & Peralta, A. (1989). *Curvas Intensidad Frecuencia Duración y métodos de gastos máximos*. La Habana: Centro de Investigaciones.
- Duque, A. F. (2014). *Efecto del cambio ambiental global sobre los caudales medios y extremos en la cuenca del río Amazonas*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

- Duque, A. F. (2014). *Efecto del Cambio Ambiental Global sobre los Caudales Medios y Extremos en la Cuenca del Río Amazonas*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- El Tiempo. (08 de Febrero de 2010). *Río Guayuriba está en peligro de desaparecer por uso abusivo del agua*. (El Tiempo) Recuperado el 04 de Agosto de 2017, de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-7150530>
- El Tiempo. (18 de Agosto de 2016). *Aguaceros tienen en jaque a Villavicencio*. (El Tiempo) Recuperado el 04 de Agosto de 2017, de <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/aguaceros-tienen-en-jaque-a-villavicencio-41169>
- García, M. C., Botero, A. P., Quiroga, F. A., & Ardila, E. R. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*.
- Grimaldi, S., Petroselli, A., & Romano, N. (2013). Curve-Number/Green-Ampt mixed procedure for streamflow predictions in ungauged basins: Parameter sensitivity analysis. *Hydrological Processes*.
- Guzmán, D., Ruíz, J. F., & Cadena, M. (2014). *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través análisis de componentes principales (ACP)*. Obtenido de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Regionalizaci%C3%B3n+de+la+lluvia+en+Colombia.pdf/92287f96-840f-4408-8e76-98b668b83664>
- Hense, A., Krahe, P., & Flohn, H. (1988). Recent Fluctuations of tropospheric temperature and water vapor content in the tropics. *Meorol. Atmos. Phys*, 38, 215-227.
- Horton, E. H. (1932). *Drainage basin characteristics*. Trans. American Geophysical.
- Horton, R. E. (1945). “*Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*”. Geological Society of America Bulletin.
- IDEAM. (2001). *Primera Comunicación Nacional sobre el Cambio Climático*. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2010). *Segunda Comunicación sobre el Cambio Climático*. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

- IDEAM. (2015). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2015). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100*. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- INVÍAS. (2009). *Manual de Drenajes para Carreteras*. Bogotá: Ministerio de Transporte.
- IPCC. (1988). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Recuperado el 25 de Abril de 2017
- IPCC. (2002). *Tercer Informe de Evaluación. Cambio Climático 2001. La base científica*. Noruega: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- IPCC. (2013). *Cambio Climático: Bases Físicas*. Noruega: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- IPCC. (2014). *Cambio Climático: Mitigación del Cambio Climático*. Noruega: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Jaramillo, A. (2005). *Clima andino y café en Colombia*. Chinchiná, Caldas: Cenicafé.
- Jaramillo, Á. (2005). *Clima andino y café en Colombia*. Chinchiná, Caldas: Cenicafé.
- Jaramillo, B., & Chaves, R. A. (2000). Distribución de la Precipitación en Colombia Analizada Mediante Conglomeración Estadística. *Cenicafé*, 102-113. Obtenido de Cenicafe.org: [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc051\(02\)102-113.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc051(02)102-113.pdf)
- Jarrett, R. D. (1990). Hydrologic and hydraulic research in mountain rivers. *Water Resources Bulletin*, 26, 3: 419-429.
- Jiménez, J. (2011). *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos para la generación de energía eléctrica*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Joo, K., Kim, H., & Lee, H. (2013). *A comparison of two event-based flood models (ReFH-rainfall runoff model and HEC-HMS) at two Korean catchments*. Bukil and Jeungpyeong: KSCE Journal of Civil Engineering.

- Lashof, D. (1997). *Global Warming Central: Debate number three*. Obtenido de <http://www.law.pace.edu/>
- Lavao, S. A. (2014). *Aplicación de la Teoría del Numero de Curva a una Cuenca de Montaña. Caso de Estudio: Cuenca del Río Murca, Mediante la Utilización de Sistemas de Información Geográfica*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- López, J. J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J., & Gimena, F. (2012). *Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas*. Pamplona: Obras y Proyectos .
- Marengo, J., Jones, R., Alves, L., & Valverde, M. (11 de Enero de 2009). *Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived form the PRECIS regional climate modeling*. Recuperado el 25 de Abril de 2017, de <http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/publicacoes/2009/marengo2009.pdf>
- Martinez de Azagra, A., & Navarro Hevia, J. (1996). *Hidrología Forestal. El ciclo hidrológico*. España: Universidad de Valladolid.
- Méndez Morales, M. (2012). *Sistema de vigilancia y monitoreo para la prevención de desastres por inundación en el sistema de cuencas del río Toyogres y la quebrada Zopilote en Dulce Nombre de Cartago*. Cartago, Costa Rica.
- Mesa, O., Poveda, G., Carvajal, L., & Salazar, J. (Enero de 1997). *Reservoir reliability design under interannual climatic and hydrologic variability*. Recuperado el 25 de Abril de 2017, de [233921862_Reservoir_reliability_design_under_interannual_climatic_and_hydrologic_variability](https://www.researchgate.net/publication/233921862_Reservoir_reliability_design_under_interannual_climatic_and_hydrologic_variability)
- Mijares, F. (1992). *Fundamentos de Hidrologia de Superficie*. Mexico, D.F: Editorial Limusa.
- Modelling mountainous water systems between learning and speculating looking for challenges*. (Enero de 2002). Recuperado el 25 de Abril de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/279588122_Modelling_mountainous_water_systems_between_learning_and_speculating_looking_for_challenges

- Molnar, P. (2011). *"Calibration". Watershed Modelling, SS 2011*. ETH Zürich. Switzerland: Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management.
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- MTC. (2011). *Manual de Carreteras. Hidrología, Hidráulica y Drenaje*. Lima, Perú: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).
- Naciones Unidas. (1992). *United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- Nanía, L. S. (2007). *Manual Básico de HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1*. Granada, España: Universidad de Granada.
- Ochoa, A., & Poveda, G. (2008). *Distribución Espacial de Señales de Cambio Climático en Colombia*. Cartagena: XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias Colombia.
- Oliveras, J. (10 de Febrero de 2014). *HidroJING*. Obtenido de Obtencion de hietogramas a partir de curvas IDF para HEC-HMS y SWMM: <http://www.hidrojing.com/como-obtener-hietogramas-a-partir-de-curvas-idf-para-hec-hms-y-swmm/>
- ONU. (2000). *Objetivos de Desarrollo del Milenio - ODM*. Recuperado el 03 de Agosto de 2017, de http://www.un.org/es/millenniumgoals/pdf/2015/mdg-report-2015_spanish.pdf
- ONU. (2015). *Objetivos del Desarrollo Sostenible - ODS*. Obtenido de <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Ortiz Higuera, E. A. (2015). Caracterización morfométrica, modelación hidrológica y modelación hidráulica para la cuenca del cauce en la. Bogotá D.C.
- Oster, R. (1979). Las Precipitaciones en Colombia. *Revista Geográfica*, 5-147.
- Oviedo Torres , B. E., & León Aristizábal, G. (2010). *Guía de procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Ponce, V. M., & Hawkins, R. H. (1996). Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19.

- Poveda, G., & Mesa, O. J. (2000). On the Existence of Lloró (the Rainiest Locality on Earth): Enhanced Ocean-Land-Atmosphere Interaction by a Low-Level Jet. *Geophysical Research Letters*, 27(11), 1675-1678.
- PRICCO. (s.f.). *Juntos frente al cambio climático: Meta, el clima de hoy y de mañana*. Obtenido de <http://www.orinoquiacc.org/nota/meta-el-clima-de-hoy-y-de-manana/>
- Restrepo, C. (13 de Junio de 2017). *Emergencia en Villavicencio por desbordamiento del río Guayuriba*. (El Tiempo) Recuperado el 04 de Agosto de 2017, de <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/desbordamiento-de-río-guayuriba-en-villavicencio-en-meta-98708>
- Robert Hofstede, J. C. (2014). *Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. Quito, Ecuador: UICN.
- SCS. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. Springfield, VA: U.S.D.A.
- Smith, R., Poveda, G., Mesa, O., Pérez, C., & Ruiz, C. (1996). *En búsqueda de señales de cambio climático en Colombia*. Santa Fé de Bogotá: IV Congreso Colombiano de Meteorología, Sociedad Colombiana de Meteorología.
- Strahler AN. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. Section 4-II of Handbooks of Applied Hydrology*. New York, USA: Mc.
- Torres Abello, A. E. (2004). *Apuntes de Clase Sobre Hidrología Urbana*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- U.S.D.A. (1985). *National Engineering Handbook*. Washington: United State Government.
- Upegui, J. J., & Gutiérrez, A. B. (2010). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis, Manizales. *Scielo.org*, 58-71.
- US Army Corps of Engineers. (2000). *Technical Reference Manual*. USA: Davis California.
- Valencia, S. C. (2015). *Metodología para Estimar Caudales Medios y Extremos en Escenarios de Cambio Climático*. Universidad Nacional de Colombia.

- Vargas, R. M., & Díaz Granados, M. (1998). *Curvas Sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Villón, M. (2013). *HEC-HMS Ejemplos (Tercera Ed.)*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Whiteman, D. C. (2000). *Meteorología de Montaña: Fundamentos y Aplicaciones*. Reino Unido: Oxford University.
- WMO. (2012). *International glossary of Hydrology*. USA.

Apéndice B. Descripción del cálculo de las variables de entrada.

Nombre del atributo	Descripción
Área de la cuenca (A)	Se calcula a partir del geoprocesamiento de un Modelo Digital de Elevación (MDE) en formato geotiff con referencia espacial WGS 84 y resolución de 30 m obtenido del <i>United State Geological Service</i> (USGS).
Perímetro de la cuenca (P)	Se obtiene midiendo la línea divisoria de aguas de la cuenca.
Longitud del Cauce Principal (L)	Se traza el cauce principal, desde el punto de nacimiento del cauce hasta su desembocadura por medio del programa ArcGIS.
Altura máxima del cauce (H máx.)	Se obtiene identificando el número de cota ubicado en el punto de nacimiento del cauce.
Altura mínima del cauce (H min.)	Se obtiene identificando el número de cota ubicado en el punto de desembocadura del cauce.
Pendiente del cauce principal (Sc)	Se calcula por la diferencia de elevación entre el punto más alto y más bajo del cauce principal dividido entre la longitud del mismo.
Tiempo de concentración (Tc)	Se determina de acuerdo al tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto más alejado. Las siguientes ecuaciones fueron utilizadas: Kirpich: Dónde, L= Longitud de cauce principal, en ft y Sc=Pendiente del cauce, en (ft/ft). $T_c = 0.0078 * \left(\frac{L^{0.77}}{S_c^{0.385}} \right)$ California Couverts Practice: Dónde, L=Longitud del cauce de la cuenca (millas) y H=Diferencia de nivel entre al punto más alto de la divisoria de aguas y el punto de salida de la cuenca (ft). $T_c = 60 * \left(\frac{11.9L^3}{H} \right)^{0.385}$

Número de curva (CN)	Se calcula por medio de tablas establecidas por Soil Conservation Service (SCS) correspondiente al tipo de suelo asociado a la cuenca.
Almacenamiento potencial (S)	Este parámetro se determina en unidades de mm y se relaciona las condiciones del suelo con la curva número según el SCS. Se calcula con la fórmula: $S = \left(\frac{2540}{CN} - 25.4 \right) * 10$
Tiempo de retardo (Tlag)	Por subcuenca se obtiene mediante la fórmula $T_{LagS} = T_c * 0.6$. Por tránsito en el tramo se obtiene con la ecuación $T_{lagT} = \frac{(100 * L_s^{0.8} * \frac{1000}{CN} - 9)^{0.7}}{1900 * S_{cs}^{0.5}}$ donde, Ls=Longitud del cauce principal en la subcuenca, en pies, Scs= Pendiente (%) del cauce principal y CN por subcuenca.
Abstracciones iniciales (Ia)	Se obtiene de la siguiente fórmula $I_a = 0.2 * S$, en donde 0.2 es un coeficiente de pérdidas iniciales estándar ajustado empíricamente.
Precipitación (Pe)	Se obtiene de estaciones pluviométricas y pluviográficas ubicadas dentro y fuera de la cuenca, dependiendo de su influencia por medio de polígonos de Thiessen. El IDEAM es la entidad encargada de administrar la información de las estaciones.
Intensidad de precipitación (I)	Se calcula de acuerdo a la cantidad de agua precipitada en un tiempo determinado; se estima en milímetros por hora (mm/h).
Caudal (Q)	Se calcula a partir fórmulas y logaritmos establecidos en el modelo hidrológico del programa HEC HMS.

Apéndice C. Listas cartografía base.

Tabla A 1. Información de cartografía base disponible escala 1:25.000.

Entidad	Nº de plancha	Nº de plancha	Escala
IGAC	265 IVA	228 IVA	1:25.000
	265 IVB	228 IVC	1:25.000
	266 IVB	246 IID	1:25.000
	267 IIIA	247 IIA	1:25.000
	267 IIIB	247 IIC	1:25.000
	267 IIIC	247 IIIA	1:25.000
	267 IIID	247 IIIB	1:25.000
	267 IVA	247IVA	1:25.000
	267 IVC	247 IVC	1:25.000
	267 IVD	265 IIA	1:25.000
	266 IIIA	265 IIB	1:25.000
	266 IIIB	266 IA	1:25.000
	266 IVA	266 IIA	1:25.000
	246 IVB	246 IVD	1:25.000
	246 IVC	247 IIID	1:25.000
	247 IA	266 IB	1:25.000
	247 IB	247 IIIC	1:25.000
	247 IC	265 IIC	1:25.000
	247 ID	265 IID	1:25.000
	228 IIIB	266 IC	1:25.000
	228 IIIC	266 ID	1:25.000
	228 IIID	266 IIC	1:25.000

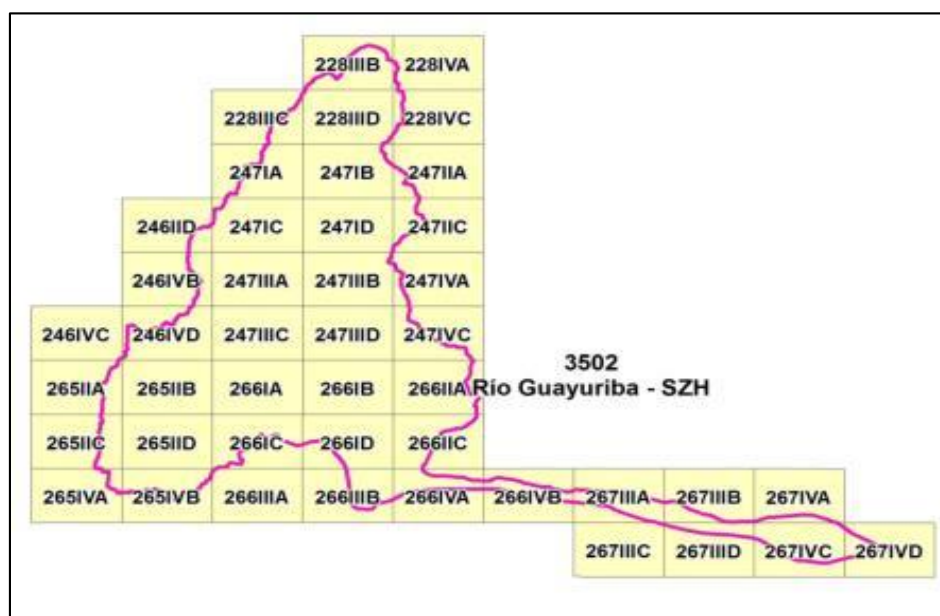


Figura A 1. Esquema de la distribución de planchas 1:25.000 en la cuenca Negro-Blanco- Guayuriba

Tabla A 2. Información de cartografía base disponible escala 1:100.000.

Entidad	Nº de plancha	Escala	Nombre	Departamento
IGAC	228	1:100.000	Carta general	Cundinamarca
	246	1:100.000	Carta general	Cundinamarca
	247	1:100.000	Carta general	Cundinamarca y Meta
	265	1:100.000	Icononzo	Cundinamarca, Tolima y Meta
	266	1:100.000	Villavicencio	Cundinamarca y Meta
	267	1:100.000	Meta	Meta

Apéndice D. Calculo de intensidad de precipitación

En el manual de drenaje del Invías se establece la siguiente ecuación:

$$i = \frac{a * T^b * M^d}{\frac{t^c}{60}}$$

Dónde:

i: Es la intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T: Periodo de retorno, en años.

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 horas.

t: Duración de la lluvia, en minutos (min).

a, b, c, d: Parámetros de ajuste de la regresión. Los cuales sus valores fueron regionalizados como se presentan a continuación.

Tabla A 3. Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas IDF para Colombia.

REGIÓN	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe (R2)	24.85	0.22	0.5	0.1
Pacífico (R3)	13.92	0.19	0.58	0.2
Orinoquia (R4)	5.53	0.17	0.63	0.42



Figura A 2. Regiones en Colombia para definición de parámetros a, b, c y d

Apéndice E. Información base de precipitación máxima 24 horas por estación seleccionada.

Tabla A 4. Valores máximos mensuales de precipitación (mms) en 24 horas de la estación Choachí.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANU AL
1981	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	9	13
1982	21	15	11	10	13	10	10	13	7	24	19	8	24
1983	8	15	25	61	17	18	24	25	20	22	9	7	61
1984	7	13	7	-	-	-	-	-	-	14	24	1	24
1985	4	-	-	25	-	11	15	19	16	45	65	0	65
1986	1	38	14	17	14	19	23	15	-	-	-	8	38
1987	1	15	25	13	22	15	24	13	14	17	15	10	25
1988	0	4	5	15	61	19	17	21	13	45	23	11	61
1989	1	12	22	4	16	29	18	17	11	18	44	40	44
1990	14	4	27	19	12	26	20	19	11	16	17	20	27
1991	14	2	9	20	13	13	15	30	12	4	27	7	30
1992	12	5	7	17	11	13	19	14	27	8	26	8	27
1993	8	7	11	16	13	15	20	10	16	18	13	7	20
1994	12	4	11	13	22	22	25	26	11	23	10	6	26
1995	2	10	36	62	18	29	12	19	18	9	18	7	62
1996	10	24	19	24	42	15	20	14	25	25	18	12	42
1997	7	14	18	15	23	19	10	12	19	14	12	9	23
1998	1	7	33	16	34	28	24	10	11	17	7	25	34
1999	10	18	16	28	19	16	14	12	20	23	16	23	28
2000	-	-	22	24	20	15	25	24	22	13	17	16	25
2001	1	9	6	9	27	14	19	13	24	28	-	26	28
2002	1	7	33	26	23	28	13	22	18	38	18	8	38
2003	10	3	17	16	23	33	12	13	17	-	13	15	33
2004	12	10	16	28	21	24	18	14	23	36	36	4	36
2005	10	16	10	14	65	18	12	7	17	17	-	10	65
2006	8	1	15	18	10	26	19	12	22	41	41	12	41
2007	0	-	-	-	20	28	12	29	7	15	16	19	29
2008	5	7	10	15	45	21	-	-	19	22	38	6	45
2009	14	13	12	30	22	23	15	27	6	22	20	1	30
2010	0	12	16	24	24	25	23	17	19	15	29	24	29
2011	5	13	17	24	18	15	16	9	77	25	23	20	77
2012	12	18	15	29	20	16	17	18	12	10	13	35	35
2013	0	10	7	20	-	15	18	28	9	22	30	8	30
2014	-	19	25	20	23	28	13	15	18	11	12	21	28
2015	6	3	15	13	11	37	27	12	23	12	18	4	37
2016	4	4	14	25	24	15	-	27	18	17	-	-	27
MED	7	11	17	21	23	20	18	17	18	21	22	13	17
MAX	21	38	36	62	65	37	27	30	77	45	65	40	77
MIN	0	1	5	4	10	10	10	7	6	4	7	0	0

Tabla A 5. Valores máximos mensuales de precipitación (mms) en 24 horas de la estación Australia

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1985	-	-	-	16	42	17	16	30	12	17	22	10	42
1986	5	28	18	11	14	21	25	9	10	27	17	6	28
1987	4	10	11	13	19	13	32	17	12	12	7	9	32
1988	5	8	5	12	20	12	17	21	16	20	16	9	21
1989	3	14	27	8	17	16	11	15	20	56	17	9	56
1990	12	17	19	34	21	30	22	20	10	18	11	17	34
1991	4	4	10	11	31	13	18	25	25	17	11	10	31
1992	6	11	17	32	10	9	17	18	18	11	28	14	32
1993	10	8	18	45	25	20	21	12	18	21	33	4	45
1994	6	9	20	19	38	19	28	21	10	26	17	10	38
1995	6	9	17	18	18	18	11	26	16	18	17	27	27
1996	15	22	30	14	45	15	20	19	31	9	20	22	45
1997	9	19	10	12	28	16	11	10	23	14	30	1	30
1998	2	10	19	10	41	19	21	15	9	41	22	13	41
1999	10	34	18	20	16	15	18	22	18	31	14	5	34
2000	7	10	24	15	31	20	23	22	22	22	15	7	31
2001	1	17	12	12	35	14	16	9	39	20	22	14	39
2002	7	4	13	21	30	45	24	15	13	35	22	10	45
2003	1	4	16	26	30	18	16	13	25	24	26	30	30
2004	4	13	14	21	28	21	27	14	31	30	16	5	31
2005	4	15	12	16	46	16	25	9	12	20	15	9	46
2006	8	5	17	27	27	22	21	20	11	30	39	19	39
2007	1	14	13	21	19	26	19	19	11	30	12	15	30
2008	6	13	21	40	26	18	37	21	12	32	25	12	40
2009	17	7	14	20	21	18	29	15	17	16	12	10	29
2010	1	17	17	23	25	31	34	11	22	17	34	22	34
2011	31	21	23	31	28	18	22	14	15	29	29	11	31
2012	12	16	16	20	13	13	29	21	21	21	22	30	30
2013	6	18	15	22	23	25	32	25	11	20	18	9	32
2014	5	8	9	22	24	28	18	15	13	23	25	19	28
2015	8	8	11	17	16	20	14	18	18	11	14	3	20
2016	0	15	9	17	18	15	15	32	-	-	-	-	32
MED	7	13	16	20	26	19	22	18	18	23	20	13	18
MAX	31	34	30	45	46	45	37	32	39	56	39	30	56
MIN	0	4	5	8	10	9	11	9	9	9	7	1	0

Tabla A 6. Valores máximos mensuales de precipitación (mms) en 24 horas de la estación Nazareth.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1984	-	-	-	-	-	-	-	-	22	15	59	5	59
1985	2	8	8	22	39	31	19	19	17	11	11	8	39
1986	10	8	8	13	22	30	23	14	13	19	8	8	30
1987	6	15	18	24	20	13	36	21	16	46	5	19	46
1988	1	-	12	13	28	19	23	23	11	20	14	13	28
1989	8	10	13	20	21	26	15	18	15	29	8	6	29
1990	13	12	25	26	119	37	33	11	17	7	13	10	119
1991	3	14	13	13	22	19	22	27	15	17	8	7	27
1992	11	9	14	23	32	21	21	24	23	5	9	4	32
1993	6	9	23	22	36	25	23	25	24	16	9	10	36
1994	8	8	10	23	28	26	32	17	14	10	16	8	32
1995	12	5	26	20	19	14	20	19	16	29	20	12	29
1996	8	19	-	-	30	13	26	31	24	13	24	20	31
1997	6	21	9	16	38	20	18	13	10	15	18	8	38
1998	2	12	23	12	43	24	28	17	9	27	11	10	43
1999	9	16	15	16	24	34	20	19	28	28	10	11	34
2000	13	13	26	17	30	12	17	19	22	27	13	18	30
2001	4	20	33	23	29	20	14	10	24	13	12	17	33
2002	4	2	19	20	31	48	44	26	18	35	18	16	48
2003	0	15	15	16	15	27	15	12	19	24	14	9	27
2004	3	18	-	22	19	23	28	12	15	31	16	3	31
2005	10	16	22	18	49	31	18	23	20	17	15	4	49
2006	11	5	14	29	50	18	16	19	17	33	23	6	50
2007	2	15	10	20	29	38	12	17	15	18	10	10	38
2008	5	12	18	17	20	17	11	18	16	11	33	14	33
2009	10	6	16	16	11	25	28	19	12	18	12	1	28
2010	2	10	28	26	38	18	36	13	25	17	35	22	38
2011	9	24	18	20	18	37	20	15	17	26	15	10	37
2012	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6
2013	4	14	11	30	28	45	18	19	15	18	10	11	45
2014	6	13	12	38	12	26	26	23	9	19	11	9	38
2015	9	8	18	15	15	18	29	15	18	7	9	9	29
2016	3	9	13	25	14	-	38	33	24	14	-	-	38
MED	6	12	17	20	30	25	24	19	18	20	16	10	18
MAX	13	24	33	38	119	48	44	33	28	46	59	22	119
MIN	0	2	8	12	11	12	11	10	9	5	5	1	0

Tabla A 7. Valores máximos mensuales de precipitación (mms) en 24 horas de la estación Monterredondo.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1980	32	0	36	52	39	92	34	30	47	40	28	0	92
1986	-	-	-	-	44	71	73	31	15	17	45	30	73
1987	8	43	45	37	26	51	101	28	30	29	42	32	101
1988	0	9	12	72	38	55	42	36	33	41	23	22	72
1989	13	23	20	33	-	35	43	38	69	50	17	14	69
1990	26	20	55	45	40	66	24	66	53	39	20	26	66
1991	3	49	20	18	31	43	51	84	88	22	13	8	88
1992	20	7	44	78	31	39	52	52	72	28	33	12	78
1993	23	8	52	46	38	38	37	40	36	30	20	26	52
1994	14	24	39	41	68	43	61	43	29	49	16	20	68
1995	17	4	17	68	34	53	21	37	32	49	22	20	68
1996	10	46	19	42	61	22	56	39	65	15	22	25	65
1997	20	24	70	21	-	27	60	34	31	27	14	10	70
1998	5	26	17	31	51	106	-	39	-	32	29	11	106
1999	27	17	27	29	68	77	32	38	35	48	37	16	77
2000	10	15	48	28	75	36	55	-	42	31	-	26	75
2001	8	-	27	27	52	50	39	40	34	37	33	28	52
2002	7	5	-	40	-	70	52	38	61	21	34	30	70
2003	0	9	31	-	-	45	63	55	38	48	24	14	63
2004	5	32	49	24	55	115	59	28	55	21	19	6	115
2005	37	27	21	46	63	67	-	42	57	24	-	9	67
2006	28	18	30	49	51	49	28	84	47	27	24	14	84
2007	7	10	21	28	34	30	33	45	44	18	24	13	45
2008	15	11	14	30	91	45	65	54	29	34	40	53	91
2009	14	10	20	40	19	73	61	49	29	26	26	16	73
2010	5	-	68	52	40	53	99	44	40	31	21	30	99
2011	9	15	22	26	44	27	30	27	38	45	33	15	45
2012	5	35	42	69	38	46	40	55	51	50	21	45	69
2013	3	28	16	28	52	48	66	44	25	35	29	14	66
2014	6	21	20	57	41	56	84	63	23	27	18	25	84
2015	30	12	42	60	40	39	60	45	22	31	19	11	60
MED	14	20	33	42	47	54	52	45	42	33	26	20	36
MAX	37	49	70	78	91	115	101	84	88	50	45	53	115
MIN	0	0	12	18	19	22	21	27	15	15	13	0	0

Tabla A 8. Valores máximos mensuales de precipitación (mms) en 24 horas de la estación Manzanares.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1980	100	32	60	125	91	139	51	56	130	95	90	107	139
1981	74	47	78	96	151	133	130	66	80	135	148	50	151
1982	30	50	74	136	48	80	91	84	110	-	-	-	136
1983	-	-	19	70	80	59	40	62	30	36	61	57	80
1984	46	33	-	-	35	179	45	37	32	23	18	19	179
1985	1	1	22	22	32	36	22	26	28	20	-	-	36
1987	-	-	-	-	-	-	130	88	83	35	45	40	130
1988	35	42	40	110	85	82	115	125	125	105	75	50	125
1989	35	45	30	70	130	74	78	65	100	130	80	50	130
1992	82	70	80	100	130	120	95	97	75	92	94	80	130
1993	76	40	90	92	95	40	72	110	76	65	59	58	110
1994	50	46	60	88	138	134	129	71	83	90	79	78	138
1995	70	25	50	80	80	120	50	148	90	100	100	70	148
1996	30	120	20	63	135	110	120	135	130	40	60	60	135
1997	50	70	110	100	70	110	130	130	70	135	125	30	135
1998	5	110	80	90	100	138	138	75	95	84	46	60	138
1999	-	50	-	43	100	87	50	60	68	67	105	70	105
2000	15	29	60	78	99	80	53	96	60	80	30	39	99
2001	20	38	63	62	73	95	90	90	126	55	60	60	126
2002	13	10	90	60	-	-	-	-	-	-	-	-	90
MED	43	48	60	83	92	101	86	85	84	77	75	58	74
MAX	100	120	110	136	151	179	138	148	130	135	148	107	179
MIN	1	1	19	22	32	36	22	26	28	20	18	19	1

Tabla A 9. Valores máximos mensuales de precipitación (mms) en 24 horas de la estación Susumuco.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1980	141	60	87	116	118	164	57	50	77	85	-	-	164
1981	78	73	91	57	94	133	104	57	129	127	146	64	146
1982	41	59	45	100	91	97	69	138	64	98	38	29	138
1983	37	89	19	110	48	118	94	78	110	86	65	56	118
1984	79	63	62	75	67	142	69	114	77	56	46	59	142
1985	20	15	49	54	138	168	106	154	36	99	23	19	168
1986	34	91	47	107	149	74	133	-	63	57	112	78	150
1987	21	99	65	80	61	123	135	97	129	134	51	63	135
1988	12	28	53	92	47	107	87	69	61	147	61	69	147
1989	36	74	58	57	46	75	47	132	58	97	54	26	132
1990	28	116	92	36	66	92	67	83	71	69	48	110	116
1991	43	51	30	79	128	143	103	88	127	79	30	7	143
1992	59	16	65	50	83	79	55	102	132	69	56	30	132
1993	54	17	53	120	86	73	88	60	63	64	23	77	120
1994	28	49	20	110	130	107	112	95	65	80	32	52	131
1995	72	10	40	92	91	92	52	119	94	92	97	30	119
1996	30	103	18	79	91	42	108	73	137	44	48	46	137
1997	34	57	140	122	137	72	129	124	93	165	101	22	165
1998	9	88	45	65	116	136	114	98	45	67	89	28	136
1999	72	38	47	58	86	106	63	60	82	52	81	26	106
2000	18	27	59	43	110	58	64	107	105	90	58	58	110
2001	13	32	26	61	100	103	58	83	106	51	88	38	106
2002	12	15	92	64	107	138	95	95	75	84	64	67	138
2003	1	15	86	48	64	87	51	68	91	83	46	76	91
2004	13	73	67	91	78	134	143	130	150	50	133	13	150
2005	25	56	20	84	90	119	105	63	166	67	75	49	166
2006	64	52	74	123	100	85	57	148	109	73	47	46	148
2007	23	17	53	53	36	127	93	86	55	64	82	-	127
2008	6	13	25	45	156	96	94	123	60	85	53	154	156
2009	39	15	76	82	45	-	61	83	44	62	92	26	92
2010	0	40	84	-	73	77	145	74	61	55	86	96	145
2011	52	6	51	79	75	65	97	60	80	33	68	23	97
2012	4	61	52	101	80	69	52	80	89	55	62	107	107
2013	3	48	60	106	99	51	80	57	49	48	34	52	106
2014	44	50	47	136	113	87	98	74	43	57	30	55	136
2015	110	20	55	87	72	57	101	61	50	50	80	45	110
MED	38	48	57	82	91	100	89	91	85	77	66	53	73
MAX	141	116	140	136	156	168	145	154	166	165	146	154	168
MIN	0	6	18	36	36	42	47	50	36	33	23	7	0

Tabla A 10. Valores máximos mensuales de precipitación (mms) en 24 horas de la estación Acacias.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1980	14	37	79	70	115	105	50	55	52	136	63	36	136
1981	26	-	96	102	120	98	83	67	70	112	126	102	126
1982	22	38	45	116	68	95	46	64	123	138	107	49	138
1983	28	55	90	81	70	55	89	84	80	82	77	101	101
1984	70	70	41	111	100	101	81	91	83	121	48	51	121
1985	0	5	50	90	96	122	70	80	61	121	90	31	122
1986	31	62	61	94	99	60	82	49	131	120	77	37	131
1987	31	41	84	80	64	79	94	35	49	125	112	109	125
1988	3	9	49	45	104	88	54	106	71	113	124	26	124
1989	30	49	104	36	72	84	50	85	71	89	124	72	124
1990	73	99	126	92	86	92	62	47	45	55	80	52	126
1991	14	47	59	82	84	101	41	41	74	93	104	32	104
1992	41	21	65	47	76	119	65	80	128	52	86	110	128
1993	40	27	65	75	81	69	78	123	81	88	82	82	123
1994	31	30	95	95	125	135	124	73	60	135	77	21	135
1995	76	5	45	107	99	83	85	51	63	114	117	98	117
1996	10	107	29	95	115	110	107	63	130	123	97	95	130
1997	68	75	96	90	124	106	47	60	112	78	98	7	125
1998	23	60	58	121	131	85	57	58	130	75	131	40	131
1999	46	91	57	115	99	123	46	89	78	99	74	25	123
2000	9	51	69	92	98	52	53	75	57	107	106	112	112
2001	54	14	105	95	135	109	72	49	84	90	50	64	135
2002	3	52	135	66	92	132	130	135	65	135	44	72	135
2003	0	26	60	98	100	120	54	36	98	135	111	52	135
2004	8	70	56	115	85	164	92	43	90	68	128	130	164
2005	20	121	38	76	104	58	126	67	58	120	96	29	126
2006	62	7	125	88	89	80	63	61	92	67	123	87	125
2007	4	7	93	136	86	88	75	81	85	60	81	30	136
2008	67	19	16	54	100	60	104	63	115	99	103	64	115
2009	70	15	67	118	103	85	78	87	42	55	68	48	118
2010	0	36	85	87	136	98	81	57	85	55	120	132	136
2011	53	19	61	132	83	80	67	67	40	64	170	80	170
2012	17	52	112	86	-	-	-	-	60	130	112	76	130
2013	0	45	62	80	90	130	82	60	38	131	75	40	131
2014	25	90	55	103	72	100	70	61	40	-	-	85	103
2015	28	7	99	140	88	52	110	53	46	80	136	48	140
MED	30	45	73	92	97	95	76	68	77	99	98	65	76
MAX	76	121	135	140	136	164	130	135	131	138	170	132	170
MIN	0	5	16	36	64	52	41	35	38	52	44	7	0

Tabla A 11. Valores máximos mensuales de precipitación (mms) en 24 horas de la estación Nare.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1980	17	0	35	41	53	110	69	145	55	48	60	4	145
1981	0	35	50	80	101	42	30	136	27	60	22	49	136
1982	12	12	35	60	130	49	79	58	81	50	69	64	130
1983	17	55	54	47	29	62	58	59	27	84	34	63	84
1984	23	22	44	75	50	55	140	110	65	33	35	21	140
1985	0	0	-	-	-	-	-	90	101	47	31	0	101
1986	0	11	37	83	90	134	91	40	90	51	34	20	134
1987	0	29	38	84	62	52	33	77	138	75	81	16	138
1988	2	4	74	28	40	77	43	33	49	49	101	41	101
1989	7	15	31	-	34	31	38	144	83	33	43	0	144
1990	35	45	68	60	72	100	56	113	36	48	22	82	113
1991	0	22	75	64	81	69	113	25	45	40	27	0	113
1992	0	36	33	95	49	81	95	61	96	55	26	0	96
1993	13	20	103	60	47	54	39	61	63	68	50	23	103
1994	5	24	60	42	47	52	92	56	49	75	56	17	92
1995	52	8	37	99	28	100	45	112	57	81	24	24	112
1996	0	37	27	60	103	47	63	58	42	95	44	53	103
1997	0	30	34	57	117	77	39	60	105	81	50	0	117
1998	0	21	100	82	85	40	47	78	59	95	48	17	100
1999	29	29	51	136	67	92	44	49	88	99	42	45	136
2000	17	9	78	87	67	68	72	132	40	42	36	32	132
2001	0	17	34	121	105	68	32	56	150	58	123	38	150
2002	13	0	76	103	120	71	50	80	10	41	10	55	120
2003	0	10	102	83	60	50	10	60	30	52	52	24	102
2004	0	8	45	102	13	102	22	50	20	30	40	54	102
2005	22	105	35	124	82	75	62	55	36	89	58	11	124
2006	64	10	28	48	53	70	33	36	50	82	44	24	82
2007	0	25	39	129	92	92	60	128	33	81	187	17	187
2008	0	21	13	76	87	53	38	18	28	38	36	17	87
2009	48	60	30	72	47	56	65	55	34	85	41	13	85
2010	0	28	85	136	22	129	100	79	66	89	93	22	136
2011	38	12	36	70	80	82	100	90	80	85	39	53	100
2012	0	9	84	44	56	52	90	77	77	80	45	38	90
2013	0	32	45	71	81	39	111	38	73	32	34	7	111
2014	5	7	22	83	74	56	160	45	73	48	26	12	160
2015	27	12	15	56	46	72	34	33	24	26	45	56	72
MED	12	23	50	78	67	70	64	72	61	62	50	28	53
MAX	64	105	103	136	130	134	160	145	150	99	187	82	187
MIN	0	0	13	28	13	31	10	18	10	26	10	0	0

Apéndice F. Valores de caudales extremos por estación.

Tabla A 12. Valores máximos mensuales de caudales (m³/seg) de la estación Caseteja-Delicias

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1980	504	74	363	768	1315	662	700	677	531	837	242	177	1315
1981	40	77	78	210	597	388	303	300	330	291	427	86	597
1982	145	77	185	641	505	395	619	340	346	273	81	73	641
1983	295	314	151	466	466	291	969	698	914	154	90	139	969
1984	73	158	37	81	275	565	414	1246	142	190	582	62	1246
1985	15	36	31	169	1440	597	363	286	438	727	237	130	1440
1986	36	224	594	106	641	680	680	622	338	424	95	74	680
1987	38	212	106	201	368	606	927	-	-	-	-	-	927
1988	42	79	32	148	196	332	537	544	247	563	142	154	563
1989	57	60	220	233	514	753	567	331	158	632	141	251	753
1990	184	89	578	730	574	748	342	428	323	263	330	182	748
1991	31	110	85	154	373	458	634	762	250	202	202	69	762
1992	87	21	87	361	301	200	391	376	402	118	101	84	402
1993	59	73	89	259	207	488	483	483	380	197	172	84	488
1994	-	-	-	-	402	-	807	892	488	578	429	407	892
1995	121	-	-	216	254	339	336	521	194	173	197	50	521
1996	42	196	165	318	730	393	644	396	334	555	386	136	730
1997	81	450	174	354	860	208	796	350	214	145	58	51	860
1998	61	139	94	213	454	555	572	461	132	267	158	195	572
1999	105	431	214	402	402	487	448	552	487	283	229	108	552
2000	115	172	294	533	788	338	407	507	455	405	316	100	788
2001	112	119	71	224	774	585	321	428	555	65	69	65	774
2002	50	35	81	176	562	692	644	407	217	319	120	50	692
2003	30	38	95	118	373	390	292	205	230	252	120	144	390
2004	42	67	168	195	439	562	781	305	595	442	448	195	781
2005	143	205	150	419	581	483	867	392	1316	477	801	85	1316
2006	228	55	533	1005	911	1650	694	670	1424	573	573	30	1650
2007	15	24	50	324	589	1146	638	966	350	346	276	210	1146
2008	68	56	254	299	867	694	889	501	404	549	911	52	911
2009	100	146	114	241	397	746	1288	662	326	246	132	112	1288
2010	57	90	260	266	509	678	1288	266	352	128	977	232	1288
2011	-	-	157	370	1005	271	243	116	192	153	153	122	1005
2012	39	132	139	210	392	757	308	-	-	-	153	308	757
2013	35	48	-	-	-	-	243	322	-	-	-	-	322
2014	-	-	-	-	-	-	243	-	-	-	-	-	243
MED	95	129	182	325	578	567	591	500	421	349	292	132	347
MAX	504	450	594	1005	1440	1650	1288	1246	1424	837	977	407	1650
MIN	15	21	31	81	196	200	243	116	132	65	58	30	15

Tabla A 13. Valores mínimos mensuales de caudales (m³/seg) de la estación Caseteja-Delicias.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS	SEPT	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1980	23	16	16	24	55	71	101	66	69	64	52	41	16
1981	36	35	36	36	64	81	94	63	65	66	58	28	28
1982	20	20	16	60	55	70	106	75	59	55	44	27	16
1983	23	18	19	20	78	66	93	106	77	67	43	31	18
1984	20	20	18	16	28	107	98	130	88	47	44	19	16
1985	11	9	9	12	20	83	86	64	78	73	70	8	8
1986	30	26	43	30	57	107	207	86	54	59	33	23	23
1987	11	10	11	9	60	72	146	-	-	-	-	-	9
1988	10	10	8	12	36	58	158	109	86	55	57	32	8
1989	20	17	22	24	38	104	85	78	63	53	38	21	17
1990	17	20	19	32	78	120	80	82	75	67	61	45	17
1991	14	12	13	19	43	64	154	93	95	55	55	29	12
1992	21	8	10	15	40	57	66	84	56	56	52	39	8
1993	36	34	36	40	57	64	139	125	102	61	53	41	34
1994	-	-	-	-	42	-	126	98	68	47	75	93	42
1995	22	-	-	26	90	132	107	90	69	53	37	24	22
1996	22	27	26	25	57	162	167	87	63	66	55	45	22
1997	23	21	21	34	46	26	63	87	49	37	32	18	18
1998	38	36	35	46	87	111	181	97	80	78	71	60	35
1999	58	60	62	67	101	121	112	108	108	113	69	50	50
2000	47	46	47	52	72	107	86	100	78	82	58	51	46
2001	46	45	46	48	57	80	106	103	58	49	54	48	45
2002	31	27	25	36	52	114	82	71	44	34	38	30	25
2003	25	24	24	31	49	64	52	77	64	57	49	40	24
2004	30	29	33	38	87	101	128	125	95	188	109	113	29
2005	95	95	88	95	30	82	60	64	68	75	54	23	23
2006	19	15	17	39	70	82	72	62	73	62	21	15	15
2007	12	11	11	15	33	56	103	94	74	60	50	40	11
2008	29	26	26	29	39	70	132	64	54	33	19	13	13
2009	47	44	44	50	61	59	110	100	84	76	67	57	44
2010	52	49	54	60	95	115	90	74	65	65	49	44	44
2011	-	-	41	42	62	50	50	51	45	45	42	41	41
2012	35	35	35	42	54	53	61	-	-	-	36	35	35
2013	32	32	-	-	-	-	46	46	-	-	-	-	32
2014	-	-	-	-	-	-	46	-	-	-	-	-	46
MED	30	28	29	35	57	85	103	86	71	64	51	38	57
MAX	95	95	88	95	101	162	207	130	108	188	109	113	207
MIN	10	8	8	9	20	26	46	46	44	33	19	8	8

Tabla A 14. Valores máximos mensuales de caudales (m³/seg) de la estación Puente Carretera.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1980	781	114	562	1191	2039	2447	717	789	1100	1036	334	459	2447
1981	104	281	754	539	820	783	754	344	476	532	643	367	820
1982	128	96	180	544	686	544	934	560	560	630	464	245	934
1983	386	317	386	702	589	550	835	685	813	914	372	485	914
1984	231	418	89	345	569	1047	681	1157	519	486	334	139	1157
1985	54	49	125	215	1545	600	530	691	407	646	285	115	1545
1986	85	465	778	669	710	846	1583	932	506	506	438	194	1583
1987	89	310	669	540	352	710	914	608	567	479	547	280	914
1988	73	130	57	239	313	527	692	791	629	641	561	595	791
1989	82	119	101	598	745	950	612	474	447	810	290	260	950
1990	282	180	746	1360	944	920	551	567	740	468	422	788	1360
1991	135	214	119	406	685	685	713	1133	713	980	908	150	1133
1992	115	40	620	430	546	718	1152	1092	553	553	294	133	1152
1993	112	104	346	1446	689	948	1190	1038	939	992	1306	1919	1919
1994	122	181	946	-	1144	-	-	-	-	-	-	-	1144
2009	501	610	528	742	770	788	788	825	537	575	696	426	825
2010	81	580	880	742	880	650	880	550	834	816	696	811	880
MED	198	248	464	669	825	857	845	765	646	692	537	460	600
MAX	781	610	946	1446	2039	2447	1583	1157	1100	1036	1306	1919	2447
MIN	54	40	57	215	313	527	530	344	407	468	285	115	40

Tabla A 15. Valores mínimos mensuales de caudales (m³/seg) de la estación Puente Carretera.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS	SEPT	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1980	44	30	31	46	103	161	161	102	132	141	96	61	30
1981	38	35	38	36	138	154	152	123	122	121	101	66	35
1982	33	34	31	123	159	155	205	193	173	167	175	86	31
1983	47	41	60	55	135	134	183	199	106	106	67	60	41
1984	38	40	42	43	72	145	124	152	126	68	59	57	38
1985	33	29	29	35	48	178	178	194	108	70	38	11	11
1986	32	30	48	55	86	148	188	118	78	105	54	50	30
1987	30	27	45	69	94	110	172	115	91	86	54	38	27
1988	22	22	19	26	63	99	159	146	111	92	93	86	19
1989	33	27	45	40	47	103	117	92	84	92	58	40	27
1990	50	52	50	86	119	166	150	94	82	73	62	47	47
1991	37	36	38	40	77	101	308	158	105	90	106	40	36
1992	35	33	34	35	61	127	141	138	98	69	58	35	33
1993	28	25	24	57	106	126	179	135	101	91	84	44	24
1994	36	33	39		158	-	-	-	-	-	-	-	33
2009	420	394	418	405	394	422	254	215	43	58	46	78	43
2010	60	57	144	149	158	236	369	231	192	129	126	326	57
MED	60	56	67	81	119	160	190	150	110	97	80	70	103
MAX	420	394	418	405	394	422	369	231	192	167	175	326	422
MIN	22	22	19	26	47	99	117	92	43	58	38	11	11

Tabla A 16. Valores máximos mensuales de caudales (m³/seg) de la estación Bajo Nare

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1984	228	761	276	617	1102	1129	1043	920	732	790	515	404	1129
1985	74	62	58	273	934	1090	734	796	792	649	673	615	1090
1986	97	208	466	707	854	1238	1551	824	886	886	685	336	1551
1987	-	-	-	-	-	719	-	-	589	788	673	555	788
1988	176	106	39	167	604	922	891	758	710	566	694	486	922
1989	236	121	303	427	853	1017	767	681	821	726	518	372	1017
1990	270	340	571	782	886	1038	802	591	571	391	571	699	1038
1991	109	190	294	670	960	796	850	796	712	652	734	319	960
1998	-	-	-	-	890	1034	886	838	710	596	886	338	1034
1999	201	634	399	888	768	782	638	649	596	729	554	338	888
2000	99	235	389	905	918	961	944	918	952	969	918	693	969
2001	-	-	-	294	672	725	672	588	703	425	418	335	725
2002	-	-	-	672	1061	1205	838	1090	747	738	776	260	1205
2003	39	-	-	916	957	1003	953	738	850	863	593	628	1003
2004	84	241	353	792	1012	1132	1080	1085	893	533	945	950	1132
2005	180	529	111	898	1023	1044	950	769	462	875	1002	223	1044
2006	322	159	792	971	1158	-	-	960	1054	1132	861	-	1158
2007	-	-	436	500	663	860	852	784	517	653	784	-	860
2009	-	-	-	-	636	667	822	708	879	757	-	-	879
MED	163	299	345	655	901	982	903	811	739	720	711	472	642
MAX	322	761	792	971	1158	1238	1551	1090	1054	1132	1002	950	1551
MIN	39	62	39	167	604	719	638	588	462	391	418	223	39

Tabla A 17. Valores mínimos mensuales de caudales (m³/seg) de la estación Bajo Nare.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1984	65	54	61	66	203	447	328	302	268	275	229	78	54
1985	52	51	51	51	244	463	344	392	390	267	298	109	51
1986	56	43	66	148	345	421	461	368	291	450	174	93	43
1987	-	-	-	-	-	241	-	-	308	302	260	277	241
1988	50	39	31	67	241	376	494	319	169	263	253	114	31
1989	84	51	94	104	346	550	375	309	205	328	199	71	51
1990	55	65	58	164	630	573	437	204	171	153	174	112	55
1991	44	41	44	54	436	385	530	267	322	220	170	40	40
1998	-	-	-	-	384	713	694	354	182	208	238	273	182
1999	77	81	101	157	560	474	402	357	290	394	257	128	77
2000	21	7	18	100	536	593	441	265	221	405	211	77	7
2001	-	-	-	26	58	171	95	94	81	48	44	26	26
2002	-	-	-	87	101	407	351	308	235	155	90	43	43
2003	25	-	-	64	318	470	369	251	272	161	184	53	25
2004	32	25	39	124	489	741	460	270	159	129	173	101	25
2005	52	47	35	58	343	371	252	248	138	170	196	39	35
2006	26	28	33	254	667	-	-	378	200	317	321	-	26
2007	-	-	33	94	356	531	336	312	239	166	220	-	33
2009	-	-	-	-	86	279	551	377	354	554	-	-	86
MED	49	44	51	101	368	466	398	294	230	245	205	102	213
MAX	84	81	101	254	667	741	694	392	390	450	321	277	741
MIN	21	7	18	26	58	171	95	94	81	48	44	26	7

Tabla A 18. Proyección de la precipitación (mm) para el periodo de retorno de 2 años con el multiescenario de cambio climático por subcuenca.

D (min)	S 1			S 2			S 3			S 4			S 5			S 6			S 7			S 8			S 9		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4
20	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
30	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6
40	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7
50	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	1.1	1.2	1.1	1.3	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1
60	7.0	6.6	6.4	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	5.9	5.9	5.9	6.3	6.3	6.4	6.3	6.6	6.7	6.3	6.0	6.2	5.8	6.7	6.7	6.2	5.9	5.9	5.9
70	1.9	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.7	1.6	1.7	1.5	1.8	1.8	1.7	1.6	1.6	1.6
80	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
90	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6
100	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5
110	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
120	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4

D (min)	S 10			S 11			S 12			S 13			S 14			S 15			S 16			S 17		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0.4	0.4	0.4	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
20	0.5	0.5	0.5	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1
30	0.6	0.6	0.6	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3
40	0.7	0.8	0.7	1.3	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.3	1.2	1.3	1.5	1.6	1.5	1.7	1.7	1.7
50	1.1	1.1	1.1	2.0	2.0	1.9	2.1	2.1	2.0	2.0	2.1	2.0	2.1	2.3	2.2	1.8	1.8	1.9	2.2	2.3	2.2	2.5	2.5	2.4
60	5.9	6.0	5.9	10.6	10.8	10.1	11.1	11.2	10.9	10.9	11.0	10.9	10.3	10.8	10.5	8.8	8.7	8.9	10.5	10.9	10.5	11.8	11.8	11.7
70	1.6	1.6	1.6	2.8	2.9	2.7	2.9	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9	3.0	3.2	3.1	2.6	2.5	2.6	3.1	3.2	3.1	3.5	3.5	3.4
80	0.9	0.9	0.9	1.6	1.6	1.5	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.8	1.8	1.5	1.5	1.5	1.8	1.8	1.8	2.0	2.0	2.0
90	0.7	0.7	0.6	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.4	1.3	1.1	1.1	1.1	1.3	1.4	1.3	1.5	1.5	1.5
100	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9	0.9	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2
110	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	0.9	1.1	1.1	1.0
120	0.4	0.4	0.4	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9

Nota. P= Períodos de proyección, S= Subcuenca, D= Duración

Tabla A 19. Proyección de la precipitación (mm) para el periodo de retorno de 5 años con el multiescenario de cambio climático por subcuenca.

D (min)	S 1			S 2			S 3			S 4			S 5			S 6			S 7			S 8			S 9		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
20	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
30	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7
40	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
50	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.4	1.3	1.4	1.3	1.5	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3
60	8.3	7.7	7.5	7.4	7.5	7.4	7.4	7.5	7.4	7.5	7.6	7.4	7.7	7.9	7.4	7.1	7.3	6.9	7.9	7.9	7.3	7.7	7.7	6.9	6.9	7.0	6.9
70	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.1	2.1	2.0	1.9	1.9	1.8	2.1	2.1	1.9	2.1	2.1	1.8	1.8	1.9	1.8
80	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0
90	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8
100	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6
110	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
120	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

D (min)	S 10			S 11			S 12			S 13			S 14			S 15			S 16			S 17		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0.5	0.5	0.5	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.1	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.1	1.0	1.2	1.2	1.2
20	0.6	0.6	0.6	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3
30	0.7	0.7	0.7	1.2	1.3	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	1.4	1.5	1.4	1.6	1.6	1.6
40	0.9	0.9	0.9	1.6	1.6	1.5	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.8	1.8	1.5	1.5	1.5	1.8	1.8	1.8	2.0	2.0	2.0
50	1.3	1.3	1.3	2.3	2.4	2.2	2.4	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.6	2.6	2.2	2.1	2.2	2.6	2.7	2.6	2.9	2.9	2.9
60	7.0	7.1	6.9	12.6	12.7	11.9	13.1	13.2	12.8	12.8	12.9	12.8	12.0	12.6	12.3	10.3	10.1	10.4	12.3	12.7	12.3	13.8	13.8	13.7
70	1.9	1.9	1.8	3.3	3.4	3.2	3.5	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4	3.5	3.7	3.6	3.0	3.0	3.1	3.6	3.7	3.6	4.0	4.0	4.0
80	1.0	1.1	1.0	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0	2.1	2.1	1.7	1.7	1.8	2.1	2.1	2.1	2.3	2.3	2.3
90	0.8	0.8	0.8	1.4	1.4	1.3	1.4	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.6	1.6	1.3	1.3	1.3	1.6	1.6	1.6	1.8	1.8	1.7
100	0.6	0.6	0.6	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.1	1.1	1.1	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4
110	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9	0.9	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2
120	0.5	0.5	0.5	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1

Nota. P= Períodos de proyección, S= Subcuenca, D= Duración.

Tabla A 20. Proyección de la precipitación (mm) para el periodo de retorno de 10 años con el multiescenario de cambio climático por subcuenca.

D (min)	S 1			S 2			S 3			S 4			S 5			S 6			S 7			S 8			S 9		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
20	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6
30	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8
40	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0
50	1.8	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.6	1.5	1.6	1.5	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5
60	9.4	8.8	8.5	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.6	8.4	8.8	8.9	8.4	8.0	8.3	7.8	9.0	9.0	8.3	8.8	8.8	7.8	7.8	7.9	7.8
70	2.5	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.3	2.2	2.3	2.4	2.2	2.1	2.2	2.1	2.4	2.4	2.2	2.3	2.3	2.1	2.1	2.1	2.1
80	1.4	1.3	1.3	1.2	1.3	1.2	1.2	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
90	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
100	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7
110	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6
120	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5

D (min)	S 10			S 11			S 12			S 13			S 14			S 15			S 16			S 17		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0.6	0.6	0.6	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3
20	0.7	0.7	0.6	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.4	1.3	1.1	1.1	1.1	1.3	1.4	1.3	1.5	1.5	1.5
30	0.8	0.8	0.8	1.4	1.4	1.3	1.5	1.5	1.4	1.4	1.5	1.4	1.5	1.6	1.6	1.3	1.3	1.3	1.6	1.6	1.6	1.8	1.8	1.8
40	1.0	1.0	1.0	1.8	1.8	1.7	1.9	1.9	1.8	1.8	1.9	1.8	1.9	2.0	2.0	1.7	1.6	1.7	2.0	2.1	2.0	2.2	2.2	2.2
50	1.5	1.5	1.5	2.7	2.7	2.5	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7	2.7	2.8	3.0	2.9	2.4	2.4	2.5	2.9	3.0	2.9	3.3	3.3	3.2
60	7.9	8.1	7.8	14.2	14.4	13.5	14.8	15.0	14.5	14.5	14.7	14.5	13.5	14.2	13.8	11.6	11.4	11.8	13.8	14.3	13.8	15.6	15.6	15.4
70	2.1	2.1	2.1	3.8	3.8	3.6	3.9	4.0	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	4.1	4.0	3.4	3.3	3.4	4.0	4.2	4.0	4.5	4.5	4.5
80	1.2	1.2	1.2	2.1	2.1	2.0	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.3	2.4	2.3	2.0	1.9	2.0	2.3	2.4	2.3	2.6	2.6	2.6
90	0.9	0.9	0.9	1.6	1.6	1.5	1.6	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.8	1.8	1.5	1.4	1.5	1.7	1.8	1.7	2.0	2.0	1.9
100	0.7	0.7	0.7	1.3	1.3	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.5	1.4	1.2	1.2	1.2	1.4	1.5	1.4	1.6	1.6	1.6
110	0.6	0.6	0.6	1.1	1.1	1.0	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.2	1.0	1.0	1.1	1.2	1.3	1.2	1.4	1.4	1.4
120	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9	0.9	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2

Nota. P= Períodos de proyección, S= Subcuenca, D= Duración.

Tabla A 21. Proyección de la precipitación (mm) para el periodo de retorno de 25 años con el multiescenario de cambio climático por subcuenca.

D (min)	S 1			S 2			S 3			S 4			S 5			S 6			S 7			S 8			S 9		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
20	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8
30	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
40	1.4	1.3	1.3	1.2	1.3	1.2	1.2	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
50	2.1	1.9	1.9	1.8	1.9	1.8	1.8	1.9	1.8	1.9	1.9	1.8	1.9	2.0	1.8	1.8	1.8	1.7	2.0	2.0	1.8	1.9	1.9	1.7	1.7	1.7	1.7
60	11.0	10.4	10.1	9.9	10.0	9.9	9.9	10.0	9.9	10.0	10.2	9.9	10.4	10.5	9.9	9.4	9.8	9.2	10.6	10.6	9.8	10.3	10.3	9.2	9.2	9.3	9.2
70	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.7	2.6	2.8	2.8	2.6	2.5	2.6	2.4	2.8	2.8	2.6	2.7	2.7	2.5	2.5	2.5	2.5
80	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.5	1.4	1.5	1.4	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4
90	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0	1.1	1.0	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0
100	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8
110	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7
120	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6

D (min)	S 10			S 11			S 12			S 13			S 14			S 15			S 16			S 17		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0.7	0.7	0.7	1.2	1.2	1.1	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4	1.1	1.1	1.2	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5
20	0.8	0.8	0.8	1.4	1.4	1.3	1.4	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.6	1.6	1.3	1.3	1.3	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7
30	0.9	0.9	0.9	1.7	1.7	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.9	1.8	1.5	1.5	1.6	1.8	1.9	1.8	2.1	2.1	2.0
40	1.2	1.2	1.2	2.1	2.1	2.0	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.3	2.4	2.3	1.9	1.9	2.0	2.3	2.4	2.3	2.6	2.6	2.6
50	1.7	1.8	1.7	3.1	3.2	3.0	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	3.3	3.5	3.4	2.8	2.8	2.9	3.4	3.5	3.4	3.8	3.8	3.8
60	9.3	9.5	9.2	16.8	17.0	15.9	17.5	17.6	17.1	17.1	17.3	17.1	15.8	16.6	16.2	13.5	13.3	13.7	16.2	16.8	16.2	18.2	18.2	18.0
70	2.5	2.5	2.5	4.5	4.5	4.2	4.6	4.7	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.8	4.7	4.0	3.9	4.0	4.7	4.9	4.7	5.3	5.3	5.3
80	1.4	1.4	1.4	2.5	2.5	2.4	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.7	2.8	2.7	2.3	2.2	2.3	2.7	2.8	2.7	3.1	3.1	3.0
90	1.0	1.1	1.0	1.9	1.9	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0	2.1	2.0	1.7	1.7	1.7	2.0	2.1	2.0	2.3	2.3	2.3
100	0.8	0.9	0.8	1.5	1.5	1.4	1.6	1.6	1.5	1.5	1.6	1.5	1.6	1.7	1.7	1.4	1.4	1.4	1.7	1.7	1.7	1.9	1.9	1.9
110	0.7	0.7	0.7	1.3	1.3	1.2	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.5	1.4	1.2	1.2	1.2	1.4	1.5	1.4	1.6	1.6	1.6
120	0.6	0.6	0.6	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.1	1.1	1.1	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4

Nota. P= Períodos de proyección, S= Subcuenca, D= Duración.

Tabla A 22. Proyección de la precipitación para el periodo de retorno de 50 años con el multiescenario de cambio climático por subcuenca.

D (mi n)	S 1			S 2			S 3			S 4			S 5			S 6			S 7			S 8			S 9		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
20	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
30	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0
40	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.4	1.5	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	1.3	1.3	1.3	1.3
50	2.3	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2	2.1	2.2	2.2	2.1	2.0	2.1	1.9	2.3	2.3	2.1	2.2	2.2	2.0	2.0	2.0	2.0
60	12.	11.	11.	11.	11.	11.	11.	11.	11.	11.	11.	11.	11.	11.	11.	10.	11.	10.	12.	12.	11.	11.	11.	10.	10.	10.	10.
	5	7	4	2	3	2	2	3	2	3	5	2	7	9	2	7	1	4	0	0	1	7	7	5	5	6	5
70	3.3	3.1	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.1	3.0	3.1	3.2	3.0	2.8	3.0	2.8	3.2	3.2	2.9	3.1	3.1	2.8	2.8	2.8	2.8
80	1.9	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.7	1.6	1.7	1.6	1.8	1.8	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6
90	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.3	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
100	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	0.9	0.9	1.0	0.9
110	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8
120	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7

D (min)	S 10			S 11			S 12			S 13			S 14			S 15			S 16			S 17		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0.8	0.8	0.8	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.6	1.5	1.3	1.3	1.3	1.5	1.6	1.5	1.7	1.7	1.7
20	0.9	0.9	0.9	1.6	1.6	1.5	1.6	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.8	1.7	1.5	1.4	1.5	1.7	1.8	1.7	2.0	2.0	1.9
30	1.0	1.1	1.0	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0	2.1	2.1	1.7	1.7	1.8	2.1	2.1	2.1	2.3	2.3	2.3
40	1.3	1.4	1.3	2.4	2.4	2.3	2.5	2.5	2.4	2.4	2.5	2.4	2.5	2.7	2.6	2.2	2.2	2.2	2.6	2.7	2.6	2.9	2.9	2.9
50	2.0	2.0	2.0	3.6	3.6	3.4	3.7	3.7	3.6	3.6	3.7	3.6	3.7	3.9	3.8	3.2	3.1	3.2	3.8	3.9	3.8	4.3	4.3	4.2
60		10.	10.	19.	19.	18.	19.	20.	19.	19.	19.	19.	17.	18.	18.	15.	15.	15.	18.	18.	18.	20.		
	10.6	8	5	0	2	0	8	0	4	4	6	4	7	6	2	2	0	5	2	9	2	4	20.4	20.2
70	2.8	2.9	2.8	5.1	5.1	4.8	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.4	5.3	4.5	4.4	4.5	5.3	5.5	5.3	6.0	6.0	5.9
80	1.6	1.6	1.6	2.8	2.9	2.7	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9	3.0	3.1	3.1	2.6	2.5	2.6	3.1	3.2	3.1	3.4	3.4	3.4
90	1.2	1.2	1.2	2.1	2.1	2.0	2.2	2.2	2.1	2.1	2.2	2.1	2.2	2.4	2.3	1.9	1.9	2.0	2.3	2.4	2.3	2.6	2.6	2.6
100	1.0	1.0	0.9	1.7	1.7	1.6	1.8	1.8	1.7	1.7	1.8	1.7	1.8	1.9	1.9	1.6	1.6	1.6	1.9	2.0	1.9	2.1	2.1	2.1
110	0.8	0.8	0.8	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.7	1.6	1.4	1.3	1.4	1.6	1.7	1.6	1.8	1.8	1.8
120	0.7	0.7	0.7	1.3	1.3	1.2	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.5	1.4	1.2	1.2	1.2	1.4	1.5	1.4	1.6	1.6	1.6

Nota. P= Períodos de proyección, S= Subcuenca, D= Duración.

Tabla A 23. Proyección de la precipitación para el periodo de retorno de 100 años con el multiescenario de cambio climático por subcuenca.

D (mi n)	S 1			S 2			S 3			S 4			S 5			S 6			S 7			S 8			S 9		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
20	1.2	1.1	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
30	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
40	1.8	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.6	1.5	1.6	1.5	1.7	1.7	1.6	1.7	1.7	1.5	1.5	1.5	1.5
50	2.7	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.4	2.3	2.4	2.2	2.5	2.5	2.3	2.5	2.5	2.2	2.2	2.2	2.2
60	14.	13.	12.	12.	12.	12.	12.	12.	12.	12.	13.	12.	13.	13.	12.	12.	12.	11.	13.	13.	12.	13.	13.	11.	11.	12.	11.
	2	3	9	7	8	7	7	8	7	8	0	7	3	5	7	1	6	8	6	6	6	3	3	8	8	0	8
70	3.8	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.5	3.4	3.5	3.6	3.4	3.2	3.3	3.1	3.6	3.6	3.3	3.5	3.5	3.1	3.1	3.2	3.1
80	2.1	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	1.9	1.8	1.9	1.8	2.0	2.0	1.9	2.0	2.0	1.8	1.8	1.8	1.8
90	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.4	1.3	1.4	1.3	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	1.3	1.3	1.3	1.3
100	1.3	1.2	1.2	1.1	1.2	1.1	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1
110	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
120	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8

D (min)	S 10			S 11			S 12			S 13			S 14			S 15			S 16			S 17		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0.9	0.9	0.9	1.6	1.6	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.8	1.7	1.4	1.4	1.5	1.7	1.8	1.7	1.9	1.9	1.9
20	1.0	1.0	1.0	1.8	1.8	1.7	1.9	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	2.0	2.0	1.6	1.6	1.7	2.0	2.0	2.0	2.2	2.2	2.2
30	1.2	1.2	1.2	2.1	2.2	2.0	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.3	2.4	2.3	2.0	1.9	2.0	2.3	2.4	2.3	2.6	2.6	2.6
40	1.5	1.5	1.5	2.7	2.7	2.6	2.8	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8	2.9	3.0	2.9	2.5	2.4	2.5	2.9	3.0	2.9	3.3	3.3	3.3
50	2.2	2.3	2.2	4.0	4.1	3.8	4.2	4.2	4.1	4.1	4.2	4.1	4.2	4.4	4.3	3.6	3.5	3.6	4.3	4.4	4.3	4.8	4.8	4.8
60	12.	12.	11.	21.	21.	20.	22.	22.	22.	22.	22.	22.	20.	21.	20.	17.	16.	17.	20.	21.	20.	23.	23.	22.
	0	2	8	5	8	4	4	6	0	0	2	0	0	0	5	1	9	4	4	2	4	0	0	8
70	3.2	3.2	3.1	5.7	5.8	5.4	6.0	6.0	5.8	5.8	5.9	5.8	5.8	6.1	6.0	5.0	4.9	5.1	6.0	6.2	6.0	6.7	6.7	6.7
80	1.8	1.8	1.8	3.2	3.2	3.1	3.3	3.4	3.3	3.3	3.3	3.3	3.4	3.5	3.4	2.9	2.8	2.9	3.4	3.6	3.4	3.9	3.9	3.8
90	1.3	1.3	1.3	2.4	2.4	2.3	2.5	2.5	2.4	2.4	2.5	2.4	2.5	2.7	2.6	2.2	2.1	2.2	2.6	2.7	2.6	2.9	2.9	2.9
100	1.1	1.1	1.1	1.9	2.0	1.8	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.1	2.2	2.1	1.8	1.8	1.8	2.1	2.2	2.1	2.4	2.4	2.4
110	0.9	0.9	0.9	1.7	1.7	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.9	1.8	1.5	1.5	1.6	1.8	1.9	1.8	2.1	2.1	2.0
120	0.8	0.8	0.8	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.7	1.6	1.4	1.3	1.4	1.6	1.7	1.6	1.8	1.8	1.8

Nota. P= Períodos de proyección, S= Subcuenca, D= Duración.

Apéndice G. Hidrogramas de creciente de entrada y salida del escenario actual y de cambio climático de la cuenca del río Guayuriba

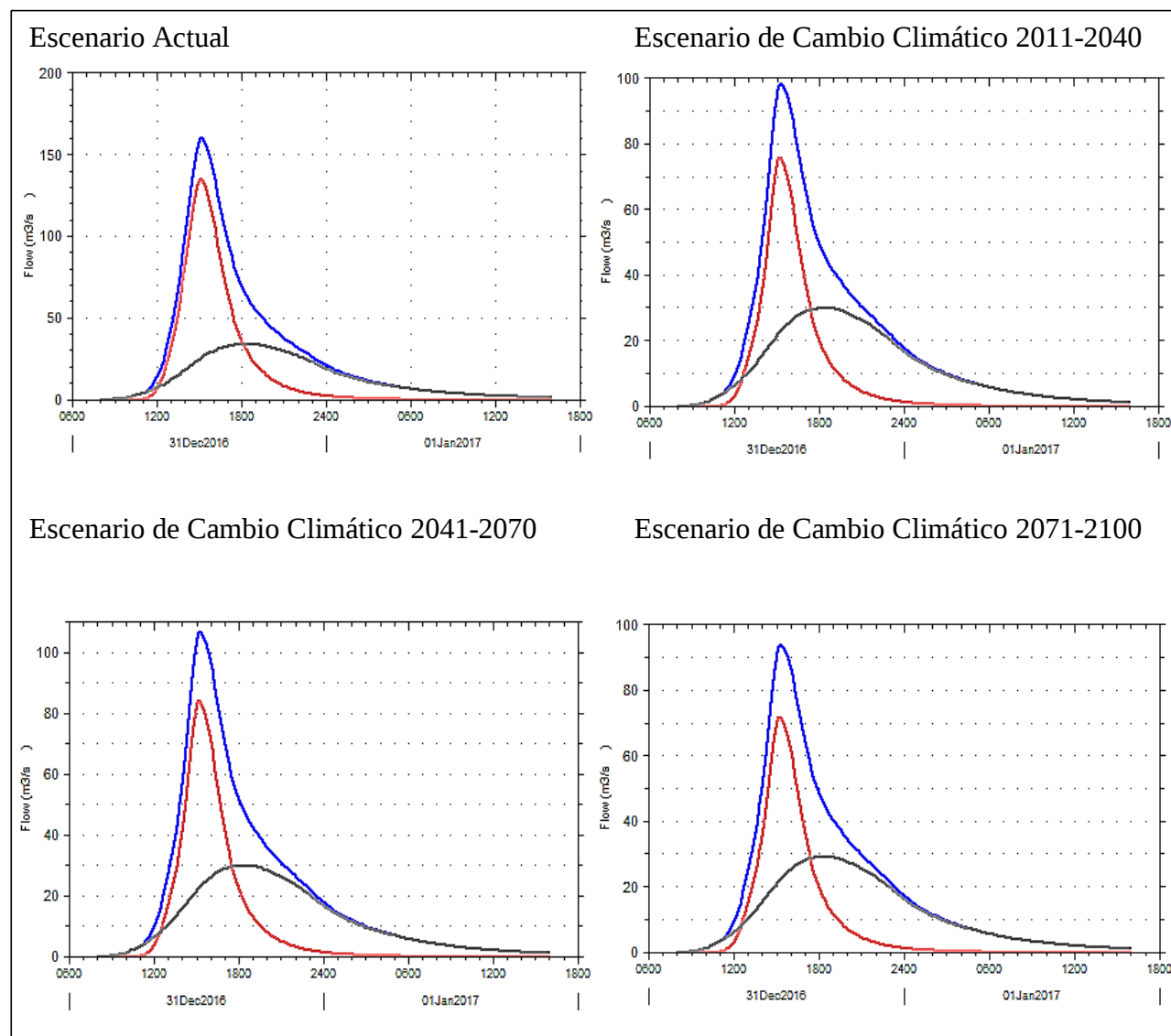


Figura A 3. Hidrograma Unitario Sintético por escenario para el $T=2$ años. La línea roja es el caudal resultante hasta la penúltima subcuenca sobre el tramo 16-17, la línea azul es el caudal de salida y la gris es el caudal generado por la subcuenca Baja del río Guayuriba.

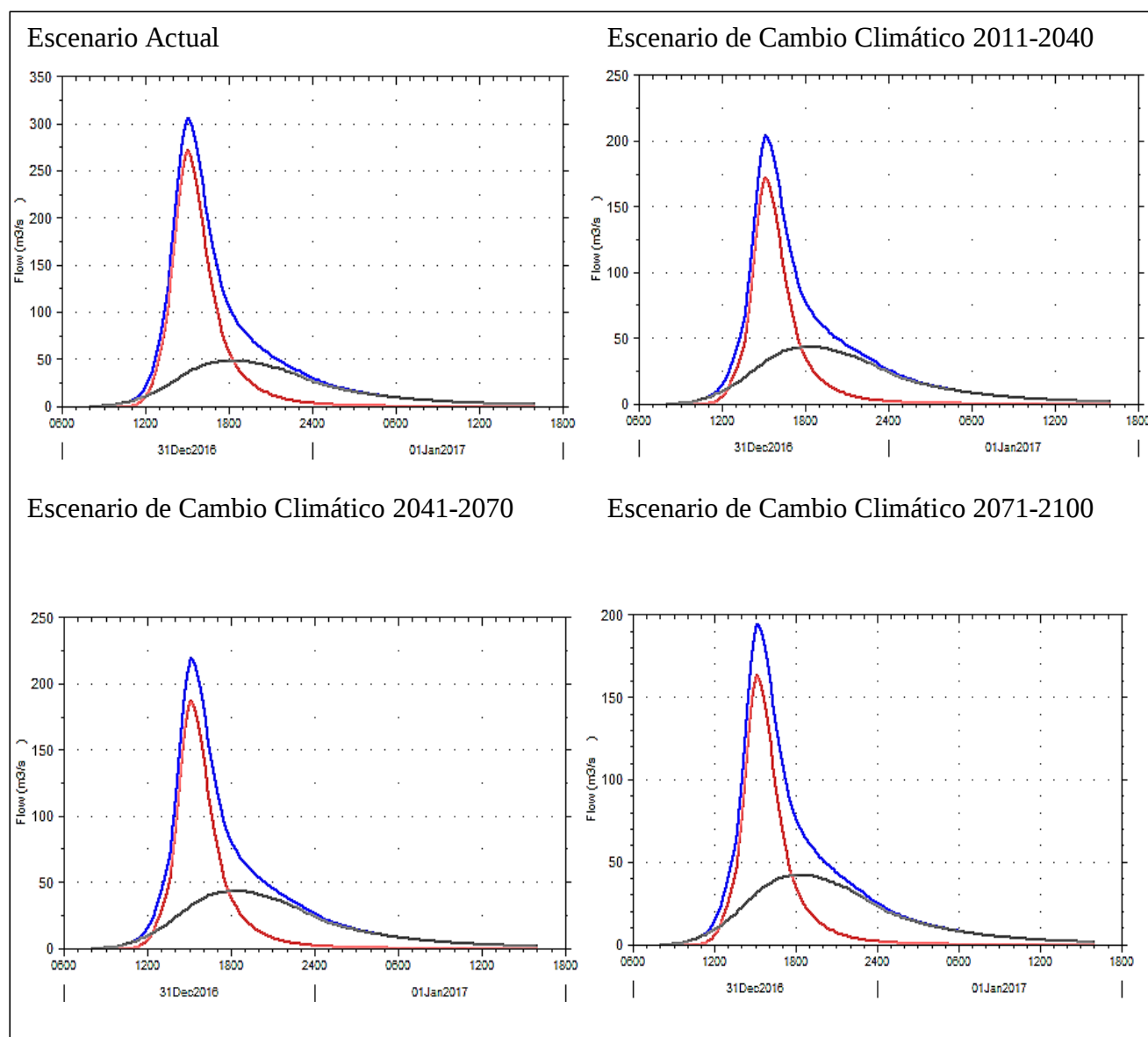


Figura A 4. Hidrograma Unitario Sintético por escenario para el T=5 años. La línea roja es el caudal resultante hasta la penúltima subcuenca sobre el tramo 16-17, la línea azul es el caudal de salida y la gris es el caudal generado por la subcuenca Baja del río Guayuriba.

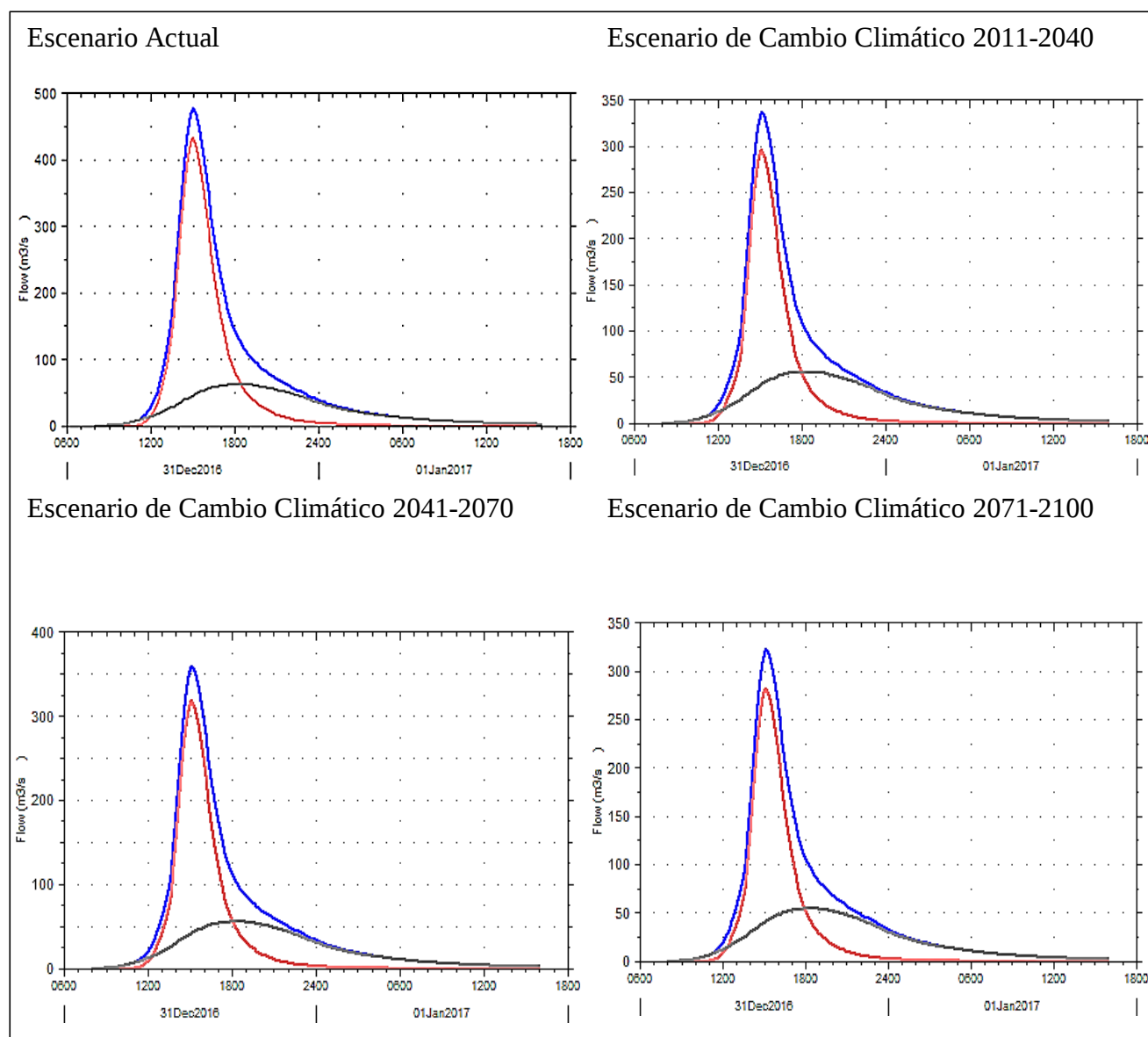


Figura A 5. Hidrograma Unitario Sintético por escenario para el $T = 10$ años. La línea roja es el caudal resultante hasta la penúltima subcuenca sobre el tramo 16-17, la línea azul es el caudal de salida y la gris es el caudal generado por la subcuenca Baja del río Guayuriba.

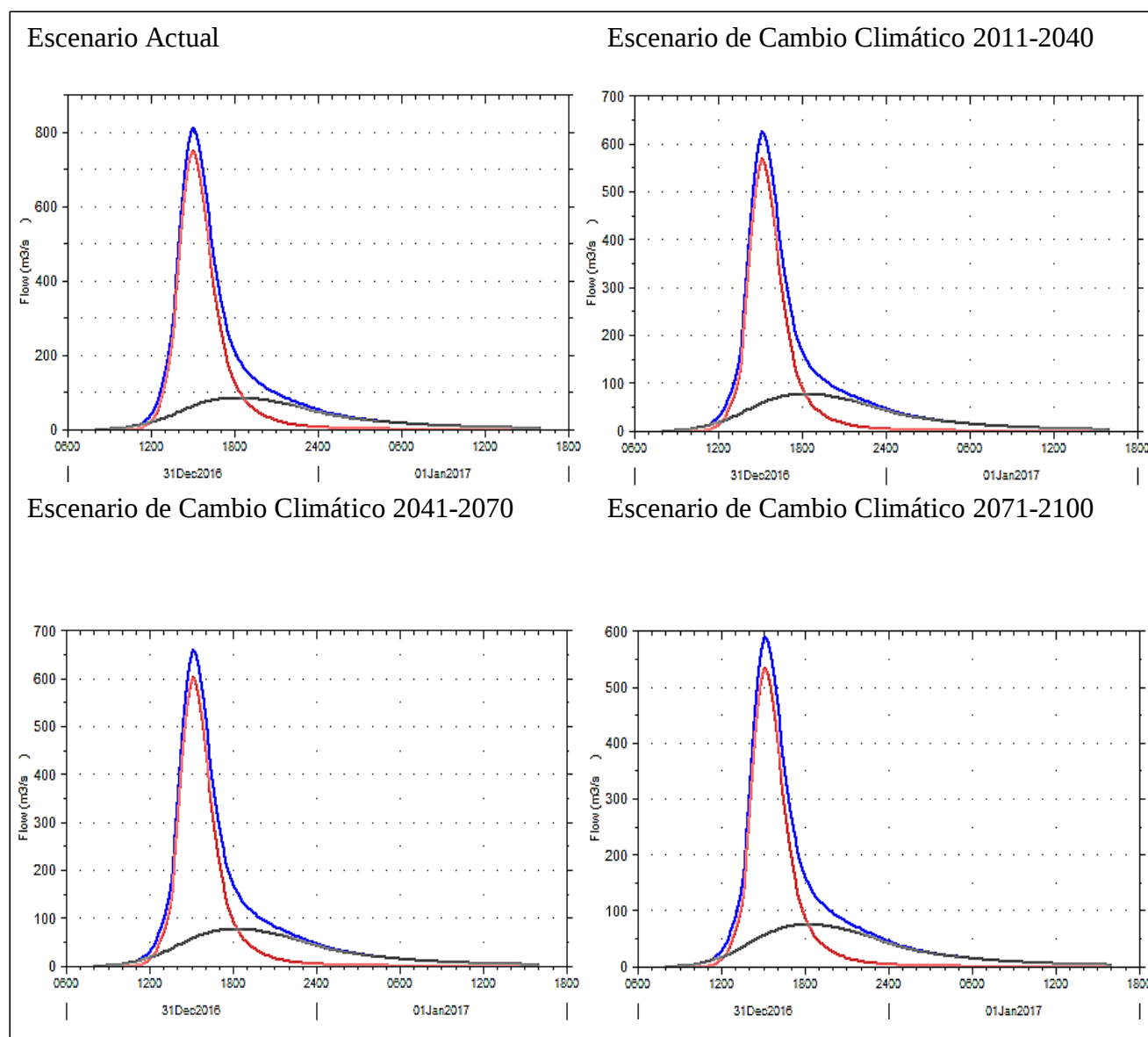


Figura A 6. Hidrograma Unitario Sintético por escenario para el $T = 25$ años. La línea roja es el caudal resultante hasta la penúltima subcuenca sobre el tramo 16-17, la línea azul es el caudal de salida y la gris es el caudal generado por la subcuenca Baja del río Guayuriba.

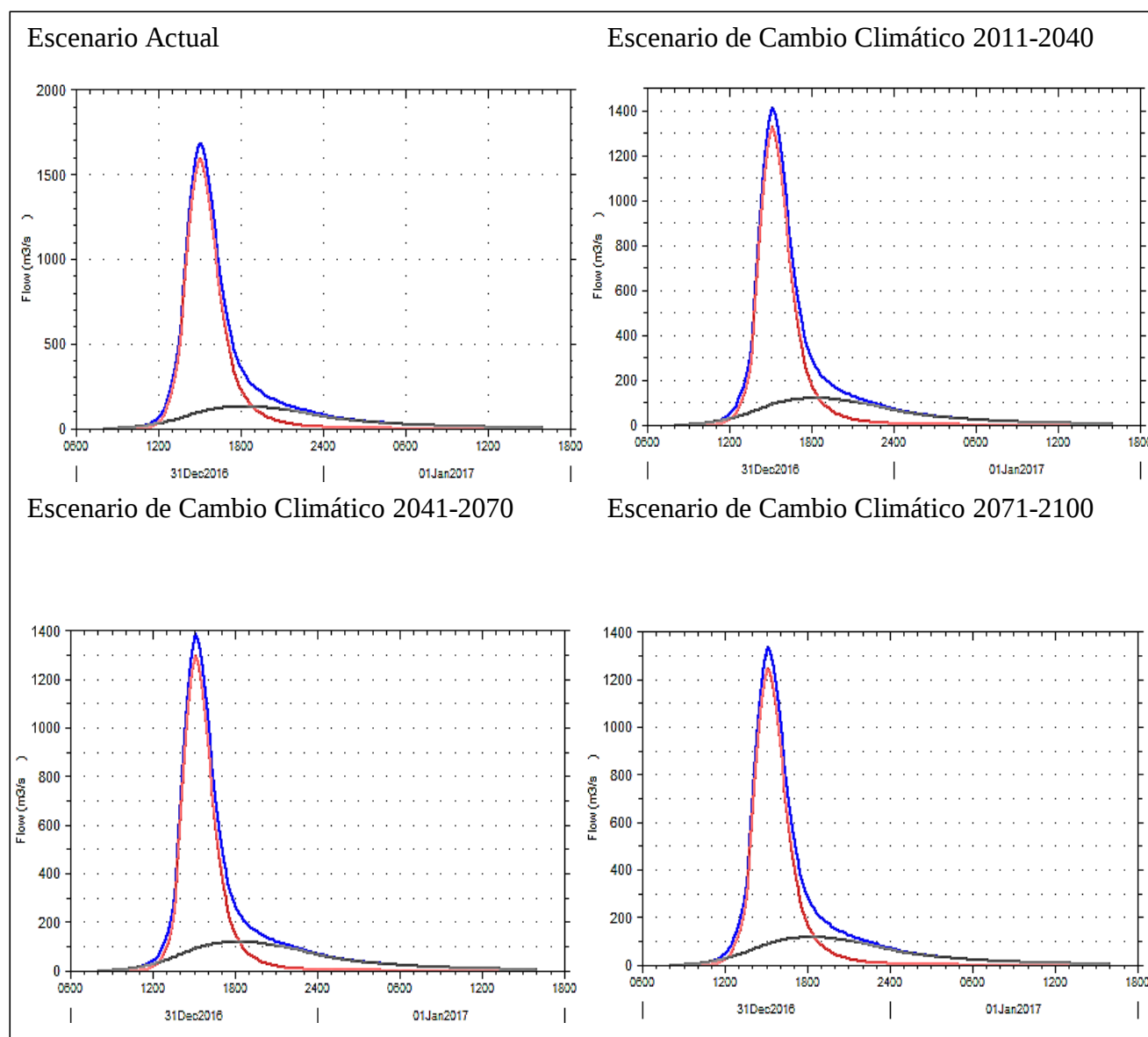


Figura A 7. Hidrograma Unitario Sintético por escenario para el T = 100 años. La línea roja es el caudal resultante hasta la penúltima subcuenca sobre el tramo 16-17, la línea azul es el caudal de salida y la gris es el caudal generado por la subcuenca Baja del río Guayuriba.

Apéndice H. Descripción de los elementos hidrológicos del modelo lluvia-escorrentía.

Elemento Hidrológico	Descripción
Subcuenca (Subbasin)	Se usa para representar la cuenca física. Dada la precipitación, la salida de agua de la subcuenca se calcula restando las pérdidas a la precipitación y transformando el exceso de precipitación en caudal en el punto de salida de la subcuenca, sumando finalmente el caudal base.
Tramo (Reach)	Se usa para transportar el agua generada en algún punto de la cuenca hacia aguas abajo hasta otro punto de la cuenca, definidos ambos en el modelo de la cuenca. la respuesta de este transporte es un retardo y una atenuación del hidrograma de entrada.
Unión (Junction)	Se usa para sumar flujos de agua que provienen de elementos hidrológicos situados aguas arriba de la unión. La respuesta es simplemente la suma de los hidrogramas de todos los elementos conectados a la unión.
Sumidero (Sink)	Se usa para representar el punto de salida de la cuenca. La entrada puede provenir de uno o más elementos situados aguas arriba del sumidero. Este elemento no tiene salida.

Nota. Tomado del Manual Básico de HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1. (Nanía, 2007)

Apéndice I. Hietogramas de las estaciones de la cuenca del río Guayuriba

