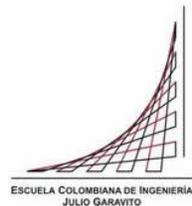


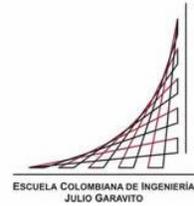
**Maestría en Ingeniería Civil**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA  
HIDROLOGÍA SUPERFICIAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL  
LAGO DE TOTA, BOYACÁ.**

**Juan Sebastián Barrera Sarmiento**

**Bogotá, D.C., 2 de febrero de 2021**



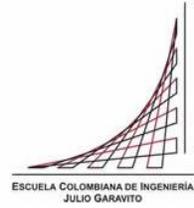


# **EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA HIDROLOGÍA SUPERFICIAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL LAGO DE TOTA, BOYACÁ.**

**Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil,  
con énfasis en Ingeniería Ambiental**

**Germán Eduardo Acero Riveros**  
**Director**

**Bogotá, D.C., 2 de febrero de 2021**



La tesis de maestría titulada “EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA HIDROLOGÍA SUPERFICIAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL LAGO DE TOTA, BOYACÁ.”, presentada por JUAN SEBASTIÁN BARRERA SARMIENTO, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental.

---

GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS  
Director de trabajo de Grado

---

MARIA CAROLINA ROMERO PEREIRA  
Jurado

---

JUAN SEBASTIÁN SALAZAR HENAO  
Jurado

Bogotá, D.C. 2 de febrero de 2021

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por ser la Institución en la que pude expandir horizontes académicos e investigativos que me permitieron desarrollar este trabajo de grado, a cada profesor que me dio clases y que compartieron su experiencia y conocimiento en su campo, y especialmente a mi director Germán Eduardo Acero por impulsar y guiar el desarrollo de esta investigación.

A mi familia por ser el soporte de mi educación, por su constante y amoroso apoyo, por la colaboración y disposición a brindarme diferentes puntos de vista y ayudarme a enfocar mis objetivos de vida para mejorar en cada aspecto personal y crecer como persona.

A Ana Lucía Moreno Arias por ser la compañera cuya constante, determinada y cariñosa personalidad me dieron el impulso personal para continuar y sacar adelante este proyecto, al ser quien soportó muchos disgustos, frustraciones y sobre todo éxitos a lo largo del desarrollo de este trabajo.

## RESUMEN

La cuenca del lago de Tota como principal fuente abastecedora de recursos hídricos para la provincia de Sugamuxi del departamento de Boyacá, Colombia; suministra agua potable para cerca de 250.000 personas, surte distritos de riego, industrias y otras actividades económicas de la región. La cuenca del Lago, considerada de alta montaña, se encuentra rodeada por el complejo de páramos Tota – Bijagüal – Mamapacha, un ecosistema estratégico por sus servicios ambientales, especialmente la provisión y regulación hídrica, vulnerable ante la incertidumbre de la afectación que pueda traer el cambio climático a sus servicios ecosistémicos. Frente a esta problemática, este trabajo busca determinar cómo afectaría el calentamiento global la hidrología superficial de los caudales de subcuencas instrumentadas, así como la disponibilidad de recurso hídrico al mediano plazo (2020 – 2049). Con series de datos de estaciones hidrológicas y climáticas del Instituto de Meteorología, Hidrología y Estudios Ambientales (IDEAM) que se encuentran en la cuenca y su zona de influencia, se calibró y validó un modelo hidrológico Precipitación – Escorrentía basado en la contabilidad de humedad del suelo con el programa HEC-HMS; en las subcuencas del río Hato Laguna, quebrada Los Pozos y río Olarte. Mediante el modelo Auto Regresivo de Media Móvil (ARMA  $p, q$ ) se calcularon posibles cambios de temperatura y precipitación de cada subcuenca, generando el primer escenario de cambio climático denominado ES1; a la vez que se definieron los escenarios ES2 y ES3, a partir del ensamble multiescenario y RCP 8.5 del informe “*Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100*” del IDEAM. Se concluye que la oferta hídrica no se verá afectada negativamente por el cambio climático global, pues se esperan incrementos entre el 5% y 30% de la precipitación en las subcuencas analizadas, lo que incrementaría los caudales entre un 3% y 37% dependiendo del escenario. Mediante el cálculo del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) se observó que las subcuencas Hato Laguna y Olarte tendrían menor capacidad de regulación, mientras que en la quebrada los Pozos este indicador mejoraría. Sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos se observan crecidas de caudal de mayor magnitud que podrían impactar negativamente la agricultura, industria piscícola y vías de la región. Así mismo, el incremento de la temperatura aumentaría las pérdidas por evapotranspiración, situación que a largo plazo reduciría el caudal base en temporadas secas de las corrientes que abastecen el Lago de Tota.

Palabras claves: modelación hidrológica, cambio climático, recurso hídrico, páramo, lago de Tota.

## ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN .....	13
Objetivos .....	14
1.1. Objetivo General .....	14
1.2. Objetivos Específicos .....	14
2. Marco Conceptual .....	15
2.1. Cambio Climático .....	15
2.2. Modelación Hidrológica .....	16
2.2.1. Modelación hidrológica y cambio climático .....	18
2.3. Páramos y sus características hidrológicas .....	19
2.3.1. Cambio climático en los páramos .....	21
2.3.2. Estudios hidrológicos y de cambio climático en páramos de Colombia .....	22
3. Metodología .....	24
3.1. Ubicación geográfica .....	24
3.2. Diagnóstico ambiental del recurso hídrico .....	24
3.3. Calibración y Validación del Modelo hidrológico de Precipitación – Escorrentía .....	25
3.3.5. Optimización del modelo hidrológico. ....	32
3.3.6. Validación del modelo hidrológico .....	34
3.4. Escenarios de cambio climático .....	34
3.4.1. Escenarios de temperatura. ....	34
3.4.2. Escenarios de precipitación .....	35
3.4.3. Escenarios de Evapotranspiración. ....	36
3.4.4. Efecto de los escenarios de cambio climático en la disponibilidad y permanencia de caudales .....	38
4. Resultados y Discusión .....	41
4.1. Estado Actual del recurso hídrico de la cuenca del Lago de Tota .....	41
4.1.1. Gestión Ambiental del Recurso Hídrico .....	41

4.1.2.	Calidad del Recurso Hídrico.....	54
4.1.3.	Oferta y Demanda del Recurso Hídrico.....	66
4.2.	Modelación Hidrológica.....	71
4.2.1.	Corrección y reparación de datos.....	71
4.2.2.	Calibración y validación.....	77
4.2.3.	Análisis de resultados modelación hidrológica.....	93
4.3.	Escenarios de cambio climático.....	100
4.3.1.	Escenarios de cambio en la Temperatura.....	100
4.3.2.	Escenarios de cambio en la Precipitación.....	103
4.3.3.	Escenarios de cambio en la Evapotranspiración.....	106
4.4.	Efectos de los escenarios de cambio climático en la disponibilidad y permanencia de Caudales.....	110
4.4.1.	Subcuenca río Hato Laguna.....	110
4.4.2.	Subcuenca quebrada Los Pozos.....	113
4.4.3.	Subcuenca río Olarte.....	116
5.	Conclusiones.....	120
6.	Recomendaciones.....	126
7.	Referencias Bibliográficas.....	128
Anexos	.....	147

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones Hidroclimatológicas de la cuenca del Lago de Tota.....	27
Tabla 2. Parámetros de la cuenca para modelo soil moisture accounting HEC-HMS. ....	31
Tabla 3. Calificación por índice de inversión ambiental municipios de la cuenca Lago de Tota. 46	
Tabla 4. Programa de manejo de recurso hídrico y calidad de Agua, POMCA lago de Tota .....	51
Tabla 5. ICA promedio anual con 5 y 6 variables estación Escaleras, Lago de Tota. ....	56
Tabla 6. Parámetros de calidad de agua en la Cuenca del Lago de Tota 2015-2019.....	58
Tabla 7. IRCA Urbano municipios que captan del lago de Tota.....	63
Tabla 8. IRCA rural veredas en la cuenca del Lago de Tota.....	63
Tabla 9. Concesiones de agua reglamentadas por Corpoboyacá, cuenca del lago de Tota. ....	68
Tabla 10. Concesión de agua reglamentada por Corpoboyacá, Captación El Túnel .....	68
Tabla 11. Coeficientes de correlación estaciones de precipitación. ....	71
Tabla 12. Coeficientes de correlación estaciones de caudal. ....	73
Tabla 13. Coeficientes de correlación estaciones de temperatura.....	75
Tabla 14. Coberturas del suelo en subcuenca Hato Laguna. ....	78
Tabla 15. Resultados calibración de parámetros subcuenca Hato Laguna.....	79
Tabla 16. Eficiencia del modelo en subcuenca Hato Laguna.....	81
Tabla 17. Volumen de flujo total observado y simulado subcuenca Hato Laguna.....	82
Tabla 18. Cobertura del suelo en subcuenca Los Pozos. ....	84
Tabla 19. Parámetros optimizados calibración de subcuenca Los Pozos.....	84
Tabla 20. Eficiencia del modelo en subcuenca Los Pozos. ....	86
Tabla 21. Volumen de flujo total observado y simulado subcuenca Los Pozos. ....	87
Tabla 22. Cobertura del suelo en subcuenca Olarte.....	89
Tabla 23. Parámetros optimizados calibración subcuenca Olarte.....	90
Tabla 24. Eficiencia del modelo Subcuenca Olarte.....	91
Tabla 25. Volumen de flujo total observado y simulado Subcuenca Olarte.....	93
Tabla 26. Conflictos en uso del suelo de subcuencas Hato Laguna, Olarte y Los Pozos. ....	94
Tabla 27. Coeficientes de escorrentía en cuencas de páramo. ....	99
Tabla 28. Comparación decadal del aumento en la temperatura media (°C) de ES1, ES2 y ES3 respecto al periodo 1989-2018.....	102
Tabla 29. Resultados Modelo ARMA y Cambios de precipitación para ES1, ES2 y ES3.....	105
Tabla 30. Comparativo ET0 (mm) por fórmula de Turc e IDEAM subcuencas de estudio periodo 1981-2010.....	107

Tabla 31. Cambio medio mensual y anual de la ET0 (mm) de subcuencas en estudio para ES1, ES2 y ES3..... 108

Tabla 32. Volumen de Flujo acumulado simulado Subcuenca río Hato Laguna para ES1, ES2 y ES3..... 111

Tabla 33. IRH y caudal ambiental subcuenca río Hato Laguna para ES1, ES2 y ES3..... 112

Tabla 34. Volumen de Flujo simulado acumulado Subcuenca quebrada Los Pozos para ES1, ES2 y ES3 ..... 114

Tabla 35. IRH y caudal ambiental subcuenca Quebrada Los Pozos para ES1, ES2 y ES3..... 115

Tabla 36. Volumen de Flujo acumulado simulado Subcuenca río Olarte para ES1, ES2 y ES3. .... 117

Tabla 37. IRH y caudal ambiental subcuenca Río Olarte para ES1, ES2 y ES3..... 118

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Temperatura para distintos escenarios RCP de emisiones de GEI.....	16
Figura 2. Clasificación de los modelos Hidrológicos.....	17
Figura 3. Ubicación geográfica Cuenca Lago de Tota.....	25
Figura 4. Esquema del modelo Soil Moisture Accounting HEC-HMS.....	26
Figura 5. Código de generación de series sintéticas de precipitación diaria.....	37
Figura 6. Sistema de tratamiento de aguas residuales de Aquitania.....	65
Figura 7. Precipitaciones medias mensuales estaciones de estudio.....	72
Figura 8. Caudal Medio Mensual estaciones estudio.....	74
Figura 9. Temperatura media mensual cuenca Lago de Tota 1989-2018.....	76
Figura 10. Subcuenca Hato Laguna en HEC-HMS.....	77
Figura 11. Caudal observado y simulado calibración subcuenca Hato Laguna.....	80
Figura 12. Caudales acumulados simulado y observado, calibración subcuenca Hato Laguna.....	80
Figura 13. Caudal observado y simulado validación subcuenca Hato Laguna.....	81
Figura 14. Caudales acumulados simulado y observado, validación subcuenca Hato Laguna.....	82
Figura 15. Subcuenca Los Pozos en HEC-HMS.....	83
Figura 16. Caudal observado y simulado calibración subcuenca Los Pozos.....	85
Figura 17. Caudal observado y simulado acumulado calibración subcuenca Los Pozos.....	85
Figura 18. Caudal observado y simulado validación subcuenca Los Pozos.....	86
Figura 19. Caudal simulado y observado acumulado validación subcuenca Los Pozos.....	87
Figura 20. Subcuenca Olarte en HEC-HMS.....	88
Figura 21. Caudal modelado y observado calibración subcuenca Olarte.....	89
Figura 22. Caudal acumulado simulado y observado calibración subcuenca Olarte.....	91
Figura 23. Caudal observado y modelado validación subcuenca Olarte.....	92
Figura 24. Caudal acumulado simulado y observado validación subcuenca Olarte.....	92
Figura 25. Anomalías anuales de precipitación periodo de calibración y validación.....	98
Figura 26. Proyecciones de temperatura en ES1, ES2 y ES3.....	101
Figura 27. Comparativo del aumento de temperatura ES1, ES2, y ES3 con respecto al periodo 1989-2018.....	103
Figura 28. Anomalías de precipitación estaciones de estudio (1979 – 2018).....	104
Figura 29. Precipitación mensual proyectada estaciones de estudio para ES1, ES2 y ES3. ...	106
Figura 30. Caudales simulados subcuenca Hato Laguna para ES1, ES2 y ES3.....	112

Figura 31. Curvas de duración de caudales medios diarios río Hato Laguna periodo de referencia vs ES1, ES2 y ES3.....	113
Figura 32. Caudales simulados subcuenca Los Pozos para ES1, ES2 y ES3. ....	115
Figura 33. Curvas de duración de caudales medios diarios quebrada Los Pozos, periodo de referencia vs ES1, ES2 y ES3. ....	116
Figura 34. Caudales simulados subcuenca río Olarte para ES1, ES2 y ES3.....	118
Figura 35. Curvas de duración de caudales medios diarios Subcuenca Río Olarte, periodo de referencia vs ES1, ES2 y ES3. ....	119

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Metas del programa Gestión del riesgo de desastres y cambio climático para la paz de Boyacá. ....	44
Cuadro 2. Metas del sub-programa adaptación y mitigación al cambio climático desde la gestión del riesgo.....	44
Cuadro 3. Análisis de ejecución de programa de Gestión de riesgo de desastres y cambio climático en Boyacá. ....	45
Cuadro 4. Ejecución de recursos de programa gestión ambiental municipio de Tota. ....	47
Cuadro 5. Metas programa de ecoeficiencia y sostenibilidad Incluyente, Sogamoso 2016-2019 .....	48
Cuadro 6. Ejecución de proyectos subprograma Gestión Integral del recurso hídrico. ....	54
Cuadro 7. Calidad trófica de lagos según diferentes autores.....	59
Cuadro 8. Demanda hídrica actual de la Cuenca del Lago de Tota. ....	69
Cuadro 9. Precipitación media mensual y anual estaciones de estudio (mm).....	72
Cuadro 10. Caudal medio mensual y anual en estaciones de estudio (m3/s). ....	74
Cuadro 11. Temperatura mínima, máxima y media mensual y anual (1989-2018) (°C).....	76
Cuadro 12. Evapotranspiración potencial en estaciones de alta montaña. ....	94

## INTRODUCCIÓN

El efecto de la actividad antropogénica sobre el planeta es indiscutible, y los impactos que la civilización humana moderna tiene sobre los ecosistemas del mundo conllevan graves consecuencias como contaminación de la atmósfera, fuentes hídricas y suelos (Adedeji, Reuben, & Olatoye, 2014). La región Andina de Colombia ha sido colonizada durante varios siglos, lo que ha tenido efectos negativos en diferentes ámbitos naturales, sociales y económicos. Al aprovechamiento insostenible de los recursos naturales se debe agregar una amenaza relativamente reciente: el cambio climático global (Franco, Delgado & Andrade, 2013). Este fenómeno climático afecta de manera desproporcionada diferentes zonas geográficas y ecosistemas del mundo que prestan sus servicios a las comunidades humanas y mantienen un equilibrio sistémico.

Los ecosistemas de páramo son exclusivos de la zona norte de la región Andina, y se encuentran en regiones de alta montaña entre los 3000 y 4500 msnm, lo que los hace únicos y estratégicos, puesto que proveen servicios ecosistémicos como conservación de biodiversidad, almacenamiento de carbono y suministro y regulación de agua (Vázquez & Buitrago, 2011). Entre sus principales características hidrológicas se encuentra la gran oferta hídrica que brindan, calculada por medio del coeficiente de escorrentía (Caudal/Precipitación) y su alta regulación hídrica que le permite mantener flujos sostenidos en épocas de sequía (Llambí, et al, 2012).

En el departamento de Boyacá, Colombia; se localiza la cuenca hidrográfica del Lago de Tota, la que se encuentra rodeada por el complejo de páramos Tota – Bijagüal – Mamapacha, y aporta una gran cantidad de los recursos hídricos que alimentan el espejo de agua, el principal lago natural de Boyacá y el que tiene mayor volumen de agua en Colombia (Conpes, 2014). Por tal razón y ante la incertidumbre frente a los posibles efectos que el cambio climático global pueda tener sobre los recursos hídricos de la cuenca, se realiza este trabajo de investigación y con el objetivo de estimar la magnitud de los cambios en la disponibilidad (oferta) y permanencia (regulación) de caudales superficiales en esta importante región.

## **Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Evaluar el efecto potencial del cambio climático en la hidrología superficial de la cuenca hidrográfica del Lago de Tota, Boyacá.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Elaborar el diagnóstico ambiental del estado actual del recurso hídrico de la Cuenca del Lago Tota.
- Calibrar y Validar el modelo hidrológico de flujo superficial Precipitación – Escorrentía para la Cuenca del Lago de Tota utilizando HEC-HMS.
- Determinar el efecto de tres posibles escenarios de cambio climático en la disponibilidad y permanencia de caudales de la cuenca del Lago de Tota.

## 2. Marco Conceptual

El cambio climático afecta todos los ecosistemas marinos y terrestres del planeta, y puede tener efectos no previstos sobre los ecosistemas Andinos que componen las regiones más habitadas de Colombia. Para entender las consecuencias de este fenómeno sobre la hidrología del Ecosistema de Páramo, a continuación se describen los fenómenos climáticos, características y algunos estudios realizados en el país sobre el tema de este trabajo.

### 2.1. Cambio Climático

Existe un fenómeno natural llamado efecto invernadero, el cual regula la temperatura de la Tierra y es resultado de la radiación calorífica proveniente del sol, atrapada por gases en la atmósfera terrestre como vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ) y óxido nitroso ( $N_2O$ ) (Adedeji, Reuben & Olatoye, 2014). Sin embargo, la principal causa según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC en inglés) de la tendencia actual de calentamiento global, está extremadamente ligada, en una probabilidad mayor al 95%, a la actividad humana desde mediados del siglo XIX, puesto que la actividad industrial de la civilización moderna ha elevado los niveles de  $CO_2$  de 280 partes por millón a más de 400 partes por millón en los últimos 150 años y por lo tanto, se ha incrementado la temperatura a nivel global (IPCC, 2014). El cambio climático repercutirá en los recursos hídricos en todo el mundo, pues se ha observado que a medida que aumenta la temperatura global del aire, las capas polares se derriten, se incrementa el nivel del mar, ocurren más frecuentemente inundaciones y sequías, hay disminución de precipitación en algunas zonas geográficas y aumento de lluvias en otras, se incrementa la evapotranspiración, existen más problemas de calidad y acceso al agua, entre otras (Adedeji, Reuben & Olatoye, 2014), (IPCC, 2014).

La principal herramienta que se usa en la actualidad para predicción del cambio climático global son los Modelos de Circulación General (AGCM), por sus siglas en inglés, que teniendo en cuenta las condiciones históricas modelan las condiciones futuras en distintos escenarios, definidos así por el IPCC mediante 4 posibles Trayectorias Representativas de Concentración (RCP) por sus siglas en inglés (IPCC, 2014). Estas constan de 4 rangos de reforzamiento radiativos medidos en Vatios por  $m^2$  que culminan en el año 2100, en el que RCP8,5  $W/m^2$  representa un escenario de altas emisiones de gases efecto invernadero (GEI), RCP6  $W/m^2$  es de estabilización de emisiones, RCP4,5  $W/m^2$  es de mitigación leve y RCP2,6  $W/m^2$  es de mitigación y reducción de

GEI. En la figura 1, se resumen los posibles escenarios y el aumento global potencial de temperatura de cada uno.

Aunque se espera que haya un incremento inevitable de GEI, existe un punto de inflexión en todos los modelos de Cambio Climático, por lo que los esfuerzos acordados por los países asistentes a la Cumbre de París (COP21) deben corresponder a las metas propuestas para el año 2040, ya que se pretende que hayan emisiones netas de GEI iguales a cero (0) entre las décadas de 2030 a 2050, para evitar que la temperatura global ascienda sobre 2°C (Rhodes, 2016).

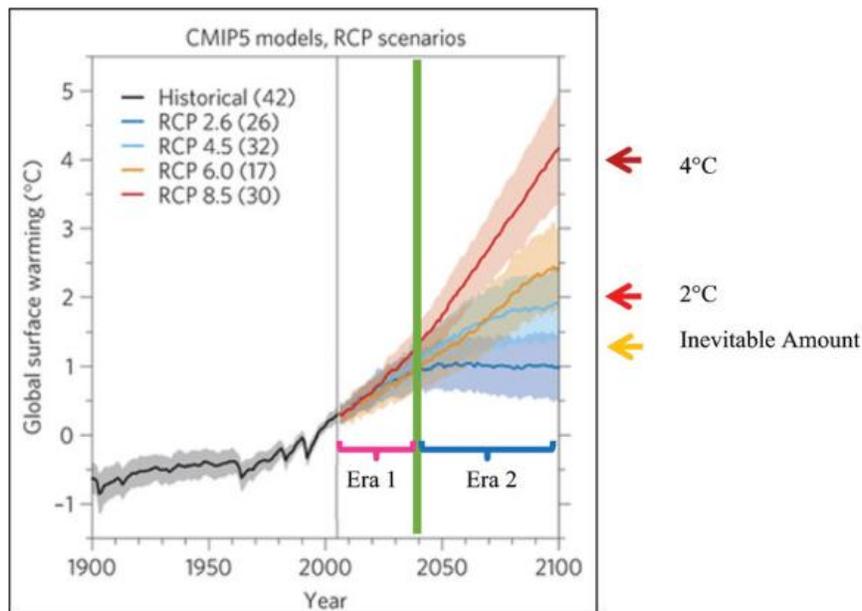


Figura 1. Temperatura para distintos escenarios RCP de emisiones de GEI. Fuente: McCarl, Thayer & Jones, 2016.

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ha alertado que la temperatura promedio del aire en el país aumentará con respecto al período de referencia 1971-2000 en: 1.4°C para el 2011-2040, 2.4°C para 2041-2070 y 3.2°C para el 2071-2100. Además, a lo largo del siglo XXI, los volúmenes de precipitación decrecerían entre un 15% y 36% para amplias zonas de las regiones Caribe y Andina e incrementaría la precipitación en la cordillera central y norte de la Región Pacífica (IDEAM, *et al*, 2017).

## 2.2. Modelación Hidrológica

La modelación se puede definir como una representación simplificada de un sistema, por lo que los modelos hidrológicos tratan de entender y representar los parámetros que describen el

comportamiento del agua en una cuenca hidrográfica (Devia, Ganasri, & Dwarakish, 2015). El ciclo hidrológico se puede dividir en tres sub-sistemas: el agua atmosférica, que involucra procesos de precipitación, evaporación, intercepción y transpiración; el sub-sistema superficial, que son procesos de escorrentía superficial, sub-superficial, y los océanos; y el subsistema subterráneo, que implica la infiltración, recarga de acuíferos y flujo subterráneo (Singh, 2018). Los modelos hidrológicos se usan principalmente para predecir procesos, por lo que, para una cuenca hidrográfica, se pueden clasificar los tipos de modelos en agregados y distribuidos, si son en función del espacio y el tiempo, y determinísticos o estocásticos si considera la aleatoriedad o no de los datos (Devia, Ganasri, & Dwarakish, 2015). Igualmente se pueden clasificar en modelos conceptuales, empíricos o físicos, de acuerdo al proceso descriptivo que realizan. En la figura 2 se muestra un resumen de la clasificación de los modelos hidrológicos.

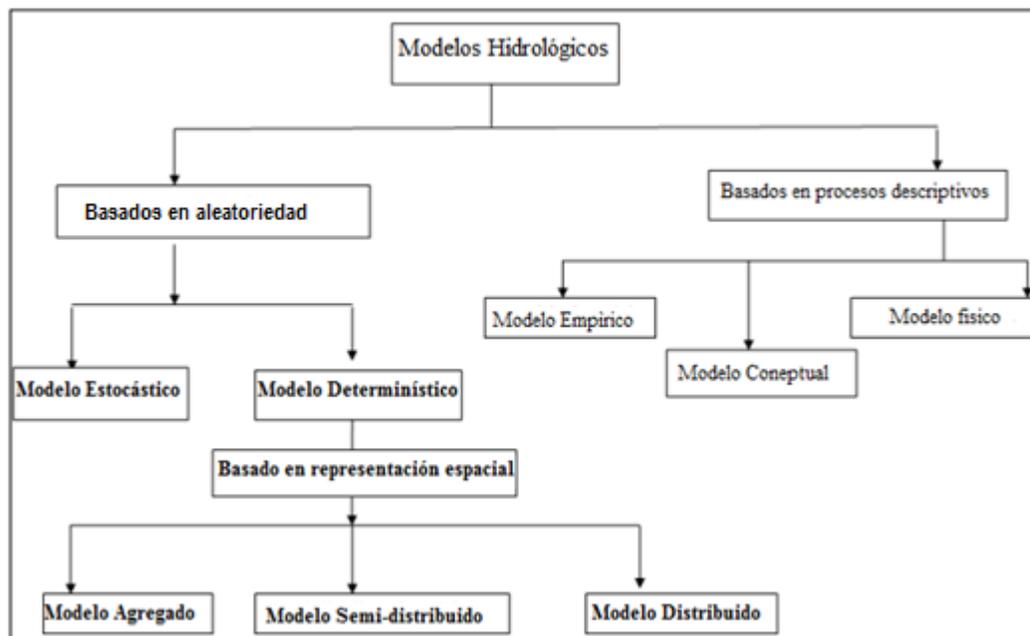


Figura 2. Clasificación de los modelos Hidrológicos. Fuente: adaptado de Singh, 2018.

Dentro de los modelos determinísticos según Singh (2018) se encuentran:

- *Modelos agregados*: son modelos donde los parámetros de entrada no varían en la cuenca, por lo que, la precipitación es “uniforme” en toda la cuenca y no tiene en cuenta variaciones espaciales como la topografía, pues no considera aspectos físicos. Requieren pocos datos y son sencillos de usar, y entre algunos ejemplos están SCS-CN, IHACRES, WATBAL.
- *Modelos semi-distribuidos*: los parámetros de la cuenca pueden variar al subdividir la cuenca en algunas más pequeñas. Se pueden observar de tipo *ola cinemática* que

simplifica las variables físicas en modelos de ecuaciones, o los modelos de *probabilidad distribuida* en la que se usan distribuciones de probabilidad en toda la cuenca. La ventaja es que tienen en cuenta aspectos físicos que le dan mayor precisión y requieren menor cantidad de datos. Algunos ejemplos son WaSiM, HEC-HMS y TOPMODEL.

- *Modelos distribuidos*: los parámetros varían de acuerdo a la resolución espacial, y se puede aplicar para representar los procesos físicos de la cuenca en cualquier punto de esta. Por lo anterior, requieren una grandísima cantidad de datos y son los que logran una mayor exactitud, siempre y cuando todos los datos sean confiables. Entre ellos están HYDROTEL, MIKE1SHE, WATFLOOD, etc.

Alrededor del mundo se han realizado investigaciones del modelamiento del comportamiento hidrológico de cuencas de alta montaña, como el trabajo de Birundu & Mutua (2017), en la cuenca del río Mara en Kenya y Tanzania, que mediante el uso del modelo semi-distribuido HBV de precipitación-escorrentía, se pudo simular con buenos resultados los caudales de épocas de sequías. En Ecuador se usó el modelo semi-distribuido HEC-HMS para modelar cuencas de páramo, al calibrar y validar apropiadamente la escorrentía superficial y flujos base de la cuenca alta del río Quinuas (Cabrera Balarezo, 2017). Estudios con el mismo software se han realizado en Colombia con muy buenos resultados, como el caso del río Medellín, en el que se usó este programa para tránsitos de crecientes y modelación hidrológica (Marín Muñoz, 2013).

### **2.2.1. Modelación hidrológica y cambio climático**

A la modelación hidrológica se han incorporado diferentes variables que previamente no se tenían en cuenta, como lo son el cambio del uso del suelo, la demanda creciente por recursos hídricos debido a actividades humanas, erosión, sedimentación y cambio climático. Este último se incorpora en los modelos desde los años 90's con trabajos realizados en Reino Unido (Arnell & Reynard, 1996) Estados Unidos (Hamlet & Lettenmaier, 1999) y a lo largo de Europa especialmente (Arnell, 1999). Sin embargo, como menciona Xu Chong-yu. (1999) durante esa década las investigaciones se realizaban para predecir condiciones a nivel continental que eran incapaces de representar dinámicas a escalas de tipo regional y discute la necesidad de reducir esa brecha. Por lo tanto, en los años siguientes hubo grandes esfuerzos en representar a escala de cuenca estos cambios climáticos, destacando estudios como en la cuenca del río Swan en Australia (Evans & Schreider, 2002), los ríos Columbia, Sacramento y Colorado (Barnett, *et al*, 2004), diferentes cuencas de Suecia (Bergström, *et al*, 2001), y al norte de Canadá (Dibike & Coulibaly, 2005). Cada investigación usó AGCM's combinados con modelos propios, o

combinando datos recopilados en campo durante varias décadas o usando reducción de escala por diferentes métodos. Aunque cada región climática analizada es diferente, los efectos que predicen los modelos varían desde el aumento en la precipitación en el caso de Gran Bretaña y Canadá hasta sequías mucho más intensas en las regiones áridas de Estados Unidos y Australia. Sin embargo, no tienen la misma magnitud y las implicaciones para cada país son muy distintas, e incluso varían en zonas al interior de cada nación.

En Latinoamérica se han llevado a cabo estudios de los efectos del cambio climático sobre disponibilidad de agua desde finales de los 90`s, siendo líderes México (Mendoza Villanueva & Adem, 1997), Argentina (Baethgen & Magrin, 1995) y Chile (Hubbard, 1997). A pesar de estos esfuerzos, los estudios se concentraban en la escala semi-continental o de país, ignorando casi por completo la escala local. Yates (1997) reconoce que, aunque investigaciones a escala Continental son muy útiles, la geografía y diferencias climáticas entre regiones arrojan resultados muy dispersos y poco confiables, derivando en complejas mezclas de incrementos y decrecimientos de escorrentías en la zona norte de los Andes. En años posteriores se han realizado algunos estudios a escala más regional, demostrando que en el hemisferio austral del continente las consecuencias más notorias y dañinas recaen sobre los glaciares, pues la desaparición de estos se ven reflejados en una menor oferta hídrica en los ríos San Juan y Mendoza de la región montañosa de Argentina, la cual es altamente dependiente de recursos hídricos y al tiempo es vulnerable a cambios en el ciclo hidrológico (Boninsegna & Villalba, 2006). En la región norte México por otro lado, dada su posición geográfica se espera que los aumentos de temperatura disminuyan la precipitación, que repercutirá en la escorrentía superficial y los acuíferos, por lo que se prevé un mayor estrés hídrico tanto para consumo humano como en agricultura (Martinez & Patiño, 2012). En el territorio brasileño se ha demostrado que los efectos de los escenarios RCP4,5 y RCP8,5 definidos por el IPCC disminuirían la oferta hídrica en la mayor parte del país, impactando ecosistemas como la selva amazónica, sabana brasileña, regiones semiáridas del noreste, y sobre todo regiones donde se concentra la generación de energía hidroeléctrica; mientras algunas zonas del amazonas y el pantanal al sur del estado verían incrementos en eventos extremos de inundación (Ribeiro, da Paz, Marengo & Chou, 2016).

### **2.3. Páramos y sus características hidrológicas**

Los páramos son ecosistemas tropicales de alta montaña únicos de América del Sur del cual Colombia posee cerca del 50%, mientras el resto se encuentra repartido en Ecuador, Venezuela,

Perú y Costa Rica. Se encuentran en altitudes entre 3000 y 4900 msnm por lo que el clima tiende a ser extremo debido a la fuerte radiación solar en el día y la baja temperatura en la noche. (LLambí, Soto, Celleri, *et al*, 2012), (Buytaert *et al*, 2006). Se compone principalmente de vegetación arbustiva baja, y está adaptada para retener agua y resistir las variaciones de temperatura ya que sus hojas son gruesas y con vellos o pelusa que las protegen del frío y la evapotranspiración. La biodiversidad del ecosistema es bastante grande, pues existen alrededor de 154 especies de aves, 90 especies de anfibios, 70 especies de mamíferos y más de 3400 especies de plantas (Salamanca, Botía & Ardila, 2008).

La precipitación de los páramos puede ser autóctona, cuando por la radiación solar y temperatura del aire, existe una mayor evaporación de agua que al enfriarse se traduce en lluvia o proceso valle – montaña. Sin embargo, debido a la latitud y altura de los páramos, los procesos climáticos locales no tienen tanto impacto como los sistemas climáticos de la Amazonía y el Pacífico, razón por la que la mayoría tienen una estacionalidad bimodal marcada (Llambí, *et al*, 2012). Se pueden encontrar páramos muy húmedos con precipitaciones cercanas a los 3000 mm como en la cordillera Occidental de Colombia, o páramos más secos con menos de 700 mm de lluvia por año en regiones centrales de Ecuador (Buytaert *et al*, 2006). Por lo general las lluvias tienden a ser de baja intensidad y larga duración, aunque también hay fenómenos de precipitación horizontal donde la vegetación captura humedad de la niebla, la cual es poco considerada en estudios hidrológicos (Llambí, *et al*, 2012), (Buytaert, Céleri, De Bièvre, & Cisneros, 2010). El suelo de páramo generalmente es de tipo Andosol, que tiene estructuras porosas que facilitan la infiltración, encontrando suelos saturados por encima de 80% de volumen. Por esto, los páramos tienen frecuentemente charcos, pantanos, humedales y turberas que regulan el ciclo hidrológico formando corrientes subterráneas y emergentes (Salamanca, Botía & Ardila, 2008). El agua de escorrentía en páramos generalmente es subsuperficial, que corresponde al aporte del agua del suelo que escurre por gravedad de las laderas hasta encontrar una capa impermeable de roca y llegar a los arroyos y quebradas (Llambí, *et al*, 2012). La evapotranspiración tiende a ser baja en épocas de lluvias, pero no varía mucho en temporadas secas por las adaptaciones de la vegetación, lo que sumado al tipo de suelo y demás condiciones climáticas, propicia que la escorrentía tenga un alto y sostenido flujo base (Buytaert, Céleri, De Bièvre, & Cisneros, 2010). Este rendimiento hídrico oscila entre 60 y 70%, pero la principal característica de los páramos es la regulación hídrica de dichos ecosistemas que permite un balance natural de almacenamiento en temporadas lluviosas y liberación de agua en temporadas secas. Por este motivo se le

considera ecosistema estratégico para Colombia, pues el 70% del agua que consumen las ciudades de la zona andina proviene de los páramos (Vásquez & Buitrago, 2011).

### **2.3.1. Cambio climático en los páramos**

En cuanto a las actividades que generan impactos en ecosistemas de alta montaña, se pueden nombrar la agricultura, la ganadería extensiva, la minería, deforestación, y a estas presiones se suma el cambio climático como agente generador de cambios (Franco, Delgado & Andrade, 2013). En años recientes se ha observado que en los páramos hay fuertes incrementos de la temperatura, así como una tendencia a la disminución de la precipitación acumulada anual y de precipitaciones de alta intensidad; agregando que la mayor evidencia de los cambios en la temperatura en zonas de gran elevación es el fuerte retroceso de los glaciares en Colombia (IDEAM, 2015). Cuerpos de agua como los humedales altoandinos, son especialmente vulnerables al cambio climático por factores como ubicación geográfica, régimen hidrológico, capacidad de regulación, estabilidad y humedad del suelo y coberturas vegetales (Franco, Delgado & Andrade, 2013).

Para estudiar los efectos a largo plazo diferentes escenarios de cambio climático en la alta montaña lo más usado en la modelación hidrológica son los AGCM, pero estos modelos presentan grandes incertidumbres por ser de una resolución muy alta, que no reproducen las condiciones cambiantes de la topografía y la meteorología de la región andina (Buytaert, *et al*, 2009). Estudios hidrológicos con implicaciones de cambio climático en este ecosistema comenzaron desde mediados de los 2000's. En el contexto regional se destacan estudios fuera de Colombia que durante la última década han tratado de modelar la hidrología desde un punto de vista local como Buytaert y Bievre (2012) quienes hicieron proyecciones mediante Coupled Model Intercomparison Project, en los que se demostró que el impacto negativo del aumento de la temperatura podrían producir una disminución de caudal entre un 10 – 20%, para la región Altoandina, pero el efecto se contrarrestaría con un aumento de precipitaciones, aunque en distintas proporciones dependiendo de la zona geográfica. Otro ejemplo es el caso del páramo ecuatoriano de Cuenca donde se realizó una modelación con una aproximación determinística y estocástica a base de simulaciones Monte Carlo (Zambrano, 2015). Mediante el modelo conceptual VHM (Veralgemeend Conceptueel Hydrologisch Model por sus siglas en holandés) se observó que el páramo de Huagrauma en Ecuador, puede presentar caudales máximos más elevado con el aumento de las emisiones de GEI (Farfán Durán, 2016). Cabe agregar que el cambio climático afecta en gran medida las condiciones fisicoquímicas de las corrientes de alta montaña, puesto que la biota acuática es especialmente sensible a la disponibilidad de oxígeno

disuelto y los patrones cambiantes de precipitación afectan el régimen de descarga de sólidos suspendidos (Jacobsen, 2008). No obstante, se han realizado varias contribuciones para que los modelos hidrológicos sean herramientas de evaluación y predicción que se enfocan en la gestión de los recursos hídricos, y sean tomados en cuenta por entidades tomadoras de decisiones como en Ecuador (Cisneros, *et al*, 2014) o en Perú (Guevara, 2009).

### **2.3.2. Estudios hidrológicos y de cambio climático en páramos de Colombia**

El agua de los páramos de Colombia sufre constantes impactos antrópicos y naturales, lo que afecta la calidad y disponibilidad de recursos hídricos en muchas zonas (Vásquez & Buitrago, 2011). Para fenómenos climáticos como El Niño y La Niña en Colombia, que son cada vez más frecuentes por la variabilidad climática, se observan grandes contrastes de cantidad de precipitación, pues el 80% de los eventos El Niño traen consigo un déficit de lluvias y durante La Niña, hay un exceso predominante de precipitación en más de la mitad de Colombia, sobre todo en la región andina (Hurtado & Gonzales, 2012), (León Aristizabal, 2011). Adicionalmente estas variaciones climáticas, provocan un déficit de lluvias en zonas montañosas andinas y producto del Calentamiento Global, se espera que incremente la intensidad y duración de periodos secos en los páramos (Buytaert, Celleri, De Bievre & Cisneros, 2010) (Ruíz, Moreno, Gutiérrez & Zapata, 2008).

En cuanto a investigaciones de cambio climático en zonas de alta montaña, Colombia se encuentra rezagado con respecto a otros países por las dificultades relacionadas con instrumentación climática en zonas aisladas y de gran altitud. Por lo tanto, para hacer las predicciones de variables hidrológicas en escenarios de cambio climático se usan metodologías de reducción de escala que mejoran la calidad de modelación, pero la mayoría de estudios sobre la reducción de escala no tienen en cuenta los impactos hidrológicos del cambio climático, (Fowler, Blenkinsop & Tebaldi, 2007). Por lo anterior, estudios como el de Ruiz (2016) en los que se calcularon tendencias de temperatura a lo largo de la cordillera de los Andes colombianos, a partir de diferentes AGCM, permiten corregir anomalías de proyecciones por altitud y acertadamente identificar tendencias de temperatura a una mejor resolución. Otra forma estadística de reducción se basa en la teoría del caos, implementada para la cuenca del río Bogotá por Duarte Prieto (2017) en la que se utilizan datos de estaciones pluviográficas del IDEAM, para sincronizar un modelo que optimizara la predictibilidad del sistema. Igualmente se han analizado otros páramos con distintos softwares de modelación como el caso de Chingaza, en el que se usó TOPMODEL para analizar series de datos de caudales, en los que se determinó que habría reducciones de hasta 10% de precipitación, pero en contraste, existe un

amortiguamiento en el rendimiento hídrico del páramo (Gil Morales, 2012). En la región Central, se utilizó el modelo hidrológico WaSiM para proyecciones de temperatura y precipitación, y se identificó que para el páramo Romerales en Quindío, la distribución temporal e incrementos de precipitación no afectan considerablemente el rendimiento hídrico del páramo, pero las disminuciones de caudales serán más evidentes durante temporadas secas (Gutierrez Uribe, 2016). En el páramo de Sumapaz se estimó la oferta hídrica de la cuenca alta del río Tunjuelo mediante balance hídrico detallado según Holdbrige, encontrando una tendencia de incremento de precipitaciones en escenarios proyectados de hasta un 15%, y rendimientos hídricos superiores a los actuales (Lizarazo Rincón, 2018).

Otro componente que influye en la hidrología de los páramos es la cobertura vegetal, que como demostró el estudio realizado en dos cuencas de páramo de la cordillera central, los frailejonales y chuscales interceptan entre 100 y 200 mm de lluvia, (Valencia & Tobón, 2017) y su desaparición afectará muy gravemente la capacidad regulatoria hidrológica que tienen estos ecosistemas (Balthazar, *et al*, 2015). Por lo tanto, se han incluido los cambios de cobertura vegetal en modelos de cambio climático, como en el caso de la cuenca del río Gacheneca, Boyacá, en el que los resultados arrojaron que la incertidumbre por cambio de cobertura se asocia a actividades de intervención antrópica, como crecimiento de fronteras productivas y ocupación de cauces que disminuirían su rendimiento hídrico (Beltrán García, 2018). Por otro lado, para la cuenca del río Coello en Tolima, mediante el modelo hidrológico SWAT se estimaron aumentos promedio del 23,6% del caudal medio anual si se propone aumentar la vegetación de páramo y disminuir las áreas de ganadería en la alta montaña de la cuenca (Castañeda Morales, 2016).

### **3. Metodología**

La metodología para la elaboración de este trabajo de grado está fundamentada en los procesos de investigación aplicada mediante análisis hidrológico de ríos de alta montaña con implicación en oferta y permanencia. Esta investigación se centra en los impactos del cambio climático sobre el recurso hídrico de la alta montaña, lugar donde se ubican los ecosistemas de páramo, geográficamente limitado a la Cuenca del Lago de Tota, Boyacá, Colombia.

#### **3.1. Ubicación geográfica**

La cuenca del Lago de Tota se encuentra localizada en los Municipios de Aquitania, Cuítiva, Tota y Sogamoso del Departamento de Boyacá, Colombia. Cuenta con un área de 22.370 Ha, a una altura entre 3015 y 3890 msnm y su cuerpo de agua principal es el Lago de Tota con un área superficial de 55 km<sup>2</sup> y volumen de almacenamiento aproximado de 1650 Mm<sup>3</sup> (CONPES, 2014). La cuenca se encuentra rodeada en sus partes altas por 12.944 Ha del complejo de páramos Tota - Bijagual – Mamapacha, una extensión que corresponde al 57% de la cuenca. La localización geográfica de la cuenca se muestra en la figura 3, incluyendo las estaciones meteorológicas e hidrológicas que se tuvieron en cuenta para el modelo hidrológico.

#### **3.2. Diagnóstico ambiental del recurso hídrico**

En primera medida se expondrán los documentos, información e instrumentos de planificación ambiental de las entidades que tienen algún grado de injerencia sobre el Lago de Tota de orden Nacional, Departamental y Municipal. De estos documentos se extraen los principales hallazgos en cuanto a la gestión ambiental que se ha hecho en la Cuenca del Lago haciendo énfasis especial en el recurso hídrico y cambio climático. Igualmente se hace una revisión de la gestión de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá, CORPOBOYACÁ en cuanto a los recursos hídricos y temas de cambio climático en la cuenca del Lago de Tota.

Seguido de esto, se hace una exploración de la calidad del recurso hídrico en la cuenca, teniendo en cuenta parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, hidrobiológicos, el estado trófico del lago y un análisis de la calidad del agua para consumo humano y el tratamiento de aguas residuales de la cuenca.

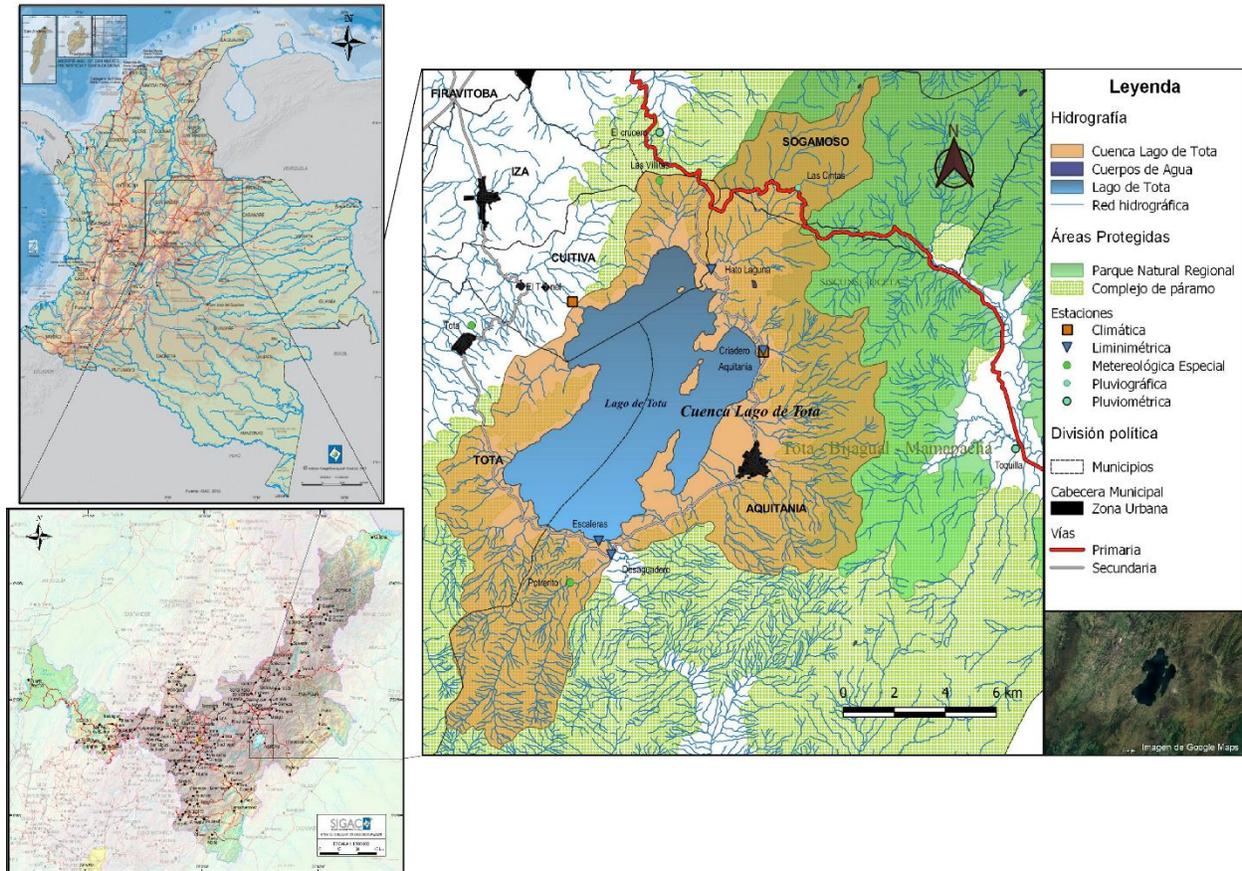


Figura 3. Ubicación geográfica Cuenca Lago de Tota. Fuente: Composición realizada a partir de cartografía del IGAC (2012) y CORPOBOYACÁ (2016).

Posteriormente se exponen las condiciones actuales de oferta hídrica comparando estudios realizados durante las últimas cuatro décadas y su evolución con el tiempo, además de la demanda actual y futura de recursos hídricos concesionado por la autoridad ambiental y un balance hídrico aproximado.

### 3.3. Calibración y Validación del Modelo hidrológico de Precipitación – Escorrentía

#### 3.3.1. Metodología de modelación

La modelación hidrológica es una representación matemática aproximada de la realidad sobre una cuenca, y se utiliza la metodología semi-distribuida para la simulación de procesos precipitación-escorrentía de las corrientes en la cuenca del lago de Tota, mediante el software

HEC-HMS versión 4.4.1 del cuerpo de Ingenieros de la Marina de EE.UU, que permite simular procesos hidrológicos de cuencas para estudios de disponibilidad de agua, predicción de caudales, impacto de cambios de uso de suelo, entre otros (Scharffenberg & Fleming, 2006). El software cuenta con diferentes métodos para la modelación de diversos fenómenos hidrológicos, pero para este trabajo se utilizará el Modelo de Contabilidad de Humedad del Suelo (*Soil Moisture Accounting*), el cual representa el cambio de la precipitación hasta convertirse en escorrentía en un flujo continuo, como se observa en la figura 4.

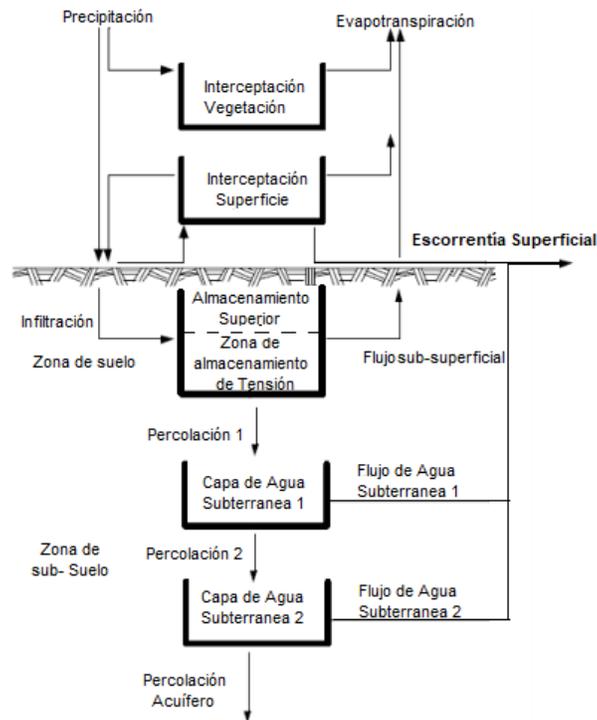


Figura 4. Esquema del modelo Soil Moisture Accounting HEC-HMS. Fuente: adaptado de Hydrological Engineering Center (2018)

El software tiene componentes para determinar las condiciones de la cuenca, y requiere de los siguientes para ser utilizado con el método *Soil moisture Accounting*: Modelo de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control, datos de series de tiempo y datos de terreno. Para alimentar estos componentes se necesitan datos de precipitación, evapotranspiración, caudales, cobertura vegetal y elevación de terreno. HEC-HMS posee 3 ventanas de análisis y resultados: en la primera se especifican las condiciones de simulación, la segunda es de cómputo del modelo y la tercera de resultados de simulación. Igualmente, el sistema contiene un módulo de optimización para calibrar el modelo.

### 3.3.2. Información Hidroclimatológica:

Para una correcta calibración del modelo se debe contar con información hidroclimatológica que fue obtenida por medio de series del Banco de Datos del IDEAM (IDEAM, 2020). En la Cuenca del Lago de Tota existen cinco (5) estaciones pluviométricas y climatológicas activas y tres (3) que se encuentran fuera de la cuenca, pero son cercanas. En cuanto a las estaciones limnimétricas, existen tres (3) en corrientes tributarias, una (1) que mide la salida del lago y dos (2) que miden el nivel del lago. En la tabla 1 se resumen las principales características de estas estaciones. Dado que solamente existe información de caudal en tres (3) subcuencas del Lago, se modela la esorrentía superficial de las corrientes **Hato Laguna, Olarte y Los Pozos** únicamente.

Tabla 1. Estaciones Hidroclimatológicas de la cuenca del Lago de Tota.

ESTACIÓN	Código	Tipo	Localización		Elevación (msnm)	Subcuenca	Municipio
			Latitud (N)	Longitud (W)			
Las Cintas	35190010	PG	5°36'50.9"	72°52'03.6"	3.400	R. Hato Laguna	Sogamoso
Potrerito	35190010	ME	5°28'39.3"	72°56'55.0"	3.250	R. Olarte	Aquitania
Las Villitas	35095080	ME	5°37'00.0"	72°55'00.0"	3.150	Q. Salitre	Cúitiva
El Túnel	35095030	CO	5°34'29.7"	72°56'51.7"	3.020	Lago	Cúitiva
Aquitania	35095120	CO	5°33'26.5"	72°52'48.7"	3.025	Lago	Aquitania
Desaguadero	35097010	LM	5°29'14.1"	72°56'02.8"	3.017	R. Olarte	Aquitania
Hato Laguna	35097030	LM	5°35'09.0"	72°53'54.6"	3.020	R. Hato Laguna	Aquitania
Criadero	35097050	LM	5°33'27.9"	72°52'48.7"	3.025	Q. Los Pozos	Aquitania
Escaleras	35097070	LM	5°29'31.0"	72°56'18.6"	3.015	Lago	Tota
El Túnel	35165000	LM	5°34'29.9"	72°56'27.6"	3.015	Lago	Cúitiva
<b>Estaciones fuera de la cuenca</b>							
Toquilla	35190020	PM	5°31'25.0"	72°47'27.5"	2.960	Cusiana	Aquitania
El Crucero	24030760	PM	5°38'00.0"	72°55'00.0"	3.225	Chicamocha	Sogamoso
Guamo de Sisbaca	35090070	PM	5°21'59.5"	72°55'20.2"	2.575	Upía	Aquitania

Fuente: Adaptado de Núñez, *et al*, (2014). PG = pluviográfica, PM = Pluviométrica, CO = Climática Ordinaria, LM = Limnimétrica, ME = Meteorológica Especial.

- **Llenado de datos faltantes:**

Existen múltiples metodologías para la corrección y llenado de datos hidrometeorológicos, que como principio utilizan la correlación entre una o varias estaciones patrón (con los datos más completos) y las estaciones con datos faltantes (UNESCO, 1982). Los métodos escogidos para este estudio fueron promedios vecinales, regresión Lineal Ponderada y Razón media, los cuales son los más utilizados para llenar series mensuales de datos hidrológicos (UNESCO, 1982) y que se pueden observar en las ecuaciones 1, 2 y 3. Como método estadístico para analizar la correlación entre estaciones se utiliza el balance de masas y coeficiente de correlación ( $r$  de Pearson), con significancia  $\alpha$  de 0,001. Los datos faltantes fueron seleccionados mediante un análisis del comportamiento mensual de los parámetros examinados.

(ec) 1.

$$Y(t) = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} \cdot x(t)$$

Donde

$Y(t)$  = dato faltante en el tiempo  $t$

$\bar{x}$  = media de la estación datos completos

$\bar{y}$  = media de la estación con datos faltantes

$x(t)$  = dato de estación datos completos en el tiempo  $t$

(ec. 2)

$$X(t) = \frac{(r_1 x_1(t) + r_2 x_2(t))}{r_2 + r_1}$$

Donde

$X(t)$  = dato faltante en el tiempo  $t$

$r_1$  = coeficiente de correlación Pearson entre serie 1 y la incompleta

$r_2$  = coeficiente de correlación Pearson entre serie 2 y la incompleta

$X_1(t)$  = el dato existente de la estación 1 en el tiempo  $t$

$X_2(t)$  = el dato existente de la estación 2 en el tiempo  $t$

(ec.3)

$$X(t) = \frac{1}{2} \left( \frac{\bar{x}}{\bar{x}_1} x_1(t) + \frac{\bar{x}}{\bar{x}_2} x_2(t) \right)$$

Donde

$X(t)$  = dato faltante en el tiempo t

$\bar{x}$  = media de las tres estaciones

$\bar{x}_1$  = media de la estación 1

$\bar{x}_2$  = media de la estación 2

$X_1(t)$  = el dato existente de la estación 1 en el tiempo t

$X_2(t)$  = el dato existente de la estación 2 en el tiempo t

### 3.3.3. Información geográfica y condiciones iniciales del terreno

Para alimentar el modelo se obtuvieron los datos de elevación del terreno del Centro de Investigaciones Satelitales de Alaska (Alaska Satellite Facility), con el fin de obtener datos radiométricos de alta resolución espacial (12,5x12,5m) de la cuenca del Lago y poderlo incorporar a un modelo de elevación digital (DEM) (ASF, 2011). La información de la delimitación de la cuenca del lago de Tota y sus subcuencas, redes hidrográficas, vías, división política, zonas urbanas de municipios, curvas de nivel, zonas protegidas, zonas delimitadas de páramo, y coberturas vegetales (Corine LandCover Colombia) se obtuvieron por medio de CORPOBOYACÁ. La información geográfica requerida por el programa HEC-HMS se extrae y analiza de los archivos GIS, para lo cual se utilizó el software ArcGIS 10.4.

- **ArcGIS 10.4:** mediante este software se verifica el estado de los Shapefiles obtenidos de CORPOBOYACÁ y su idoneidad para la modelación (escala, geolocalización, topología). Se realizan las modificaciones a las capas de la cuenca del Lago de Tota y sus subcuencas mediante una superposición de capas de terreno e hidrografía para obtener en una escala 1:25000 los perímetros y áreas ajustadas. Igualmente se extraen las subcuencas Hato Laguna, Los Pozos y Olarte, sus redes hidrográficas y coberturas Corine Land Cover para determinar así los coeficientes de cultivo definidos por la FAO, (2006). Posteriormente se cambian las capas de las subcuencas de coordenadas Geográficas a Universal Transversal Mercator (UTM) requeridas por HEC-HMS. Igualmente se extrae de la capa ráster del DEM los datos de elevación de cada subcuenca y se convierten a coordenadas UTM. Adicionalmente, se determina el área de cada cobertura vegetal de las subcuencas y se asigna un coeficiente de cultivo que es ponderado por áreas para obtener un coeficiente global en cada subcuenca.

### 3.3.4. Determinación de Condiciones Iniciales del modelo hidrológico

Como primera medida se crea un nuevo proyecto en el programa HEC-HMS. Seguido se le asigna el sistema de coordenadas en la pestaña “GIS”, que para este proyecto es UTM Zona 18N. Luego, se importan las capas de subcuenca al programa para determinar el área del proyecto. En la pestaña GIS se pre-procesa el terreno, mediante identificación de depresiones y de drenajes. Posteriormente se identifican las corrientes de agua y se agregan los puntos de quiebre para identificar microcuencas. Finalmente, el programa determina las microcuencas de la subcuenca mediante un área mínima definida por el usuario, y con la herramienta delinear elementos, se culmina el proceso. Después se pueden observar los elementos creados (subcuencas, corrientes y salida) para que el modelo pueda funcionar. Como se mencionó, el método *Soil Moisture Accounting* de HEC-HMS usa componentes para modelar la hidrología de una cuenca, los cuales deben ser incluidos en cada microcuenca creada por el programa, los cuales son:

- **Modelo de cuenca:** este componente posee 30 parámetros divididos en 5 módulos (vegetación, superficie, pérdidas, flujo base y transformación) los cuales se muestran en la tabla 2. Cada módulo permite un método de simulación, y para las subcuencas analizadas se seleccionó el método simple de interceptación de vegetación; método simple de superficie, contenido de humedad del suelo como método de pérdidas, Unidad hidrográfica de Clark como método de transformación y reservorio lineal como método de flujo base. La mayoría de los parámetros al principio fueron asignados con valores aleatorios que estuvieran dentro de los rangos que permite el programa. Los parámetros que no fueron aleatorios fueron el coeficiente de cultivo (*crop coefficient*) conseguido del análisis de coberturas del suelo que se realizó mediante ArcGIS y el número de reservorios (*# of reservoirs*) en el que se asignaron dos (2).
- **Modelo meteorológico:** este componente permite especificar características meteorológicas de la cuenca, donde se escoge el sistema de unidades métrico, el método de precipitación es Hietograma especificado por el usuario, como método de evapotranspiración promedio mensual y los espacios onda corta, onda larga y deshielo se dejan en blanco. El Promedio mensual de evapotranspiración se obtiene de IDEAM (2011).

Tabla 2. Parámetros de la cuenca para modelo *soil moisture accounting* HEC-HMS.

<b>Vegetación (Canopy)</b>	<b>Superficie (Surface)</b>	<b>Pérdidas (Loss)</b>	<b>Transformación (transform)</b>	<b>Flujo Base (Baseflow)</b>
Initial Storage (%)	Initial Storage (%)	Initial soil content (%)	Time of concentration (h)	# of Reservoirs
Max Storage (mm)	Max Storage (mm)	Initial GW1 Content (%)	Storage coefficient (h)	GW1 initial discharge (m <sup>3</sup> /s)
Crop Coefficient		Initial GW 2 Content (%)		GW2 initial discharge (m <sup>3</sup> /s)
		Max Infiltration (mm/h)		GW1 Fraction
		Impervious (%)		GW1 coefficient (h)
		Soil Storage (mm)		GW1 steps
		Tension Storage (mm)		GW2 Fraction
		Soil percolation (mm/h)		GW2 coefficient (h)
		GW1 Storage (mm)		GW2 steps
		GW1 percolation (mm/h)		
		GW1 Storage coefficient (h)		
		GW2 Storage (mm)		
		GW2 percolation (mm/h)		
		GW2 Storage coeff (h)		

Fuente: adaptado del software HEC-HMS 4.4.1.

- **Especificaciones de control:** Estas corresponden al periodo de simulación especificado y el intervalo de tiempo de los datos meteorológicos que hacen parte del modelo, los cuales son de 1 día.
- **Datos de Series de tiempo:** permite ingresar los datos de precipitación para el periodo de tiempo a simular, por lo que se selecciona como fuente de datos entrada manual, unidades milímetros de precipitación, e intervalo de tiempo. Igualmente se agregan las coordenadas de la estación fuente de los datos. En la ventana de tiempo se ingresa el mismo intervalo de tiempo a simular que el de especificaciones de control. Finalmente se copian los datos corregidos y completados de precipitación en la pestaña “tabla”. En este componente se agrega también la serie de caudales asignando como fuente de datos

entrada manual, unidades en metros cúbicos por segundo y el intervalo de tiempo. En la ventana de tiempo se ingresa el mismo intervalo de tiempo a simular que el de especificaciones de control y al igual que la precipitación se copian los datos corregidos y completados de caudal en la pestaña “tabla”.

- **Datos de Terreno:** en este componente se ingresa el Modelo Digital de Elevación de la subcuenca, obtenido mediante el programa ArcGIS y queda automáticamente definida la ruta del archivo y las unidades del modelo de terreno (metros).

Para el elemento de corriente principal de cuenca, dentro del modelo de cuenca (*basin model*), se deja en blanco los parámetros método de ruta y pérdida/ganancia, ya que éstos son utilizados en otras metodologías de modelación enfocadas en eventos cortos.

### 3.3.5. Optimización del modelo hidrológico.

Se genera un administrador de simulaciones en la pestaña cómputo del programa HEC-HMS donde se identifica el modelo de cuenca a simular y las especificaciones de control. Con este se crea una simulación de los componentes definidos anteriormente y en la ventana de resultados se registran los valores obtenidos de caudal y flujo base de cada microcuenca y la salida de la cuenca. Luego de definir las condiciones iniciales de las microcuencas identificadas, se realiza una calibración de ensayo-error variando los diferentes parámetros de la cuenca y corriendo el simulador del modelo hasta obtener un desempeño aproximado al real.

Como método de evaluación de desempeño del modelo se escogen criterios estadísticos y gráficos que el programa HEC-HMS tiene predefinidos, los cuales son Eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS), sesgo porcentual (PercentBias), e hidrógrafas de caudales simulados vs observados. El ENS es un método estadístico normalizado que muestra el nivel de ajuste entre caudales observados y simulados, el cual se representa como un coeficiente adimensional que varía entre  $-\infty$  hasta 1, el resultado ideal (Nash & Sutcliffe, 1970). En general entre más cercano a 1 el modelo es mejor, sin embargo, algunos autores han propuesto que valores superiores a 0,6 son muy buenos y mayores a 0,8 son excelentes (Molnar, 2011) (Cabrera, 2017). Esta función se calcula de la siguiente ecuación:

(ec.4)

$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2}$$

Donde:

$Q_{si}$  = caudal simulado en el día  $i$

$Q_{oi}$  = caudal observado en el día  $i$

$\bar{Q}_o$  = caudal observado promedio en los  $n$  días.

El sesgo porcentual se usa para medir la tendencia general de los datos simulados de ser mayores o menores que los observados, siendo 0% el resultado ideal. Si es negativo significa subestimación, mientras que positivo significa sobreestimación (Gutiérrez Uribe, 2016). Este método estadístico se calcula a partir de la siguiente ecuación:

(ec. 5)

$$PBias = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}} * 100$$

Donde:

$Q_{si}$  = caudal simulado en el día  $i$

$Q_{oi}$  = caudal observado en el día  $i$

Los métodos gráficos se usan para verificar que haya una correlación entre el comportamiento de las curvas de recesión, los flujos base y especialmente los picos de caudal. Para finalizar se comparan los datos de caudal acumulado simulado y observado como método de verificación de las tendencias del flujo de la cuenca durante el tiempo simulado.

El programa HEC-HMS tiene un componente de optimización, el cual se crea en la pestaña de cómputo. Se selecciona el periodo a calibrar, el cual es igual al de las especificaciones de control y el modelo de cuenca creado. Los parámetros a optimizar son los descritos en la tabla 2, a excepción de *GW1* y *GW2 Fraction*, *crop coefficient* y *# of reservoirs*; los que son definidos a criterio del usuario. Adicionalmente, si la microcuenca tiene mayor superficie de cobertura vegetal agropecuaria, en la pestaña Evapotranspiración del parámetro Vegetación (*Canopy*) se selecciona la opción 'periodo seco y húmedo', por el contrario, a mayor cobertura de páramo en la microcuenca se selecciona la opción 'sólo en periodos secos'.

La calibración requiere un método de búsqueda, por lo que se seleccionaron *Simplex* como método multivariado de calibración, y *Univariate* para calibrar un solo parámetro. Se tomó un

máximo de 1000 iteraciones y tolerancia de 0,0001. Como función objetivo se selecciona Nash-Sutcliffe para maximizar el ajuste de las simulaciones en la salida, a la cual se le adjunta la serie de caudales observados. Cuando los criterios de evaluación obtenidos de la “simulación manual” no se puedan mejorar más, se ejecuta el componente de optimización, en el que se seleccionan diferentes parámetros a optimizar y un rango de búsqueda para el parámetro. Al finalizar la optimización, en la pestaña de resultados se encuentra una tabla con los valores iniciales y optimizados, así como los criterios de evaluación de la calibración. Este proceso se repite hasta que las diferencias de los valores obtenidos en 2 calibraciones consecutivas sean insignificantes o tan similares que no afecten los resultados de los criterios de evaluación mencionados anteriormente.

### **3.3.6. Validación del modelo hidrológico**

La validación se realiza en un periodo de tiempo posterior y menor al de la calibración, que tendrá como final el año 2018; pero con los mismos parámetros calibrados durante la Optimización. Los resultados de la validación son evaluados con los mismos criterios de la calibración.

## **3.4. Escenarios de cambio climático**

Se definieron para las tres principales variables del modelo hidrológico que cambian con el tiempo, las que se introducen en el modelo hidrológico en el periodo de evaluación comprendido entre 2020 – 2049. Estos parámetros son temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial; cuyos resultados se definen de acuerdo a tres escenarios posibles: el primero calculado de la tendencia de la cuenca con respecto a sus series históricas (ES1), el segundo se define con respecto al ensamble multiescenario elaborado por IDEAM (ES2), y el tercero basado en el RCP8.5 aplicado por el IDEAM (ES3), en la tercera comunicación del cambio climático para precipitación y temperatura en Colombia (IDEAM, *et al*, 2015).

### **3.4.1. Escenarios de temperatura.**

Para la elaboración de las series mensuales de temperatura se empleó el modelo ARMA ( $p, q$ ) (Auto Regresivo de Media Móvil en inglés), el cual tiene el componente auto regresivo que calcula la dependencia de la serie con sus valores anteriores, cuyo orden de regresión se denota con la letra “ $p$ ” y representa el número de datos retraso que se calculan. La componente media móvil se usa para obtener un valor medio entre los datos evaluados y el orden se representa por la letra “ $q$ ” el cual calcula el posible resultado alrededor de la media con respecto al promedio de los

datos anteriores. En este caso se utiliza *gretl 2020d*, (programa GNU de regresión, econometría y librería de series de tiempo, en inglés), el cual es un software libre con el que se puede generar el Modelo ARMA representado según Cottrell & Lucchetti (2020) en la ecuación 6:

(ec.6)

$$y_t = x_t\gamma + \phi_1 y_{t-1} + \phi_p y_{t-p} + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t$$

Donde

$\Phi$  y  $\theta$  = parámetros del modelo

$p$  y  $q$  = orden de regresión y media móvil respectivamente

$y_t$  = variable dependiente

$x_t$  = variable independiente (tiempo)

$\epsilon_t$  = ruido blanco de la serie.

A partir de este modelo se proyectó la serie mensual de temperaturas desde enero de 2020 hasta diciembre de 2049 con la herramienta Predicción de *Gretl*, a la cual se agregó un error aleatorio ( $z$ ) multiplicando este factor a los residuos generados por el modelo ARMA. Con lo anterior se obtuvo la serie de ES1, por lo que para el ES2 y ES3 se agregó un incremento gradual calculado por la ecuación 7, obteniendo la temperatura de aumento a partir de los datos de los escenarios de cambio climático del IDEAM (2015).

(Ec.7)

$$T_i = \frac{T_{aum} - 12.023}{2n} + T_{i-1}$$

Donde:

$T_i$  = incremento de temperatura en el mes  $i$ ,

$T_{aum}$  = temperatura incrementada con respecto al periodo de referencia (1979-2005)

12,023 = temperatura media (2006-2018)

$n$  = número de datos de la serie

### 3.4.2. Escenarios de precipitación.

Al igual que para la obtención de las series de temperatura, se utiliza el modelo ARMA ( $p, q$ ) para la predicción de las series de precipitación mensuales del periodo 2020-2049. Adicionalmente se realiza un análisis de anomalías de las estaciones de precipitación, al normalizar las series históricas alrededor de la media ( $\mu = 0$ ) y la desviación estándar ( $\sigma = 1$ ), para comparar

anualmente los años de mayor y menor precipitación. Posteriormente se identifican los años cuyas anomalías coincidan en las estaciones de estudio y mediante probabilidades, se proyectan las precipitaciones con probabilidad de años secos y húmedos en los diferentes escenarios. Por lo anterior, se adicionó un factor de error aleatorio ( $z$ ) a la desviación estándar mensual obtenida de las series históricas. Así se generó ES1 de las estaciones, sin embargo, el comportamiento de la precipitación no es homogéneo en todas, por lo que para crear las diferentes series de precipitación mensual de ES2 y ES3 se agregó un porcentaje de cambio de precipitación basado en los datos de los escenarios de cambio climático del IDEAM (2015), definido por la siguiente ecuación:

(ec.8)

$$P_i(\%) = \left[ \frac{P_{pos} * 100}{P_{ref}} - 100 \right] + P_{es} (\%)$$

Donde:

$P_i$  = porcentaje de cambio promedio de precipitación,

$P_{pos}$  = precipitación media del periodo 2006-2018

$P_{ref}$  = la precipitación media del periodo de referencia (1976-2005)

$P_{es}$  = porcentaje de cambio de precipitación del escenario IDEAM.

Para la obtención de series diarias de precipitación necesarias para correr el programa HEC-HMS, se utilizó Python (lenguaje de programación) para desarrollar un algoritmo que permite generar secuencias diarias aleatorias a partir de los datos mensuales de precipitación. En la figura 5 se observa el código usado en la interfaz de programación para generar las series de lluvia sintéticas.

### 3.4.3. Escenarios de Evapotranspiración.

Ya que al programa HEC-HMS se ingresan datos de  $ET_0$  promedio mensual, se calcularon los promedios mensuales de evapotranspiración potencial para periodos de 10 años (2020-2029, 2030- 2039, 2040-2049). Dada la disponibilidad limitada de datos históricos de parámetros como velocidad del viento y humedad relativa; fórmulas de  $ET_0$  como Penman-Monteith, Christiansen y Thornwaite no se pueden utilizar. Según lo expuesto por Gonzales Morales (2016), la humedad relativa del área de influencia del Lago de Tota ha aumentado en las últimas décadas, observando promedios mensuales superiores al 65% en los valores medidos. Por lo tanto, se utiliza la fórmula de Turc modificada para condiciones húmedas ( $HR > 50\%$ ), propuesta por L. Turc (1961), expresada en la ecuación 9. Esta se compara con los promedios de  $ET_0$  del periodo 1981-2010

de las estaciones utilizadas en este estudio y se ajustan los valores mensuales con un factor para corregir el parámetro en el periodo futuro.

```

from pandas import read_csv
from pandas import datetime
from matplotlib import pyplot
import pandas as pd
import types
import numpy as np, numpy.random
import numpy as np
#-----
#Editar datos aqui:

precipitacion_mes = np.array([45.5,0,8.1,45.6,24.1,16.8,38.6,50.3,55,37.9])
mes = 12

#-----

totals = precipitacion_mes*100
dias_mes = np.array([3,4,8,12,16,19,21,19,16,15,11,4])
dias = dias_mes[mes-1]
a = np.random.random((dias, 1))
a = a/np.sum(a, axis=0) * totals

a = np.round(a)
remainings = totals - np.sum(a, axis=0)
for j, r in enumerate(remainings):
    step = 1 if r > 0 else -1
    while r != 0:
        i = np.random.randint(dias)
        if a[i,j] + step >= 0:
            a[i, j] += step
            r -= step

a = a/100
a = str(a)
a = a.replace('[', '')
a = a.replace(']', '')
print ("Precipitacion mensual de "+str(precipitacion_mes)+" para el mes "+str(mes)+". Distribucion sintetica diaria: ")
print ("")
print (a)

```

Figura 5. Código de generación de series sintéticas de precipitación diaria. Fuente: elaboración propia en Google Colab.

(ec. 9)

$$ETP = K \left( \frac{T}{T + 15} \right) (RG + 50)$$

Donde:

*ETP* = evapotranspiración potencial mensual en mm

*K* = factor mensual (0,4 para meses de 30 y 31 días, 0,37 para febrero)

*T* = Temperatura media mensual en °C,

*RG* = Radiación Global en (Cal/cm<sup>2</sup>-día)

Al no tener datos de Radiación Global, se calculan con la fórmula de Angstrom modificada, expresión de la ecuación 10:

(ec.10)

$$RG = RA \left( a + b \left( \frac{n}{N} \right) \right)$$

Donde:

$RG$  = Radiación Global (Cal/cm<sup>2</sup>-día)

$RA$  = Radiación extraterrestre en la atmósfera superior, (Cal/cm<sup>2</sup>-día)

$n$  = número de horas de insolación (horas decimales)

$N$  = Insolación posible por duración del día (horas decimales)

$a$  y  $b$  son factores empíricos.

Los datos de  $n$  (brillo solar), se obtienen de los promedios climatológicos (IDEAM, 2011), mientras que los datos de  $RA$  (radiación extraterrestre) y  $N$  (máximo horas de sol) son los de las tablas del Anexo F. Los resultados del periodo 1989 – 2018 se comparan con los de los escenarios de evapotranspiración potencial para el periodo 2020 – 2049, y como resultado se presentan los cambios de  $ET_0$  para ES1, ES2 y ES3 en términos de porcentaje.

#### **3.4.4. Efecto de los escenarios de cambio climático en la disponibilidad y permanencia de caudales**

Con los datos de precipitación y evapotranspiración obtenidos, se corre el modelo hidrológico HEC – HMS en una nueva simulación de proyección, analizando periodos de 10 años. Los resultados de volúmenes simulados, la proporción del caudal base, de escorrentía directa y el rendimiento hídrico se comparan entre cada escenario y subcuenca mediante el coeficiente de escorrentía y el porcentaje de flujo base y escorrentía directa. Adicionalmente se hace una comparación del caudal descargado durante el periodo de calibración – validación del modelo y el periodo proyectado, para evaluar el cambio en la oferta hídrica de las subcuencas. Posteriormente se calcula el índice de retención y regulación hídrica (IRH) de las subcuencas, un índice adimensional con valores entre 0 y 1, considerando valores inferiores a 0,50 como retención muy baja, valores entre 0,51 y 0,65 como retención baja, valores entre 0,66 y 0,75 como retención moderada, valores entre 0,76 y 0,85 como retención alta y valores mayores a 0,86 como retención muy alta según la metodología del IDEAM (2016) detallada en las ecuaciones 11, 12 y 13.

(ec. 11)

$$IRH = \frac{V_p}{V_t}$$

Donde,

$IRH$  = índice de retención y regulación hídrica

$V_p$  = Volumen parcial equivalente al área bajo la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales medios diarios ( $m^3/s$ ).

$V_t$  = volumen total equivalente al área bajo la curva de duración de caudales medios diarios ( $m^3/s$ )

(ec. 12)

$$V_t = \Delta P_{exc} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i + Q_{i+1})}{2}$$
$$\Delta P_{exc} = P_{exci+1} - P_{exci}$$
$$P_{exc} = \frac{m}{n}$$

Donde,

$V_t$  = Volumen total equivalente al área bajo la curva de duración de caudales ( $m^3/s$ )

$Q_i$  = Caudal medio diario en la posición  $i$ , de una serie ordenada de caudales de mayor a menor ( $m^3/s$ )

$Q_{i+1}$  = Caudal medio diario en la posición  $i+1$ , de una serie ordenada de caudales de mayor a menor ( $m^3/s$ )

$P_{exci+1}$  = probabilidad de excedencia del caudal medio diario en la posición  $i+1$  (%)

$P_{exci}$  = probabilidad de excedencia del caudal medio diario en la posición  $i$  (%)

$\Delta P_{exc}$  = diferencia entre probabilidades de excedencia, este delta es constante (%)

$n$  = número de datos de la serie de caudal o longitud de la serie

$m$  = índice de orden del caudal en la serie ordenada.

(ec. 13)

$$V_p = \sum (V_{p1} + V_{p2}), \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{p1} = (P_{exc\ med} \cdot Q_{medio}) \\ V_{p2} = \sum_{i=m_{medio}}^n \Delta P_{exc} \cdot \frac{(Q_i + Q_{i+1})}{2} \end{array} \right.$$
$$P_{exc\ med} = P_{exc\ m} + \frac{(P_{exc\ m+1} - P_{exc\ m}) \cdot (Q_{medio} - Q_m)}{(Q_m - Q_{m+1})}$$

Donde,

$V_p$  = Volumen total equivalente al área bajo la curva de duración de caudales ( $m^3/s$ )

$Q_{medio}$  = Caudal promedio de la serie de datos de caudal ( $m^3/s$ )

$P_{exc\ med}$  = probabilidad de excedencia del caudal promedio de la serie de caudales (%)

$P_{exc\ m}$  = probabilidad de excedencia del caudal medio diario inmediatamente menor al caudal promedio (%)

$P_{exc\ m+1}$  = probabilidad de excedencia del caudal medio diario inmediatamente mayor al caudal promedio (%)

$Q_m$  = Caudal medio diario inmediatamente menor al caudal promedio de la serie ordenada de caudales ( $m^3/s$ )

$Q_{m+1}$  = Caudal medio diario o mensual inmediatamente mayor al caudal promedio de la serie ordenada de caudales ( $m^3/s$ )

Se incluye el análisis de permanencia de caudales mediante el cálculo de un caudal ambiental aproximado a partir de la curva de duración de caudales diarios de las diferentes subcuencas, considerando el valor característico Q85 (caudal igualado o superado el 85% del tiempo) si el IRH supera el valor 0,7 y si el índice es menor, el valor característico Q75 (caudal igualado o excedido el 75% del tiempo) será considerado el caudal ambiental (IDEAM, 2019).

## **4. Resultados y Discusión**

### **4.1. Estado Actual del recurso hídrico de la cuenca del Lago de Tota**

En la actualidad la cuenca del lago de Tota se ve afectada por diferentes impactos ambientales ocasionados por las diversas intervenciones antrópicas descontroladas y mal planificadas. La afectación al recurso hídrico es una de las principales problemáticas que tiene la cuenca, por lo que a continuación se recopilan hallazgos de la gestión ambiental, calidad del agua, oferta hídrica y demanda de recursos hídricos de la cuenca del Lago, incluyendo el cambio climático como factor de análisis de los documentos, investigaciones y estudios encontrados.

#### **4.1.1. Gestión Ambiental del Recurso Hídrico**

##### ***4.1.1.1. Instrumentos de gestión del orden Nacional***

En el país existen instrumentos de Gestión Ambiental relacionados con recursos hídricos y cambio climático dentro de los cuales se encuentran las Políticas Nacionales, que establecen objetivos, estrategias, metas, indicadores y planes de acción con un horizonte de tiempo determinado. Esas directrices permiten hacer un manejo adecuado de las herramientas y recursos disponibles en el territorio. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010 & 2017). En la política Nacional para la Gestión del Recurso Hídrico, se identifica el cambio climático como uno de los factores de riesgo y vulnerabilidad para el régimen hidrológico. Se encontró que la zona del altiplano cundiboyacense es mediana y altamente vulnerable a largo plazo, por lo que la cuenca del lago de Tota puede sufrir un alto estrés hídrico. Es por esto que dentro de las estrategias propuestas se incorpora desarrollar la gestión integral de riesgos asociados a oferta y disponibilidad de agua, especialmente medidas de reducción y adaptación a riesgos asociados a la oferta hídrica:

- Diseñar e implementar medidas de adaptación a los efectos del cambio climático en los ecosistemas clave para la regulación de la oferta hídrica, así como, por parte de los siguientes sectores: hidro-energía, agricultura, navegación fluvial y, abastecimiento de agua potable.
- Diseñar e implementar a nivel regional y local, medidas de reducción de riesgos por variabilidad climática (fenómenos de El Niño y La Niña) y por otras amenazas naturales

que afecten los ecosistemas clave para la regulación hídrica, así como la oferta y disponibilidad hídrica de los principales usuarios del agua en el país (MAVDT, 2010, p.102).

Acatando las políticas Nacionales y como cuerpo de agua de importancia Nacional, el principal instrumento para la gestión en la cuenca del Lago de Tota se trata del CONPES 3801 de 2014, en el cual se hace un diagnóstico de la cuenca del lago basado en cinco temas: Problemática, oferta y calidad de bienes y servicios ecosistémicos, saneamiento ambiental, productividad y competitividad de la región y gobernanza en el territorio (CONPES, 2014). En este diagnóstico se señala que la cuenca tiene importantes funciones de regulación hidrológica y debido a la actividad humana se ha visto alterado el ciclo hidrológico, por lo que se propone la implementación de proyectos para elaborar modelos hidráulicos, hidrológicos y de calidad de agua, establecer demanda de agua y caudal ambiental de fuentes abastecedoras del lago, incrementar la investigación en aspectos ambientales y la protección de ecosistemas de páramo. Una de las estrategias propuestas implica que se mejore la capacidad de regulación hídrica de la cuenca a partir del conocimiento del recurso hídrico. Sin embargo, en los proyectos mencionados no se contempla ni se menciona el componente de Cambio Climático como factor determinante en la oferta, demanda y calidad hídrica futura de la cuenca. Lo más recalcado en el documento como medida primordial para la gestión integral de la cuenca, es actualizar y formular documentos de planificación ambiental como el Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuenca Hidrográfica - POMCA, Plan de Ordenamiento de Recurso Hídrico – PORH y Esquemas de Ordenamiento Territorial de los Municipios – EOT.

Ante esto, el Ministerio de Ambiente en conjunto con organizaciones internacionales como Global Environment Facility (GEF), Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión (Condesan) y el Banco de Desarrollo de América Latina incluyeron la Cuenca del Lago de Tota en el proyecto de “Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en los recursos hídricos de los Andes (AICCA) en Colombia”. Este consiste en la implementación de actividades piloto en la zona de la cuenca sobre todo para intervenir actividades humanas que ponen en riesgo la capacidad de regulación hídrica del ecosistema, promoviendo actividades de cuidado ambiental y reconversión de agricultura, mediante un enfoque de adaptación a la variabilidad climática y cambios climáticos desde la resiliencia y seguridad hídrica (CAF, 2017). Así mismo, para fortalecer los esfuerzos a nivel nacional se crea la estrategia institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático (Conpes, 2011), el cual permitiría la creación de la Política Nacional

de Cambio Climático, que formula estrategias de acciones sectoriales y territoriales, entre las que se incluye el fortalecimiento de la gestión del conocimiento climático, hidrológico y oceanográfico y sobre los impactos potenciales del cambio climático. Entre las acciones se menciona complementar la modelación prospectiva de fenómenos de cambio climático, fortalecer la divulgación y generación de conocimiento y estudiar impactos, vulnerabilidad y riesgo en el territorio colombiano (MADS, 2017). Igualmente, el Plan Nacional de Gestión del Riesgo y Desastres articula la gestión del cambio climático en materia de adaptación al proponer reducir el riesgo asociado a eventos climáticos e hídricos extremos exacerbados por efectos de calentamiento global (UNGRD, 2016).

#### ***4.1.1.2. Instrumentos de gestión de orden Departamental.***

Como principal instrumento de Gestión se encuentra el plan de desarrollo departamental de Boyacá: Creemos en Boyacá 2016-2019. Este documento es la principal herramienta con los programas, proyectos y actividades a desempeñar en el departamento durante un periodo de gobierno. En el cuerpo del documento se encuentran 2 ejes principales que se relacionan con la gestión del recurso hídrico y cambio climático, aunque se hace énfasis en la transversalidad del cambio climático en todos los renglones económicos del departamento. Es por esa razón que se formularon programas agropecuarios en los que se reconoce el cambio climático como un factor que afecta la producción agropecuaria, y se incluyen sub-programas orientados a mitigación, adaptar algunas tecnologías más limpias y reconversión productiva en páramos (Gobernación de Boyacá, 2016, pp. 232, 246 & 303). Se incluye un programa de innovación en el que se implementan modelos hidrológicos para planificación agropecuaria, así como herramientas TIC para captura de información meteorológica, hidrológica y climatológica.

En cuanto a la gestión de recursos hídricos se desglosa en programas para gestión del agua en ruralidad y zonas urbanas, enfocadas en los sistemas de tratamiento para agua potable y aguas residuales. Se destaca la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento para las principales ciudades, así como fortalecimiento de PSMV y PUEA de estos municipios (Gobernación de Boyacá, 2016, pp. 586-604). Por otra parte, el cambio climático es abordado en la Gestión del riesgo del Plan de Desarrollo como uno de los ejes programáticos del componente, junto con inundaciones, deslizamientos, avenidas torrenciales y fenómenos de El Niño y La Niña (Gobernación de Boyacá, 2016, pp. 606-617). Específicamente se formula un programa de Gestión del riesgo de desastres y cambio climático, en el que se proponen ciertas metas, especificadas en el cuadro 1. Así mismo, se formuló el sub-programa de adaptación y mitigación

al cambio climático desde la gestión del riesgo, en cual se proponen las metas a alcanzar durante el cuatrienio resumidas en el cuadro 2.

Para contrastar y evaluar la implementación de los programas formulados en estos temas, se consultó el informe de gestión del plan de desarrollo, en el que se encontró que se realizaron con éxito programas de adaptación agropecuaria al cambio climático, cuyo cumplimiento según el informe corresponde al 100% de lo planteado.

Cuadro 1. Metas del programa Gestión del riesgo de desastres y cambio climático para la paz de Boyacá.

indicador de resultado	Unidad	línea base	cantidad 2016-2019	meta 2019	dependencia responsable
Municipios apoyados en asistencia técnica en temas ya actividades de gestión del riesgo y cambio climático	No	22	74	96	Sec Infraestructura
Estrategias de reducción y manejo del riesgo implementadas en el departamento	No	4	22	30	Sec Infraestructura
Fortalecimiento de la capacidad de respuesta de la OPAD ante emergencia	%	75	21	96	Sec Infraestructura
Porcentaje de actualización e implementación del PICC Boyacá	%	15	35	50	Sec Infraestructura

Fuente: Plan de Desarrollo Boyacá 2016-2019.

Cuadro 2. Metas del sub-programa adaptación y mitigación al cambio climático desde la gestión del riesgo.

INDICADOR DE PRODUCTO	UNID AD	LÍNEA BASE	CANTIDAD 2016-2019	META 2019	DEPENDENCIA RESPONSABLE
PICC Boyacá adoptado	No.	0	1	1	Sec Infraestructura
Talleres de socialización del PICC Boyacá en las diferentes provincias de departamento.	No.	0	13	13	Sec Infraestructura
Ejecución de proyectos que permitan la mitigación y/o adaptación al cambio climático en el departamento.	%	4	8	12	Sec Infraestructura

Fuente: Plan de Desarrollo Boyacá 2016-2019.

En cuanto a los programas de agua para el departamento de Boyacá se observó que programas de capacitación a prestadores y nuevas fuentes de abastecimiento de áreas urbanas tuvieron un avance cercano al 100%, mientras que programas de cobertura urbana y calidad de agua tuvieron avances de 87% y 67% respectivamente. En la zona rural, los programas de sistemas de tratamiento de aguas residuales y asociaciones de acueductos rurales fueron cumplidos al 100%, mientras que programas de optimización de acueductos y calidad de agua cumplen con el 80% y 25% de ejecución respectivamente. La poca implementación de algunos de los programas mencionados anteriormente se debe a falta de disponibilidad presupuestal según el informe, pero

se aunaron esfuerzos entre entidades de la gobernación para generar nuevas propuestas y avanzar en los programas (Gobernación de Boyacá, 2019).

El programa de Gestión del riesgo de desastres y cambio climático para la paz de Boyacá obtuvo un porcentaje de ejecución del 97,5% como se muestra en el cuadro 3. Los subprogramas de asistencia técnica, estrategias de reducción y manejo del riesgo, y fortalecimiento de capacidad de respuesta del OPAD ante emergencias, contaron con un porcentaje de avance del 100% según el informe, pues se ejecutaron las acciones en los 123 municipios del departamento de asistencia de inclusión del cambio climático y gestión del riesgo en los PMGRD de los municipios, y los insumos de información para atender adecuadamente los eventos de emergencias. Sin embargo, la implementación del Plan Integral de Cambio Climático (PICC) fue el programa que no pudo ejecutarse en su totalidad, puesto que en principio se contaba con una línea base sin las condiciones técnicas para la adopción por parte del departamento, y se tuvo que reformular y conformar un equipo para elaborar los términos de referencia del PICC, el que se encuentra en revisión por parte del OCAD (Gobernación de Boyacá, 2019).

Cuadro 3. Análisis de ejecución de programa de Gestión de riesgo de desastres y cambio climático en Boyacá.

ANÁLISIS DE EJECUCIÓN POR COMPONENTE						
PROGRAMA	Momento 1		Momento2		Momento 3	
	EJECUCIÓN TRIMESTRE		EJECUCIÓN ANUAL		EJECUCIÓN CUATRIENIO	
	% EJECUCIÓN PROGRAMA	% EJECUCIÓN COMPONENTE	% EJECUCIÓN PROGRAMA	% EJECUCIÓN COMPONENTE	% EJECUCIÓN PROGRAMA	% EJECUCIÓN COMPONENTE
Gestión del riesgo de desastres y cambio climático para la paz de Boyacá	100,00	100,00	84,72	84,72	97,48	97,48

Fuente: Informe de gestión departamental, 2019.

Como entidad encargada de la vigilancia de la gestión de los recursos naturales, la Contraloría General de Boyacá elabora un informe anual del estado de los recursos naturales y del ambiente en el departamento. En este informe se reporta que de los 122 municipios sobre los que tiene jurisdicción la entidad, solamente 47 adelantaron programas de conservación de ecosistemas de alta montaña y páramos, además que de los 85 municipios que cuentan con zonas de páramo apenas 32 han invertido 8'251.377.741 de pesos, que no son significativos comparados con la extensión de páramos del departamento (CGB, 2019, p19). El mismo informe señala el porcentaje de inversión ambiental municipal, el que calcula el presupuesto ambiental ejecutado sobre el presupuesto asignado por cada municipio, indicador que revela una pobre inversión ambiental por parte de Aquitania, Cuítiva y Tota, como se observa en la tabla 3. En el informe también se

reporta el porcentaje del presupuesto total del municipio destinado a programas ambientales, donde Aquitania aporta el 17,5%, Cuítiva el 5,16%, Sogamoso el 0,01% y Tota el 0,01%.

Tabla 3. Calificación por índice de inversión ambiental municipios de la cuenca Lago de Tota.

Municipio	Presupuesto ambiental (Mill. de pesos)	Ejecución de presupuesto ambiental (Mill. de pesos)	Índice de Inversión total (%)	Calificación
Aquitania	4.775.157	889.155	18,6	Estancado
Cuítiva	381.806	241.805	63,3	Deficiente
Sogamoso	904.251	718.369	79,4	Eficiente
Tota	884.942	121.878	13,8	Estancado

Fuente: Adaptado de Contraloría General de Boyacá, 2019.

Sin embargo, aunque Aquitania designa un alto porcentaje del presupuesto a inversión ambiental la ejecución ha sido baja, y corresponde a programas de Agua potable y Saneamiento básico, pero en el componente de manejo de cuencas, reforestación, protección de recursos naturales y adquisición de áreas estratégicas la inversión es nula (CGB, 2019, p184). Cuítiva tampoco reportó ejecución de recursos para programas ambientales diferentes de agua y saneamiento, mientras que Sogamoso y Tota mostraron cumplimientos del 99% en proyectos de educación ambiental y protección de recursos naturales. Por otra parte, a la Contraloría General de Boyacá no se indicó inversión en el renglón de Prevención y Atención de Desastres por parte de Aquitania, Tota y Cuítiva.

#### **4.1.1.3. Instrumentos de gestión del orden municipal**

Como principal insumo de gestión ambiental desde lo local se encuentran los Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT) de los municipios de Aquitania, Tota y Cuítiva; y el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Sogamoso. Seguido de estos, los planes de desarrollo municipales y los programas formulados en cada uno.

- **Municipio de Tota:** El EOT del municipio dentro del componente áreas de conservación y protección ambiental específica que cerca del 70% del territorio municipal se encuentra en suelo de protección, entre la zona de páramo del complejo Tota-Bijagüal-Mama Pacha, zonas de recarga acuífera y áreas forestales protectoras. El documento propone un área especial para el uso sostenible y recuperación del lago de Tota, en la que se plantea fomentarse el suelo protector y reconversión de actividades agropecuarias, así como

zonas de recreación pasiva y turismo asociado a la zona especial de recreación ecoturística y manejo de Playa Blanca (Alcaldía municipal de Tota, 2015).

Dentro del diagnóstico del plan de desarrollo del municipio se especifica que el programa de Gestión Ambiental del municipio no había ejecutado el 42,9% de los proyectos hasta el año 2015, y que respecto al EOT no hay información presupuestal que permita calcular la ejecución del programa, como se muestra en el cuadro 4.

Cuadro 4. Ejecución de recursos de programa gestión ambiental municipio de Tota.

Manejo de la Laguna de Tota	SIN EJECUTAR	\$ 503.293.500,00
Manejo del Páramo	SIN EJECUTAR	\$ 298.854.900,00
Manejo de Suelos	SIN EJECUTAR	\$ 307.898.300,00
Revegetalización de Cuencas Hidrográficas	EN EJECUCION	\$ 58.262.400,00
Educación Ambiental	EN EJECUCIÓN	\$ 34.593.300,00
Conservación de Suelos y Restauración Ecológica	IMPOSIBLE CALCULAR	\$ 91.035.000,00
Monitoreo de los Recursos Naturales	IMPOSIBLE CALCULAR	\$ 132.851.000,00

Fuente: Alcaldía municipal de Tota, 2016

La gestión ambiental de la administración 2016-2019 se concentró en metas de educación ambiental, fortalecimiento de juntas de acueducto rural, cultura ambiental de protección del sector de Playa Blanca e identificación de áreas de protección. Se habla también de realizar talleres sobre adaptación al cambio climático, pero no se articula con los programas de recursos hídricos del municipio (Alcaldía Municipal de Tota, 2016).

- **Municipio de Cuítiva:** el municipio es el más rezagado en la actualización del EOT, pues no se ha implementado la revisión general que debió ser aprobado en el año 2017. En el EOT vigente parte del diagnóstico realizado reconoce el Lago de Tota como principal cuerpo de agua del municipio, pues el agua de consumo humano es captada de este. Sin embargo, destaca que existe una degradación paulatina de la calidad del recurso hídrico debido a la contaminación y expansión de la frontera agraria en la zona del lago bajo su jurisdicción (Alcaldía de Cuítiva & CORPOBOYACÁ, 2005). En este EOT se acordó reglamentar el uso del recurso hídrico y fomentar la conservación de las cuencas y humedales, y los programas propuestos en este documento se enfocan al desarrollo sostenible de la economía del municipio. El cambio climático no se tuvo en cuenta en la formulación de estos programas. Como instrumento de manejo de vertimientos de aguas residuales de la población del caserío Llano de Alarcón, que se encuentra en la cuenca

del lago, se aprobó el PSMV municipal en el año 2010, el cual tenía ejecución de actividades de un 72% y contempla construir una PTAR en la zona (CGR, 2013).

- **Municipio de Sogamoso:** este es el único de los cuatro municipios que no tiene territorio en el espejo de agua del Lago, sin embargo algunas de sus veredas hacen parte de la cuenca del Lago, las cuales han sido intervenidas y ocupadas sobre todo en el sector del páramo de Siscunsi. El POT de Sogamoso contiene diferentes políticas y estrategias del ordenamiento, entre las que se encuentra la política ambiental y la política de gestión del riesgo de desastres. Entre los lineamientos de la política ambiental se encuentra implementar la Estrategia de políticas y Acciones en Materia de cambio Climático, además de propender por la protección del recurso hídrico para evitar disminución de la oferta y calidad, garantizando el mantenimiento de la oferta hídrica. Entre las acciones de la política de riesgo se encuentra analizar permanentemente escenarios que permitan guiar la toma de decisiones para reducción y manejo de desastres. Cabe agregar que el POT contempla todo un capítulo de Manejo y Adaptación al Cambio climático, incluyendo acciones de control como mejoramiento de la calidad del aire, contaminación hídrica, e implementación de tecnologías de la Información (Alcaldía de Sogamoso, 2016). Dentro del Plan de desarrollo municipal existe una dimensión ambiental que incluye dos programas: gestión del riesgo resiliente e incluyente, en el que se propone formular la política pública de adaptación al cambio climático entre otros proyectos. El segundo programa de ecoeficiencia y sostenibilidad ambiental incluyente, propone adquirir más predios para provisión de recurso hídrico e intervenir microcuencas para recuperación y protección ambiental como se ve en el cuadro 5 (Alcaldía Municipio de Sogamoso, 2016a).

Cuadro 5. Metas programa de ecoeficiencia y sostenibilidad Incluyente, Sogamoso 2016-2019

Indicador de Producto	Línea Base	Meta de Producto
Número de documentos de caracterización de flora, fauna y humedales del Municipio.	0	1
Número de hectáreas adquiridas para la provisión del recurso hídrico.	943	1143
Número de hectáreas con cobertura vegetal.	1355	1490
Número de micro cuencas intervenidas para recuperación y protección ambiental.	0	4
Número de personas capacitadas (PRAES Y PROCEDAS).	5476	13476
Número de empresarios capacitados.	N.D	240
Número de empresarios vinculado a reconversión tecnológica.	0	25
Número de visitas de control de emisión y fuentes contaminantes.	750	1750
Número de jornadas desarrolladas de control de contaminación de aire por fuentes móviles.	4	4
Número de operativos desarrollados de control de contaminación por ruido.	48	150
Número de documentos del Plan Ambiental 2016 - 2026	0	1

Fuente: alcaldía municipal de Sogamoso, 2016

En relación a esto último, el informe de gestión de gobierno de Sogamoso rinde cuentas de su plan de gobierno, el que constata la compra de 105,6 Ha en zonas de recarga de acueductos a un costo de COP189.154.650, de las cuales 42,6 Ha se encuentran en la cuenca del Lago de Tota, y están a la espera de un concepto técnico de viabilidad ambiental por parte de CORPOBOYACÁ, para la compra de 137 Ha más. En contraste, el proyecto de formulación de la política de adaptación al cambio climático no tuvo presupuesto ejecutado. Sin embargo, en el rubro de intervenir cuatro microcuencas para recuperación y protección ambiental se ejecutaron COP19.200.000 (Alcaldía Municipio de Sogamoso, 2020).

- **Municipio de Aquitania:** el EOT vigente en el municipio corresponde al aprobado en el año 2004 con vigencia hasta el 2019, en el cual se abordan proyectos de restauración y protección de zonas de bosque, protección de rondas hídricas y el manejo integral de la cuenca del Lago de Tota. Sin embargo, no se ha expedido un proceso de revisión general del EOT, como si lo han hecho los demás municipios, y se ha hecho un seguimiento por parte de CORPOBOYACÁ en el que se concluye que la mayoría de proyectos formulados no tienen correlación con elementos de Ordenamiento y están mal formulados (CORPOBOYACÁ, 2009). En consecuencia, el principal documento de gestión del municipio es el Plan de Desarrollo, que contempla el programa “firmes por un ambiente sano, soluciones para el cambio climático”; donde se busca promover la protección y recuperación de áreas de importancia estratégica, reforestación y aislamiento de zonas de recarga hídrica y de interés ambiental, e implementar acciones de descontaminación de cuerpos de agua que viertan aguas al lago de Tota. En cuanto a los programas de cambio climático, fueron dirigidos en marco de proyectos productivos sostenibles, y comunicación del riesgo de desastres asociado a inundaciones y sequías en el territorio (Alcaldía municipal de Aquitania, 2016).

El municipio cuenta con un Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) aprobado en el 2010 para modernizar y poner en funcionamiento la PTAR del municipio, con inversiones de COP 1.300.000.000 pero según la Contraloría General hasta el año 2013 no se había ejecutado dichas obras y el vertimiento continúa afectando el lago de Tota (CGR, 2013).

#### **4.1.1.4. Instrumentos de gestión de CORPOBOYACÁ**

CORPOBOYACÁ cuenta con el Plan de Gestión Ambiental Regional (PGAR), como plan rector de la Institución para toda su jurisdicción. En su componente diagnóstico cuenta con una línea de Gestión Integral del recurso hídrico, la cual aborda gestión de la oferta hídrica, implementación de POMCA's, gestión de Calidad hídrica, Instrumentos económicos, Monitoreo y Laboratorio de Calidad, entre otros. Como parte de la gestión hídrica, este documento brinda una lista de municipios que hasta esa fecha tenían un Programa de uso Eficiente y ahorro de Agua (PUEAA), de los cuales Aquitania y Tibasosa eran los únicos que habían suscrito su PUEAA ante la Corporación, de los municipios que captan agua para el consumo humano del Lago (CORPOBOYACÁ, 2009, p106). Entre las empresas que también captan agua del lago para uso industrial, INDUMIL de Sogamoso y HOLCIM de Nobsa poseían PUEAA. El documento también hace referencia a las microcuencas priorizadas para recuperación de vegetación nativa, en la que se menciona a Aquitania, con planes en las veredas de Suse, Cajón, Hatolaguna y Pérez. Entre las líneas estratégicas del PGAR se encuentra la gestión integral del recurso hídrico, en la que se formula el programa de gestión de la oferta hídrica, que tiene líneas de acción como uso eficiente y ahorro de agua, reforestación protectora de zonas de abastecimiento, implementación de POMCA's y prevención y mitigación del riesgo relacionado al recurso hídrico. Con respecto a este último, no se hace mención del cambio climático como uno de los riesgos asociados a la oferta hídrica. Adicionalmente se debe señalar que el PGAR solamente incluye el cambio climático como un componente asociado en la gestión del riesgo y en la asesoría a Juntas administradoras de acueductos rurales (JAAR), más no como un componente transversal en la planificación ambiental de la Corporación (CORPOBOYACÁ, 2009, p272). Sin embargo, en el plan de acción de CORPOBOYACÁ 2016-2019, es incluida por primera vez como línea estratégica la vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Su principal proyecto es la formulación e implementación de acciones para la gestión del riesgo y adaptación al cambio climático, además de contener un proyecto denominado Acciones de manejo en el Lago de Tota por el CONPES 3801 (CORPOBOYACÁ, 2016).

Otro de los documentos de planificación con los que cuenta CORPOBOYACÁ es el POMCA Lago de Tota. Formulado en el año 2005, este documento hace un resumen del diagnóstico ambiental de la cuenca hasta esa fecha, el que presenta la problemática ambiental en temas de Flora, fauna, suelos, agua, aire, alcantarillado y acueducto. Principalmente las afectaciones más importantes sobre el recurso hídrico son contaminación por escorrentía de agroquímicos, y en segunda

medida, la contaminación por el vertimiento de aguas residuales domésticas del casco urbano de Aquitania, centros poblados y hoteles en la cuenca, los cuales generan concentraciones altas de nutrientes en el Lago y en consecuencia eutrofización (CORPOBOYACÁ & PUJ, 2005a). Ya en la formulación de programas del documento, se encuentra el programa de manejo del recurso hídrico y calidad de agua. Este contempla un total de cinco (5) subprogramas que cuentan con proyectos específicos para llevar a cabo las propuestas, que son resumidos en la tabla 4. En cuanto a cambio climático, el POMCA propuso un subprograma de infraestructura para seguimiento climático de la región, el cual consiste en identificar estaciones climatológicas y hacer mantenimiento o reactivar según sea el caso, y montar al menos 5 estaciones climatológicas y meteorológicas nuevas, con un presupuesto de COP1.205.500.000.

Tabla 4. Programa de manejo de recurso hídrico y calidad de Agua, POMCA lago de Tota

SUBPROGRAMA	Objetivo(s)	Presupuesto (COP)	Resultados esperados	Tiempo de ejecución	Indicador de verificación
<b>Restauración de bordes de quebradas y cuerpos de agua</b>	Concertar procesos de restauración de bordes de quebradas, definir modelos y dimensionar actividades por fases.	13.000.000	Esquemas de restauración, definición de rondas	1 a 3 meses	Modelos de restauración por rondas. Definición de cantidades de materiales. Actas de talleres con la comunidad. Fichas de acuerdo en siembra de vegetación.
	Producir y sembrar material vegetal requerido para el desarrollo FASE I	37.000.000	10 km de rondas en proceso de restauración	1 – 2 años	Rondas en proceso de restauración
<b>Saneamiento Básico</b>	Caracterizar de las aguas residuales y fuentes receptoras	23.000.000	Documento sobre aguas residuales caracterizadas	6 meses	Documento sobre caracterización de aguas residuales. Listado de casas visitadas
	Diseño de sistema de manejo de aguas residuales	15.500.000	Propuesta para el manejo de aguas residuales	6 meses	Documento resumen de giras realizadas
	Construcción de sistemas de manejo de aguas residuales	537.500.000	500 unidades sanitarias construidas	1,5 años	Unidades construidas
<b>Manejo integral de vegetación acuática</b>	Revisión de fuentes secundarias y primarias	23.000.000	Documento sobre propuesta de manejo de elodea	6 meses	Documento de revisión

SUBPROGRAMA	Objetivo(s)	Presupuesto (COP)	Resultados esperados	Tiempo de ejecución	Indicador de verificación
	Realizar control en la extracción de elodea	1.404.000.000	Control a la reproducción de elodea	Durante 12 años	Líneas de control de crecimiento y montículos de elodea extraídos
<b>Técnicas para el manejo eficiente del agua</b>	Definir unidades productivas con los sistemas de riego a evaluar (aspersión, gravedad y goteo) en las dos zonas de trabajo.	2.300.000	Firma de 12 convenios con productores.	1 mes	Número de convenios firmados con productores.
	Definición de protocolos de riego. Diseño del experimento	500.000	Diseño del experimento por bloques y tratamientos.	1 mes	Diseño del experimento.
	Capacitación a operarios para seguimiento de protocolos de riego.	2.300.000	Seis talleres realizados.	2 meses	Número de talleres realizados.
	Recolección de información de control de los protocolos.	19.400.000	Registro de variables y de estado productivo de los cultivos, incluyendo rendimiento.	12 meses	Número de registros recolectados de acuerdo al diseño experimental.
	Recolección de información de producción.	2.500.000	Datos de producción	Mes 6, 10 y 14	Evaluación productiva en cada unidad del proyecto
	Análisis estadístico	6.000.000	Análisis estadístico	3 meses	-
	Informe de Investigación	6.000.000	-	3 meses	Documento final resultado de investigación.
	Divulgación de la información	22.800.000	4 talleres, 2 cursos de capacitación y cartilla	5 meses	Talleres, capacitaciones y publicaciones realizadas.
<b>Construcción de acueductos</b>	Diseñar sistemas para dotación de acueductos veredales	78.000.000	Documento sobre requerimiento de acueductos veredales y diseños	6 meses	Actas de reunión. Levantamientos topográficos. Diseños propuestos.

Fuente: adaptado de POMCA lago de Tota, 2005

El PGAR se propuso formular y/o actualizar los planes de Manejo Ambiental de áreas Protegidas, por lo que se implementó el PMA del PNR Siscunsi-Ocetá, el que se sobrepone en una zona de la cuenca del Lago de Tota. Este documento formula varios programas entre los que se encuentra el monitoreo y manejo de humedales de alta montaña, aislamiento de predios para la protección ambiental y un proyecto de identificación y aislamiento de nacimientos hídricos prioritarios (CORPOBOYACÁ & Neotropical, 2011).

En cuanto a la implementación del POMCA del Lago de Tota, según el PGAR (2009) se realizan cuatro monitoreos al año en estaciones del Lago de Tota y sus afluentes para hacer seguimiento a la calidad, se hizo un estudio junto con la Universidad Nacional para evaluar la contaminación por pesticidas de cultivos, se adquirieron materiales y equipos para el laboratorio de limnología y biotecnología sede Santa Inés, se verifican los sistemas de conducción y control en el sector del túnel y creación de grupos de guarda páramos en Aquitania y Tota. Sin embargo, en un informe de la Contraloría General de la República, se resalta que no se ha implementado correctamente el POMCA y que los recursos financieros invertidos frente a las necesidades encontradas son escasos. Incluye que los municipios no han ejecutado obras requeridas para operar PTAR y no hay estimaciones reales del impacto de los desechos orgánicos municipales, agrícolas y piscícolas. Además, denuncia que en el año 2012 había exploraciones mineras de hidrocarburos que no estaban correctamente reglamentadas (CGR, 2013, p11). La evaluación por parte de la Contraloría manifiesta que no se presenta información de la ejecución de los proyectos del POMCA, debido a los cambios y modificaciones realizadas por la Corporación y se señala apenas un cumplimiento del 20% del Programa de conservación del agua y suelo PROCAS (CGR, 2013, p54-55).

Debido a los hallazgos de la Contraloría y en conformidad con el CONPES 3801, durante el año 2012 se instauró una mesa de trabajo para identificar las causas de eutrofización del lago, en la que se priorizó reducir la concentración de fósforo soluble producto de la actividad piscícola. Mediante la implementación de la resolución 1310 de 2017, por la cual se acordó con los productores de trucha del lago realizar labores de recolección, extracción tratamiento y disposición final de excretas y residuos mediante sistemas de colectores (CORPOBOYACÁ, 2019a). Según el informe de gestión del Plan de acción de la Corporación se han adelantado mesas de trabajo de colaboración con Minambiente, WWF y ONG's para proyectos como AICAA, se han llevado a cabo reuniones para la actualización del POMCA, se ha implementado el Plan de ordenamiento ecoturístico de Playa Blanca, además de la construcción de infraestructura adecuada para turismo responsable. En el cuadro 6 se observa el avance del subprograma y proyectos del recurso hídrico, además que las acciones comprendidas por el CONPES 3801

incluyeron evaluación y aprobación de PUEAA's para sectores agropecuarios, se comenzaron los contratos para formulación del PORH, adecuación de rondas hídricas, e implementación de pago por servicios ambientales. Igualmente se llevaron a cabo monitoreos de aguas residuales en el lago a solicitud de la comunidad y control de cuencas priorizadas (CORPOBOYACÁ, 2020).

Cuadro 6. Ejecución de proyectos subprograma Gestión Integral del recurso hídrico.

No.	Proyectos	Apropiación 2019	% Ejecución Financiera	% Avance físico
21	PORH Cuenca alta y media del Río Chicamocha	\$ 2.127.517.000	98	100
22	Uso eficiente y ahorro del agua	\$ 7.516.144	77	100
23	Administración del recurso hídrico	\$ 63.887.224	88	89
24	Conservación protección y recuperación del Sistema <u>integrado</u> de aguas termo minerales y aguas subterráneas	\$ 657.006.626	95	100
25	Implementación del Sistema Integral Recurso Hídrico (SIRH).	\$ 9.569.154	97	100
26	Descontaminación de fuentes hídricas	\$ 4.064.090.318	85	100
27	Acciones de manejo en Lago de Tota de acuerdo a las competencias de la Corporación en el CONPES 3801	\$ 2.150.000.000	91	100
28	Planes de manejo de acuíferos	0	N.A.	100
29	Metas de carga global contaminante en las fuentes hídricas	\$ 260.897.164	95	99
	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 9.340.483.630</b>		

Fuente: CORPOBOYACÁ, 2020.

Como parte de la ejecución del PMA del PNR Siscunsi-Ocetá se puede destacar que se desarrollaron convenios para la siembra y propagación de frailejones en el parque, vigilancia de predios aislados en la priorización de zonas de recarga hídrica, además de la reglamentación del plan de ordenamiento ecoturístico del parque, adecuando un sendero con plataformas y puentes de madera, e incluyendo la zona como proyecto piloto de BancO2 (CORPOBOYACÁ, 2020).

#### 4.1.2. Calidad del Recurso Hídrico

Durante los últimos años la calidad del agua en la cuenca se ve afectada en mayor parte a causa de la contaminación por escorrentía de sustancias químicas agrícolas, abonos orgánicos como gallinaza, fertilizantes y pesticidas que son aplicados incorrectamente en cultivos de cebolla principalmente, provocando eutrofización de las aguas del lago (CONPES, 2014). La segunda mayor fuente de contaminación identificada, son los vertimientos municipales de aguas residuales domésticas provenientes de Aquitania, los cuales llegan al lago sin ningún tratamiento. La tercera

fuentes de contaminación del recurso hídrico se debe a las piscícolas que existen en la cuenca, ya sea en el lago o en las corrientes tributarias, pues agregan nutrientes que causan eutrofización (CROPOBOYACÁ & PUJ, 2005a). En menor medida, existe contaminación por inadecuada disposición de residuos sólidos que provocan lixiviados y minería de carbón cuyos drenajes ácidos de mina (DAM) llegan a las corrientes tributarias de la cuenca (Perico, Caro, Acosta & Bohórquez, 2015). Todo lo mencionado anteriormente repercute en la calidad del agua del lago y sus distintos usos, por lo que deterioran la calidad de vida de los habitantes que dependen de la cuenca.

#### **4.1.2.1. Calidad Fisicoquímica**

La calidad fisicoquímica del agua natural sirve como indicador del estado del recurso hídrico y las posibles fuentes de contaminación que generan impactos debido a condiciones naturales o antrópicas. Generalmente se puede establecer mediante indicadores, como lo es el Índice de Calidad de agua en corrientes superficiales (ICA) el cual utiliza los parámetros más usualmente medidos para su determinación: Oxígeno Disuelto (OD), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Conductividad Eléctrica y pH. También se puede incluir la relación Nitrógeno-Fósforo (NT/PT) dependiendo del tipo de actividades en la cuenca, puntos y tiempos de monitoreo (IDEAM, 2013). El índice es adimensional, donde 0 - 0,25 indica condiciones de calidad muy mala, de 0,26 - 0,50 es mala, de 0,51 - 0,70 es regular, de 0,71 - 0,9 es aceptable y de 0,91 a 1 es buena. El IDEAM tiene una estación de monitoreo en el lago cuyos resultados en términos de ICA se muestran en la tabla 5. La estación se ubica en el extremo sur del lago, cerca de donde nace el río Upía; zona en la que hay intensa actividad agrícola. Esta es la razón por la que los parámetros de nitrógeno y fósforo disminuyen la calidad del agua, aunque esta permanezca en el rango aceptable para el promedio realizado durante el año.

Trabajos de investigación realizados durante los últimos años en la cuenca del lago de Tota demuestran que la calidad del agua es muy variable en las diferentes zonas y subcuencas. En el diagnóstico realizado para la formulación del POMCA del Lago, se realizaron jornadas mensuales de caracterización de la calidad del agua de los principales tributarios del lago, encontrando que las cargas de materia orgánica medida en DBO<sub>5</sub> y SST son más bajas en las principales corrientes, pero son muy elevadas en la Quebrada la Mugre de Aquitania, y en menor medida en el Río Olarte, y Quebrada los Pozos con picos en los meses de septiembre y octubre. También se resalta que las cargas de fósforo presentaron mayores concentraciones durante abril y

septiembre en el río Olarte y Hato Laguna y el nitrógeno aumentó su concentración en septiembre en el río Olarte (CORPOBOYACÁ, 2005d).

Tabla 5. ICA promedio anual con 5 y 6 variables estación Escaleras, Lago de Tota.

Año	5 parámetros		6 parámetros	
	ICA promedio	Calificación	ICA promedio	Calificación
<b>2014</b>	0,85	Aceptable	0,77	Aceptable
<b>2015</b>	0,86	Aceptable	0,81	Aceptable
<b>2016</b>	0,89	Aceptable	0,83	Aceptable
<b>2017</b>	0,85	Aceptable	0,76	Aceptable
<b>2018</b>	0,89	Aceptable	0,80	Aceptable

Fuente: IDEAM, 2019.

En el río Hato Laguna se han elaborado estudios de calidad de agua que demuestran el alto impacto de los cultivos en la adición de nutrientes al agua, ya que se encontraron concentraciones de hasta 1,5 mg/L de Fósforo Total, el cual normalmente se encuentra en rangos de  $\mu\text{g/L}$ ; además de que sobrepasa en algunas mediciones los valores de Nitratos ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ) que se encuentran en 0,7 mg/L en promedio (Abella & Martínez, 2012). Un estudio más reciente en la misma corriente encontró niveles de OD sobre 6 mg/L y saturación sobre 75%,  $\text{DBO}_5$  inferior a los 2 mg/L, DQO de 41 mg/L, conductividad de 27 mS/cm. Igualmente se realizaron mediciones de Nitrógeno Total encontrando concentraciones por encima de 10 mg/L y de fósforo Total cercanos a 0,1 mg/L (Plazas Figueroa, 2016). Barrera Sarmiento (2017a) realizó monitoreos de calidad en la microcuenca de la quebrada La Martinera, en la zona alta de la Subcuenca del río Hato Laguna, encontrando que la principal afectación sobre el recurso hídrico se relaciona con niveles bajos de pH (4,1 – 5,14) en algunos tramos de la quebrada, debido principalmente a la actividad minera de carbón en la zona. Estas minas abandonadas, generan drenajes ácidos de mina (DAM) producto de la oxidación de la Pirita del carbón, que aumentan la acidez y hierro en el agua, encontrando concentraciones de 4,6 y 6,9 mg/L de Fe. Sin embargo, el autor también menciona que se detectaron niveles de Fosfatos hasta 5 mg  $\text{PO}_4^{4-}/\text{L}$  y Nitratos por debajo de 10 mg  $\text{NO}_3^- / \text{L}$ , demostrando que la escorrentía agrícola causa fuertes impactos en la corriente incluso en zonas altas cercanas al páramo. En adición a la escorrentía que ingresa al lago se ha encontrado que aproximadamente un 10,25% del fósforo Total que ingresa al Lago proviene de fuentes difusas, y aunque el área de ocupación agrícola de la cuenca es cercana al 18% del total, la

intensiva aplicación de fertilizantes contribuye en gran medida a que estas descargas difusas se puedan incrementar en el futuro (Guío & Rodríguez, 2019).

CORPOBOYACÁ ha reestablecido el laboratorio de calidad de agua en el Lago de tota aproximadamente desde el año 2013, y tiene 22 puntos de medición y monitoreo en la cuenca que permite hacer un seguimiento permanente de la calidad del recurso hídrico (Gómez Viachá, 2014). En los Anexos A y B se puede consultar los nombres y ubicación de los puntos de monitoreo. Teniendo en cuenta lo anterior, en la tabla 6 se presentan resultados del promedio anual de calidad del agua en algunas de las estaciones de la Red de monitoreo de la cuenca del Lago. En estos resultados se observa que las condiciones generales del lago tienden a ser homogéneas en todo el cuerpo de agua, ya que los resultados son similares para todos los parámetros mostrados. Más sin embargo existen algunos puntos con picos de contaminantes, propios de algunas épocas del año que coinciden con la siembra estacional de cultivos. La conductividad se asocia a los sólidos disueltos en el agua, y dada la intensiva producción agrícola en el área se observan los valores mayores a los 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en conductividad, producto de fertilizantes de sulfatos y nitratos de sodio, calcio y magnesio arrastradas por corrientes tributarias (Manahan, 2007).

Los ríos y quebradas analizados recuperan en cierto grado las características fisicoquímicas naturales de la corriente, pues una vez que hay un proceso de contaminación, interviene la autodepuración natural en el que interceden procesos físicos como la sedimentación, procesos químicos como la oxidación, y procesos biológicos como la descomposición (Hernández Muñoz, 1994). También se destaca la disminución de pH y la pobre alcalinidad del río Hato Laguna comparado con las otras corrientes de la cuenca, que perdido parte de su capacidad amortizadora del sistema Carbonato, que como se mencionó anteriormente se deba probablemente a contaminación por aguas mineras de carbón (Girard, 2010). Aunque los ríos manifiestan bajos niveles de SST son indicadores de contaminación agrícola, pues corrientes de alta montaña y pequeños caudales aportan en promedio 1,3 mg/L de SST independiente de la época del año. Igualmente, los niveles de fosfatos resultan bastante altos comparados con los niveles naturales de menos de 1 mg/L en corrientes no alteradas (Jacobsen & Dudgeon, 2008). Los niveles de OD son altos en todos los puntos monitoreados ya que para una temperatura entre 10 y 15 °C y una altura entre 3000 y 4000 msnm, el oxígeno de saturación se encuentra entre 7 y 8 mg/L, pero independientemente de la concentración de OD, si una corriente posee un porcentaje de saturación mayor a 71% puede considerarse de buena calidad (Weiner, 2013).

Tabla 6. Parámetros de calidad de agua en la Cuenca del Lago de Tota 2015-2019.

Estación	Año	pH	C/vidad ( $\mu\text{S/cm}$ )	OD ( $\text{mg/L}$ )	SST ( $\text{mg/L}$ )	NT ( $\text{mgN/L}$ )	PT ( $\text{mgP/L}$ )	A/nidad ( $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$ )	DQO ( $\text{mgO}_2/\text{L}$ )	DBO ( $\text{mgO}_2/\text{L}$ )
<b>Custodia</b>	2015	8,15	74,8	6,76	2,25	-	-	-	5,5	3
	2016	8,09	111,6	6,88	10,8	-	-	-	8,6	4,33
	2017	7,08	109,73	6,58	0,8	16	0,06	52,3	7	2
	2018	7,97	122,1	6,42	0,6	2	0,09	40,16	9	2
	2019	7,86	197,83	6,64	0,5	2	-	41,2	8,25	1,25
<b>Playa Blanca</b>	2015	8,17	74,05	6,97	1,3	-	-	-	7,5	2
	2016	8,59	145,62	7,01	10,1	-	-	-	8,6	3,33
	2017	8,34	106,5	6,54	0,5	6,5	0,07	53,84	5,75	2
	2018	8,16	119,5	6,40	0,4	2	0,1	39,93	7,33	1,33
	2019	7,80	261,08	6,21	0,4	2,25	-	39,67	12	1,25
<b>Centro</b>	2015	8,45	74,75	7,21	1,65	-	-	-	9	3
	2016	8,35	106,80	6,77	9,6	-	-	-	5,33	3,33
	2017	8,49	107,1	6,86	0,4	3,75	0,06	53,86	5,75	1,5
	2018	8,19	117,77	6,53	0,5	1	0,06	40,2	8,5	3
	2019	7,98	241,0	6,77	0,1	1,75	-	39,67	9	1,25
<b>El Túnel</b>	2015	8,22	74,75	6,99	1,55	-	-	-	10	2
	2016	8,23	107,0	6,44	31,1	-	-	-	6,33	3,66
	2017	8,52	106,56	6,75	0,9	1,5	0,39	53,6	3,37	1,75
	2018	8,34	120,38	6,70	0,7	1	0,07	40,63	26,5	0,75
	2019	7,98	347,83	6,71	0,2	1,25	-	41,1	10	1
<b>Sta. Inés</b>	2015	8,37	75,75	7,01	2,35	-	-	-	13	5
	2016	8,35	108,4	7,00	1,3	-	-	-	8,33	4
	2017	8,27	107,78	6,62	0,7	7	0,05	52,7	2,75	1,5
	2018	8,22	114,6	6,28	0,5	1	0,11	39,96	9	1
	2019	7,99	237,7	6,74	0,2	1,75	-	41	9	1
<b>Hato Laguna (desemboca dura)</b>	2015	6,61	38,58	7,14	14,2	11	0,05	-	18	5
	2016	6,57	56,83	7,30	19,6	-	-	-	20,33	4,66
	2017	6,90	39,09	7,07	7	6	0,28	5,37	5	1,75
	2018	6,64	67,70	7,03	14,4	-	-	5,03	22	1,66
	2019	6,52	230,36	6,96	5,5	9	-	7,26	9	1,66
<b>Los Pozos (desemboca dura)</b>	2015	7,30	60,65	7,51	13,92	22	0,05	-	17	4
	2016	7,30	115,50	7,00	19,66	-	-	-	18,66	4
	2017	7,59	56,62	7,06	10,2	3,75	0,18	12	4,25	3
	2018	7,31	194,03	6,88	9,03	-	-	11,7	23	2
	2019	6,98	171,51	6,74	5,5	20	-	15,7	9	1,75
<b>Río Tobal (desemboca dura)</b>	2015	8,13	82,36	7,45	16,03	2	-	-	17	5
	2016	7,68	104,8	7,52	5,6	-	-	-	18,5	3
	2017	8,93	125,6	7,65	4,2	1,5	0,19	51,31	8	2
	2018	7,98	271,83	6,78	6,7	-	-	53,16	25	2
	2019	7,75	192,4	7,63	4,5	31	-	36,55	13	1
<b>Río Olarte (desemboca dura)</b>	2015	8,02	46,48	7,59	4,4	2	-	-	21	6
	2016	7,51	75,2	7,09	14,26	-	-	-	27	3,66
	2017	7,92	57,52	6,95	16,8	1,5	0,10	28,8	10	2
	2018	7,72	83,80	7,31	15,2	-	-	21,5	23	2
	2019	7,81	195,52	7,64	4,1	9	-	28,7	28,7	1,75
<b>La Mugre (desemboca dura)</b>	2015	7,41	376,6	2,75	127,2	33	20	-	194	31
	2016	7,30	654,45	1,82	115,8	-	-	-	220	23,3
	2017	7,74	446,58	2,03	133,0	22	10,43	182,3	133	38
	2018	7,50	601,25	3,96	112,7	-	-	184,83	256	85
	2019	7,21	651,40	3,60	146,5	77,6	-	156,83	288,3	55,6

Fuente: Adaptado de Madroñero (comunicación personal, 15/04/2020)

Aun así, esto no aplica a la quebrada la Mugre de Aquitania que muestra niveles elevados de contaminación orgánica debido a que en ella se descargan las aguas residuales domésticas del casco urbano del municipio (CORPOBOYACÁ, 2005d). La descarga de estas aguas residuales sumadas a los residuos agrícolas provoca mayor eutrofización, disminuyendo el nivel de oxígeno disuelto en el lago debido al crecimiento excesivo de algas que a largo plazo puede matar comunidades de peces y la vida acuática aeróbica (Henry & Heinke, 1999).

#### 4.1.2.2. Estado trófico del Lago de Tota

El estado trófico de un lago es un indicador de calidad de agua muy útil para comprender el grado de eutrofización que presenta. Se puede determinar mediante 3 parámetros: transparencia, fósforo y clorofila  $\alpha$  (Kiely, 1999). Según diferentes autores se puede clasificar un lago según su calidad trófica como se muestra en el cuadro 7. Como ya se ha dicho, la concentración de nutrientes que existen en el agua de la cuenca es elevado para un ecosistema de alta montaña, pero sus efectos se pueden ver reflejados en otros parámetros. Estudios llevados a cabo en el Lago de Tota mostraron transparencia a profundidades medias de 6,74m; Fosfatos ( $PO_4$ ) en 24  $\mu\text{g/L}$  y concentración de 0,83  $\mu\text{g/L}$  clorofila  $\alpha$  (Hernández, Aguirre, Palacio, *et al*, 2013).

Cuadro 7. Calidad trófica de lagos según diferentes autores.

Categoría	Carlson			OCDE			Keily		
	Disco Secchi (m)	Fósforo ( $\mu\text{g/l}$ )	clorofila $\alpha$ ( $\mu\text{g/l}$ )	Disco Secchi mín (m)	Fósforo ( $\mu\text{g/l}$ )	clorofila $\alpha$ ( $\mu\text{g/l}$ )	Disco Secchi (m)	Fósforo ( $\mu\text{g/l}$ )	clorofila $\alpha$ ( $\mu\text{g/l}$ )
<b>Ultraoligotrófico</b>	>16	<1,5	<0,12	>6	<4	<1	-	-	-
<b>Oligotrófico</b>	4 – 16	1,5 – 6	0,12 - 0,94	3 – 6	4 – 10	1 - 2,5	>4	<10	<4
<b>Mesotrófico</b>	1 - 4	6 – 48	0,94 – 20	1,6 – 3	10 – 35	2,5 – 7,9	2 – 4	10 – 20	4-10
<b>Eutrófico</b>	0,12-1	48 – 384	20 – 425	0,7 – 1,5	35 – 100	8 – 25	<2	>20	>10
<b>Hipertrófico</b>	<0,12	>384	>427	< 0,5	>100	>25	-	-	-

Fuente: Adaptado de Carlson (1977), Caspers (1982) & Kiely (1999).

Como se puede apreciar, por variables de transparencia y Clorofila  $\alpha$ , el lago de Tota tiende a ser Oligotrófico, más sin embargo por concentración de fósforo como nutriente limitante, el lago tiende

a la eutrofia. Otros autores coinciden en que las condiciones del lago son mesotróficas tendientes a la eutrofización (Plazas Figueroa, 2016) (Guío & Rodríguez, 2019). Sin embargo, los limitados periodos de tiempo para análisis de parámetros que muchos autores tuvieron, no permiten observar el panorama completo de los cambios estacionales del año. Es así que se llevó a cabo un estudio de variabilidad del Índice de Estado Trófico (IET) en un ciclo anual del lago, en el que se encontró una alta variabilidad espacio-temporal del índice calculado a partir de concentración de PT, pero una tendencia de meso-eutrofia en la mayor parte de monitoreos, siendo las desembocaduras de las corrientes Hato Laguna, La mugre y el centro del lago chico las que tienen mayor IET. En un análisis más profundo, este estudio encontró que, mediante el modelo de estado trófico simplificado para todo el Lago, se presenta una condición oligo-mesotrófica y demostraron mediante análisis isotópicos que la gallinaza como fertilizante aporta cerca del 86% del nitrógeno consumido por el plancton del lago (UPTC & CORPOBOYACÁ, 2016).

#### **4.1.2.3. Calidad hidrobiológica**

El estado trófico está muy asociado a las comunidades hidrobiológicas que hacen parte del lago y la cuenca, y el fitoplancton es la base de la cadena trófica de un ecosistema acuático. Proyectos hechos en el lago demostraron la transparencia disminuyó estacionalmente a medida que creció el fitoplancton cuando hubo enriquecimiento de nitrógeno al haber lluvias y mayor concentración de fosforo cuando hubo baja precipitación. Estos cambios estacionales develan una gran diversidad ecológica en el lago, siendo el fitoplancton más encontrado en el estudio el correspondiente al grupo funcional basado en morfología (GFBM) IV, los cuales son organismos de pequeño tamaño sin estructuras como *Closterium* sp., *Monoraphidium* cf. *minutum* y *Staurastrum leptocladum*; y el GFBM VII, que son colonias con fibras viscosas para agrupar algas que aumentan su volumen como por ejemplo *Cryptomonas* cf. *ovata* y *Gymnodinium* sp (Muñoz-López, Aranguren & Duque, 2017). En el siguiente nivel trófico se encuentra el zooplancton, el cual fue estudiado en las dos zonas del lago (grande y chico) durante un ciclo anual, en el que se encontraron 9 especies, donde se presentaron mayores densidades de zooplancton en junio y julio (>14000 org/m<sup>3</sup>), mientras que las menores densidades se presentaron en febrero (890 org/m<sup>3</sup>). Las especies más abundantes en el lago grande fueron *Daphnia laevis*, *Bosmina longirostris* y en el lago chico fue *Metacyclops leptopus totaensis*. Además, se encontró plasticidad por parte de algunas especies, lo que indica que no consumen únicamente fitoplancton y en épocas de escasez, consumen detritos u otro zooplancton (Gil Padilla, 2016). En otra investigación se describe una red trófica de invertebrados acuáticos, más grandes que el

zooplancton, asociada con la *Egeria densa*, o Elodea, la cual se introdujo en el Lago de Tota y es una planta sumergida caracterizada por su alta tasa de colonización y muchas veces considerada maleza. Se realizaron muestreos en periodos de transición y lluvias, en cuatro estaciones en la zona litoral del Lago de Tota, en la que se encontraron 26 taxones (especies), de las cuales destacan pequeños moluscos, coleópteros y los más abundantes fueron larvas de mosquitos (*Dicrotendipes* sp.) (Pedroza, Caraballo & Aranguren, 2016).

Sin embargo, esta diversidad no solo se encuentra en el espejo de agua, también hay variedad de organismos en las corrientes de la cuenca, ya que se han encontrado en la quebrada los Pozos individuos bentónicos de las familias *Physidae*, *Tubificidae*, *Psephenidae*, entre otros. A partir de esto se pudo determinar que, en las zonas más altas de la quebrada, cercanas a su nacimiento, la abundancia de la familia *Elmidae* es indicador de aguas limpias y sin intervención, mientras que en la zona de la desembocadura en el lago, la presencia de *Physidae* es indicador de aguas contaminadas con materia orgánica y nutrientes (Noriega, Castillo, Vásquez & Monroy, 2010). En la zona norte de la cuenca del lago se observaron individuos fitoplanctónicos en abundancias relativamente bajas, y una leve disminución al aumentar los caudales de la corriente La Martinera, en la que las algas más frecuentes eran del género *Chlorella*, *Avícula*, *Pinnularia* y *Closterium*. Igualmente se identificaron macro invertebrados de familias *chironomidae* y *Gyrinidae* en algunos lugares donde alrededor de la quebrada había presencia de potreros de ganadería (Barrera Sarmiento, 2017, p95).

Existen indicadores biológicos de la calidad del agua, mediante los cuales se puede explicar en cierta medida el grado de contaminación de un cuerpo de agua. La ecología de los macroinvertebrados acuáticos es la más usada, dada la facilidad de su captura, cuantificación y cualidades asociadas a ciertos rangos de calidad, como el desarrollado por Gil, Pedroza & Aranguren (2016), en el cual utilizan 18 variables fisicoquímicas y biológicas para crear un Indicador de calidad hidrobiológica, entre los cuales se observa que las zonas del Túnel y Hato Laguna presentan condiciones aceptables (I), La Custodia y Santa Inés presentan condiciones medias (II) y Los Pozos y Llano Alarcón condiciones bajas (III). Sin embargo, se podrían usar indicadores adaptados, como el caso de BMWP/Col, la que contiene la metodología validada para el país en lo que se refiere a calidad hidrobiológica del agua (Álvarez Arango, 2005).

- **Contaminación por pesticidas:** adicionalmente a los nutrientes se debe mencionar la contaminación de compuestos orgánicos persistentes (COP's) provenientes de pesticidas agregados a los cultivos de la región para evitar perder cosechas ante plagas de insectos, bacterias y hongos. El peligro que representan estas sustancias se debe a que no son

removidas fácilmente por sistemas de tratamiento de agua residuales o potables, y siendo el lago una fuente principal de agua para consumo humano, no se deben ignorar (Metclaf & Eddy, 2003). En la cuenca del lago estudios recientes han demostrado que el riesgo de movilidad de pesticidas es alto, sobre todo en zonas intensamente cultivadas donde a pesar de las bajas concentraciones de plaguicidas encontradas (malatión, tebuconazol, difenoconazol y clorotalonilo), debido al transporte por escorrentía superficial constante estos quedan depositados en los sólidos sedimentables del lago (malatión y clorotalonilo en concentraciones de 1,90 mg/kg a 4,38 mg/kg y de 0,27 mg/kg a 1,29 mg/kg respectivamente), disponibles a los microorganismos bentónicos (Mojica & Guerrero, 2013). Otras investigaciones implementaron pruebas de toxicidad para determinar posibles efectos perjudiciales sobre organismos, evaluando el agua y sedimentos provenientes de afluentes de la cuenca del lago: Hato Laguna, El Tobal, Los Pozos y Agua Blanca; donde se registró subletalidad y letalidad en organismos *H. Attenuata*, indicando una potencial influencia negativa sobre organismos acuáticos nativos, con posibles consecuencias sobre la composición, estructura y función de las comunidades hidrobiológicas. (Barrera, Espinoza & Álvarez, 2019).

#### **4.1.2.4. Calidad de agua para consumo humano**

Al ser la cuenca del Lago la abastecedora de una gran parte de la población del departamento de Boyacá, la calidad del agua debe tener condiciones aceptables para su tratamiento de potabilización. Pero la cuenca no solo abastece cascos urbanos de los municipios, también son captadas aguas superficiales para acueductos rurales. Como fuente de información sobre agua de consumo humano se encuentra el Índice de Riesgo de Calidad del Agua para consumo humano (IRCA), desarrollado en Colombia para calificar el agua potable mediante parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (MPS & MAVDT, 2007). La entidad encargada de la vigilancia del agua potable es la Secretaría de Salud de Boyacá, y en la tabla 7 se presentan los IRCA de municipios que dependen del Lago de Tota y en la tabla 8 algunos acueductos rurales de la cuenca, desglosados del año 2015-2019. En investigaciones recientes, se ha encontrado que aunque los municipios cuyo casco urbano está fuera de la cuenca se abastecen de la misma captación, hace más de una década el municipio de Iza era el único que conseguía IRCA sin riesgo, la mayoría reportaba riesgo medio y los municipios de Tota y Firavitoba reportaban riesgo alto, así como los IRCA rurales en su mayoría tenían riesgo medio y alto que significa que el agua no es apta para consumo humano (Espinosa R, 2018, p93).

Tabla 7. IRCA Urbano municipios que captan del lago de Tota.

Municipio	2015		2016		2017		2018		2019	
	IRCA Urbano	Calificación								
Aquitania	2.51	S.R.	0.00	S.R.	0.00	S.R.	0.00	S.R.	0.00	S.R.
Cuítiva	7.85	B	9.43	B	4.81	S.R.	7.69	B	14.21	M
Firavitoba	0.00	S.R.	0.00	S.R.	0.13	S.R.	0.41	S.R.	0.00	S.R.
Iza	3.92	S.R.	0.00	S.R.	0.00	S.R.	0.00	S.R.	0.00	S.R.
Nobsa	0.00	S.R.								
Sogamoso	0.89	S.R.	0.60	S.R.	0.28	S.R.	1.82	S.R.	0.36	S.R.
Tibasosa	0.00	S.R.	1.75	S.R.	3.94	S.R.	3.94	S.R.	0.73	S.R.
Tota	0.00	S.R.	2.27	S.R.	0.00	S.R.	0.00	S.R.	0.00	S.R.

Fuente: INS y Secretaría de Salud de Boyacá, 2015-2019. SR= sin riesgo, B= bajo, M= medio

Según lo observado en la tabla se puede deducir que hubo un notable mejoramiento en la calidad del agua, sobre todo en los municipios más críticos que eran Firavitoba y Tota, los cuales desde hace cinco años reportan que su agua es apta para consumo humano. Esto se debe a las inversiones en la Planta de tratamiento de Potabilización realizadas en el año 2013 en el caso de Firavitoba (CGR, 2013). El caso de Tota se debe a una inversión de aproximadamente COP 591.572.000 en su programa de Agua Potable realizada en el año 2012, con la que se mejoró el sistema de suministro y los procesos de coagulación y desinfección en la planta (CGB, 2012). Se observa también que el único municipio que sostenidamente ha tenido riesgo bajo ha sido Cuítiva, el cual a pesar de haber adquirido un nuevo sistema de tratamiento en el año 2011 sigue presentando problemas de desinfección y fallas en las medidas correctivas (SSB, 2012).

Tabla 8. IRCA rural veredas en la cuenca del Lago de Tota.

Municipio (vereda)	2016		2017		2018		2019	
	IRCA rural	Calificación						
Aquitania (Hato viejo)	57.25	A	35.01	A	46.41	A	58.24	A
Cuítiva (Ll. Alarcón)	-	-	-	-	-	-	45.85	A
Sogamoso (Las Cintas)	43.11	A	31.00	M	15.38	M	6.45	B
Tota (La Puerta)	56.63	A	24.69	M	67.75	A	18,98	M

Fuente: Secretaría de Salud de Boyacá, 2016-2019. B = bajo, M = medio, A = alto.

En cuanto al IRCA rural, se puede observar que las condiciones no han mejorado en tres de los acueductos vigilados por la Secretaría de Salud de Boyacá, y solamente se realiza vigilancia del acueducto de Llano Alarcón, Cuítiva desde el año 2019. El acueducto que ha mostrado avances en su tratamiento ha sido el de la vereda las Cintas de Sogamoso, el único que redujo su IRCA a riesgo bajo el último año. Sin embargo, en la cuenca del lago existen muchos más acueductos rurales a los cuales no se les hace vigilancia.

#### **4.1.2.5. Tratamiento de aguas residuales**

El único municipio de la cuenca cuyo casco urbano vierte aguas residuales domésticas directamente al Lago es Aquitania, el que a pesar de tener PTAR para saneamiento de aguas residuales, está abandonada y no se ha optimizado al menos desde el año 2005 (CORPOBOYACÁ & PUJ, 2005a) (CORPOBOYACÁ, 2020). Según el expediente OOPV-00017-18 de CORPOBOYACÁ (2019b), el vertimiento de aguas se ha caracterizado como aguas domésticas con un caudal de 24,18 L/s de flujo continuo, donde los parámetros más críticos son los de sólidos totales (322 mg/L), Coliformes totales y fecales ( $5 \times 10^8$  y  $5,8 \times 10^6$  NMP) y DBO<sub>5</sub> (112 mg/L). El mismo expediente describe el sistema de tratamiento que se esquematiza en la figura 6, y cuenta con los siguientes procesos unitarios:

- *Pre-tratamiento*: aliviadero, cribado y desarenador.
- *Tratamiento primario y biológico*: compuesto de un sistema de lodos activados tipo “zanjón de oxidación” y dos sedimentadores de sección circular.
- *Tratamiento de lodos*: sistema de lecho de secado.
- *Estructuras complementarias*: estación de bombeo, colectores y cajas de control eléctrico y distribución.

El municipio posee como instrumento de Gestión el PSMV, el que se encuentra en actualización para un proceso de ajuste de actividades y revisión de términos de referencia por parte de CORPOBOYACÁ desde el año 2019 (Comunicación personal, 2020). Como se ha observado, el agua residual afecta negativamente la calidad de agua del lago, fomentando la eutrofización del mismo, por lo que es urgente adecuar y optimizar la PTAR y que opere lo antes posible. Por el momento, las obras se han concentrado en el alcantarillado pluvial que es necesario para separar aguas negras de aguas lluvias y no desbordar la capacidad de la PTAR en el futuro, mediante

una inversión de COP3.600.000.000 en conjunto con el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (Ministerio de Vivienda, 2019).

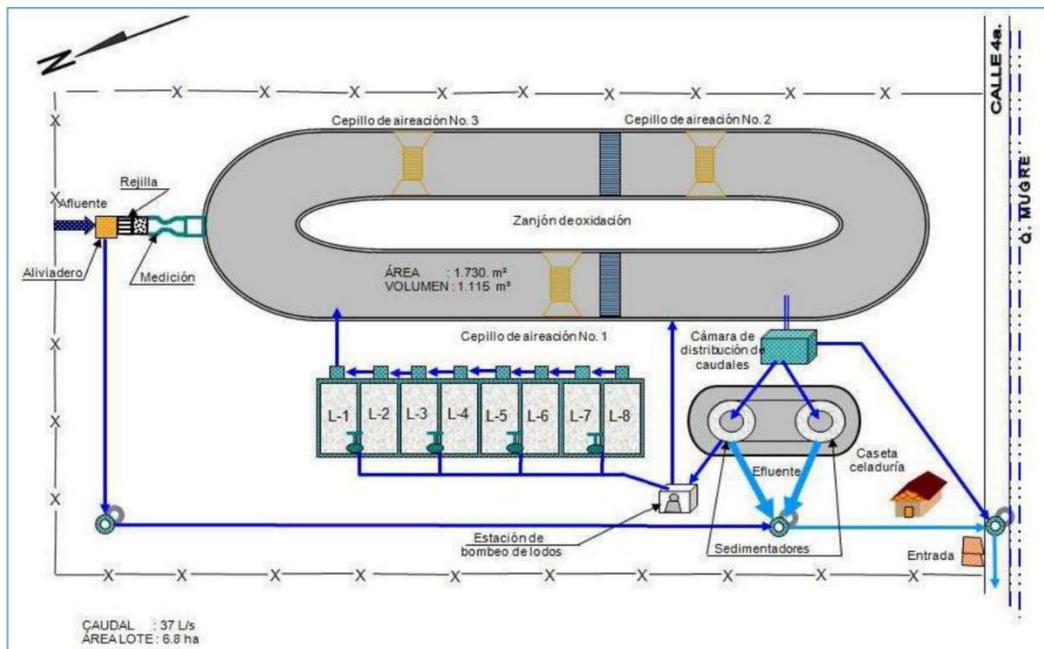


Figura 6. Sistema de tratamiento de aguas residuales de Aquitania. Fuente: Expediente OOPV-00017-18 de CORPOBOYACÁ (2019b).

En la cuenca existen varios centros poblados, viviendas dispersas y complejos hoteleros que en muchos casos no cuentan con conexión de alcantarillado, y no todos tienen sistemas de tratamiento de aguas residuales. Entre los años 2016 y 2019 se registraron en las bases de datos 100 nuevos permisos de vertimientos para un total de 198, de los cuales el 82% corresponde a vertimientos domésticos (CORPOBOYACÁ, 2020). Sin embargo, la autoridad ambiental no reporta la cantidad de expedientes que se encuentran en los municipios de la cuenca, pero afirma que existen 6 hoteles que tienen renovados sus permisos de vertimientos (Corpoboyacá, 2016). Igualmente mediante iniciativas colectivas de la fundación Montecito y Global Nature Fund (GNF) de Alemania se han realizado obras de tratamiento de aguas residuales en el caserío de Llano de Alarcón por medio de un sistema de filtros verdes que beneficia a cerca de 50 familias de dicha vereda. El sistema es natural y no necesita de operación, sólo de mantenimiento de las plantas que crecen en el sistema (Fundación Montecito, 2015). Se han propuesto iniciativas para tratar aguas residuales del complejo turístico de playa blanca, las cuales hacen parte del proceso de adecuación ecoturística de la zona, con el apoyo de la Alcaldía de Tota y la autoridad ambiental (CORPOBOYACÁ, 2020).

### **4.1.3. Oferta y Demanda del Recurso Hídrico**

Como ya se ha discutido la cuenca del Lago de Tota abastece diferentes actividades humanas que demandan el agua para diferentes usos. Esta demanda está muy ligada a la oferta que puede ofrecer la cuenca, y las presiones que ejercen diferentes sectores económicos son más altas que otros, por lo que el control del recurso hídrico requiere atención por parte de diferentes entidades.

#### **4.1.3.1. Oferta hídrica**

La cuenca del lago de Tota primordialmente mide su oferta hídrica en la capacidad volumétrica de almacenamiento de su principal cuerpo de agua, que ha tenido diferentes estudios batimétricos a lo largo de los años. El primero se realizó en 1978, encontrando que el volumen de almacenamiento es alrededor de 1940 Mm<sup>3</sup> de agua (CAR, 1978). Más adelante se le daría la tarea a la Armada Nacional (1998) en el que se descubrió que el volumen era bastante similar al estudio batimétrico de veinte años atrás, pues el volumen máximo calculado fue de 1920 Mm<sup>3</sup> de agua. Sin embargo, el más reciente estudio de batimetría ha concluido que el espejo de agua del lago de Tota tiene un área de 52 km<sup>2</sup> y un volumen total máximo de 1650 Mm<sup>3</sup> (Núñez, *et al*, 2014). Las diferencias entre estos datos se pueden deber a varios factores, como la metodología utilizada, cambios en el área del lago, sedimentación del cuerpo de agua o presiones antrópicas en los recursos hídricos. Sin embargo, las técnicas modernas que utiliza el IDEAM mediante equipo perfilador acústico de corrientes Doppler (ADCP en inglés) permiten un mapeo mucho más preciso del fondo del lago. A su vez, estudios de investigación han revelado que el área de la cuenca ha sido alterada por lo menos durante los últimos 30 años, ya que mediante análisis multitemporal de imágenes LandSat se reveló que hubo una disminución de un 2,65% en el área del espejo de agua, traducido a pérdidas de 1,5 km<sup>2</sup> (Ordúz, 2018).

Sin embargo, se debe tener en cuenta que el aporte hídrico del lago se debe en gran medida a las corrientes superficiales tributarias de la cuenca. Las principales son el río Hato Laguna, río Tobal y río Olarte, mientras corrientes menores son la quebrada Los Pozos, Aguablanca, La mugre, Salitre y Guayachal. El diagnóstico de la cuenca realizado en el POMCA Lago de Tota, incluyó un estudio de oferta de agua para las diferentes subcuenas, encontrando que los caudales de las principales corrientes superficiales son bastante bajos en los meses de noviembre a marzo, y aumentan de abril a octubre con un pico de caudal entre julio y agosto mostrando un comportamiento monomodal, hallando que el caudal medio mensual del río

Hatolaguna es de 0,5 m<sup>3</sup>/s, el río Olarte 0,38m<sup>3</sup>/s, y el río Tobal 0,35 m<sup>3</sup>/s (Corpoboyacá, 2005e, p33). Cabe agregar que el estudio batimétrico del IDEAM (2014) realizó igualmente un estudio de caudales de las corrientes instrumentadas de la cuenca, revelando que el caudal medio del río Hato Laguna es de 0,48 m<sup>3</sup>/s, el río Olarte es de 0,66 m<sup>3</sup>/s y la quebrada los Pozos 0,27 m<sup>3</sup>/s. La discrepancia de datos del río Olarte se debe a las estaciones limnimétricas utilizadas en los análisis estadísticos, por lo que no se pueden considerar íntegras. Como un complemento de análisis de oferta hídrica, el POMCA (2005e, p38) a partir de mapas de cobertura y curva CN, obtuvo de las subcuencas una oferta media de 64,874 Mm<sup>3</sup> anuales. Un estudio más reciente encontró que la oferta hídrica que aporta la escorrentía superficial de la cuenca es aproximadamente 56,27 Mm<sup>3</sup> que corresponde a las entradas por los ríos y quebradas (CORPOBOYACÁ, *et al*, 2016).

En cambio, estudios sobre el agua subterránea de la cuenca resultan escasos, y no existe mucha información al respecto. Se elaboró una investigación hidrogeológica en la cuenca, encontrando que existen pérdidas aproximadamente de 0,5 m<sup>3</sup>/s que no se podían explicar en el balance hídrico, las que debían corresponder a la infiltración del lago y los manantiales de carácter permanente que existen en las zonas del Túnel y Olarte cerca del nacimiento del río Upía (Buitrago & Vergara, 1988). En la actualidad se realizó un análisis del acuífero del lago y mediante trazadores de isótopos se ha descubierto que no toda la infiltración de zonas bajas se relaciona con la precipitación en la alta montaña, y es en su mayoría infiltración de la parte baja (Mariño, Veloza & Martínez, 2018).

Es importante resaltar que las actividades antrópicas en zonas de páramo y el cambio climático pueden estar influyendo negativamente en la oferta hídrica de la cuenca, ya que hay disminuciones entre el 4% y 20% en los caudales medios mensuales de corrientes como el río Hato Laguna (Perico, Caro, Acosta & Bohórquez, 2015)

#### **4.1.3.2. Demanda hídrica**

El POMCA del lago de Tota caracterizó la demanda de recursos hídricos mediante el inventariado de mangueras, pozos y bombas de extracción de agua del lago que se identificaron en las diferentes zonas; este censo arrojó un resultado total de 152 mangueras con diámetros de ¾” hasta 6”, y un total de 75 motobombas (CORPOBOYACÁ, 2005c). Adicionalmente, mediante un análisis potencial de demanda por parte de los usuarios del uso doméstico, industrial, servicios, agrícola y pecuario; se calculó que la demanda podría estar alrededor de 2.748.614 de m<sup>3</sup> al año. Esta cifra según el documento representa un alto índice de escasez en la cuenca, sobre todo en

las épocas de sequía de finales y principio de año, siendo más grave en la zona de Aquitania. Ante la falta de datos de usuarios y concesiones otorgadas, CORPOBOYACÁ expidió una reglamentación para el recurso hídrico en la cuenca, en la que se conceden los caudales autorizados para explotación (CORPOBOYACÁ, 2012). El documento separa el uso de agua por doméstico, abrevadero (pecuario), industrial (piscícola) y riego (agrícola); y lo delimita por subcuencas como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Concesiones de agua reglamentadas por Corpoboyacá, cuenca del lago de Tota.

Subcuenca	Concesión por Uso de agua (L/s)				TOTAL
	Doméstico	Pecuario	Industrial	agrícola	
Hato Laguna	9,971	0,116	-	15,850	25,937
Los Pozos	0,548	0,016	-	0,225	0,789
Tobal	12,497	0,423	-	11,985	24,905
Olarte	2,160	-	-	5,840	8,000
Lago	13,480	0,003	0,03	71,100	84,613
<b>TOTAL</b>	<b>38,654</b>	<b>0,558</b>	<b>0,03</b>	<b>105,000</b>	<b>144,242</b>

Fuente: adaptado de CORPOBOYACÁ, 2012.

Adicional a la anterior normativa, se ha reglamentado el uso del recurso hídrico a través de la captación del Túnel de Cuítiva, mediante la resolución 4574 de 2019, correspondiente a usuarios fuera de la cuenca del Lago de Tota. En la tabla 10 se muestra un resumen de los caudales concesionados por usos:

Tabla 10. Concesión de agua reglamentada por Corpoboyacá, Captación El Túnel

Captación El Túnel	Concesión por Uso de agua (L/s)				TOTAL
	Doméstico	Pecuario	Industrial	agrícola	
Municipios	418,140	-	-	-	418,140
Industrias	6,280	-	30,300	-	36,580
Otros Usuarios	-	1,854	-	291,220	293,744
<b>TOTAL</b>	<b>424,420</b>	<b>1,854</b>	<b>30,300</b>	<b>291,220</b>	<b>747,794</b>

Fuente: adaptado de CORPOBOYACÁ, 2019c

De lo anterior se debe resaltar que se agregan nuevos municipios a las captaciones para uso doméstico, los cuales son Corrales, Busbanzá y Tópaga. Con los datos oficiales de la autoridad

ambiental, se puede calcular la demanda hídrica de la cuenca por sectores económicos como se muestra en el cuadro 8.

Cuadro 8. Demanda hídrica actual de la Cuenca del Lago de Tota.

Zona	Demanda de Recursos Hídricos (Mm <sup>3</sup> /año)				
	Doméstico	Pecuario	Industrial	Agrícola	TOTAL
Dentro de la cuenca	1,219	0,018	9,4x10 <sup>-4</sup>	3,311	4,549
Fuera de la cuenca	13,385	0,058	0,955	9,184	23,582
<b>TOTAL</b>	<b>14,604</b>	<b>0,076</b>	<b>0,956</b>	<b>12,495</b>	<b>28,131</b>

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el sector doméstico usa la mayor parte del agua del lago de Tota, recalando la importancia de la cuenca para el aprovisionamiento de los habitantes de la provincia de Sugamuxi. Para actividades agropecuarias se utiliza casi la misma proporción de agua, lo que indica que es la actividad económica principal dentro y fuera de la cuenca y que la actividad industrial es la menos demandante. Sin embargo, existen usuarios irregulares que no se encuentran reglamentados, algunos de ellos aún captan agua sin pedir permisos a la Corporación, para uso agrícola o doméstico generalmente. Según CONPES (2014) existen usuarios que probablemente extraen agua ilegalmente de los cuerpos hídricos y que la demanda puede ser mayor a la concesionada por CORPOBOYACÁ en alrededor de 60 L/s, aclarando que dichas captaciones no funcionan continuamente. Por otra parte, en la investigación de la microcuenca La Martinera se encontró que cerca del 17% del agua es extraída irregularmente por los habitantes de la vereda Las Cintas, siendo la agricultura el sector que demanda más agua (Barrera, 2017). Este fenómeno se puede replicar en zonas de la cuenca dispersamente pobladas, por lo que la demanda real de recurso hídrico es desconocida.

- ***Demanda futura:*** el uso actual del agua se encuentra reglamentado y se supondría que la demanda futura seguirá estable en los próximos años. Sin embargo, se debe revisar el factor poblacional, pues el aumento de habitantes en la zona del valle de Sugamuxi ineludiblemente aumenta la demanda de agua. Por ese motivo la resolución 4574 de 2019 concesiona a 10 años variando el caudal para uso doméstico de los municipios. Estas diferencias son entre 1,7% y 8,9% dependiendo del municipio y su proyección de habitantes para el 2030, ya que algunos municipios tienden a estancarse o decrecer

poblacionalmente (CORPOBOYACÁ, 2019c). En el caso del municipio de Aquitania, la Corporación no ha ampliado el caudal de concesión a pesar de que el casco urbano ha crecido desde el año 2005, sin embargo la población rural se ha estancado en 16.000 habitantes aproximadamente desde la década de los 80`s (Secretaría de Salud de Boyacá, 2013). Otra variable importante se trata de la demanda para usos agrícolas, que según CONPES (2014) se incrementaría 81% si no se controlaba y legalizaban los usos para el año 2030. Sin embargo, las tendencias de crecimiento del área cultivada en la cuenca se han calculado alrededor de 3,2% cada 5 años y descendiendo (Espinosa, 2018, p112), debido a la reglamentación de la Corporación y los proyectos que se han realizado para uso eficiente y ahorro de agua (CORPOBBOYACÁ, 2020).

#### **4.1.3.3. Balance hídrico**

En el año 2012 la cuenca del lago de Tota tenía una oferta hídrica de sus tributarios alrededor de 1784 L/s y una demanda de 1200 L/s. Esto suponía un alto índice de presión sobre el recurso hídrico, pero se realizaron las reglamentaciones y reducciones a los distritos de riego e industrial de hasta el 85% con lo que la demanda disminuyó considerablemente (CORPOBOYACÁ, 2019). Hoy en día según el Estudio Nacional del Agua (ENA) la cuenca registra una oferta hídrica total de 50,7 Mm<sup>3</sup>/año medio; 14,8 Mm<sup>3</sup>/año seco y 233,9 Mm<sup>3</sup>/año húmedo; por lo que, si se compara con la demanda actual, los años con precipitaciones normales o altas no habría problemas de abastecimiento, pero en años secos la demanda superaría la oferta hídrica (IDEAM, 2019). Sin embargo, el mismo estudio propone una oferta hídrica disponible, la cual es propuesta de una oferta para uso sostenible del agua, preservando en el ecosistema la necesaria para no alterar el ciclo hidrológico, que en este caso corresponde a 29,1 Mm<sup>3</sup>/año medio, 8,5 Mm<sup>3</sup>/año seco y 134,2 Mm<sup>3</sup>/año húmedo, lo cual implica un índice de escasez de alrededor de 69,78% durante años de baja precipitación.

## 4.2. Modelación Hidrológica

Se presentan los resultados del llenado de datos meteorológicos, la calibración y validación de los modelos hidrológicos de las subcuencas analizadas y de los modelos bajo escenarios de cambio climático.

### 4.2.1. Corrección y reparación de datos

Las estaciones escogidas para desarrollar el modelo fueron Las Cintas, Toquilla, Potrerito y Guamo de Sisbacá para las series de precipitación, mientras que las estaciones limnimétricas utilizadas para los datos de caudal fueron Criadero, Hato Laguna y Desaguadero; y las estaciones el Túnel y Aquitania para datos de temperatura. Sin embargo, algunas de estas estaciones presentan vacíos en los datos que se deben reconstruir.

#### 4.2.1.1. Precipitación

La estación de Las Cintas es la que tiene el menor número de datos faltantes de la serie de datos proporcionada por el IDEAM por lo que se utiliza como estación patrón. Los resultados de las pruebas de Correlación son mostrados en la tabla 11. Los datos que se completaron de las series de precipitación se pueden ver en el Anexo C, donde se resaltan en color rojo los valores reconstruidos. Las precipitaciones medias mensuales y anual con los datos completos de las series se muestran en el cuadro 9 y gráficamente en la figura 7.

Tabla 11. Coeficientes de Correlación estaciones de precipitación.

Estaciones	r Pearson	p(x)	R <sup>2</sup> (Bal. Masas)
L. Cintas – Toquilla	0,7508	1,854E-96	0,9971
L. Cintas – Potrerito	0,8013	1,054E-119	0,9995
Toquilla – Potrerito	0,6845	5,875E-74	0,9985
Guamo – L. Cintas	0,7383	7,852E-91	0,9963
Potrerito – Guamo	0,7071	2,546E-81	0,9981
Toquilla – Guamo	0,7841	1,049E-107	0,9980

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 9. Precipitación media mensual y anual estaciones de estudio (mm).

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
L. Cintas	21,446	35,033	65,230	122,11	124,69	148,85	176,38	140,50	100,86	109,76	96,223	38,053	1179,1
Toquilla	14,411	22,554	58,592	114,11	161,96	190,93	201,99	168,34	130,67	105,48	78,120	26,689	1273,8
Potrerito	12,688	24,112	49,274	96,439	102,68	99,812	107,18	89,388	79,531	80,283	67,691	22,373	831,46
Guamo	17,345	31,278	67,545	122,22	186,63	210,07	225,15	199,47	163,70	121,73	82,522	29,260	1456,9

Fuente: adaptado y corregido de IDEAM, 2020.

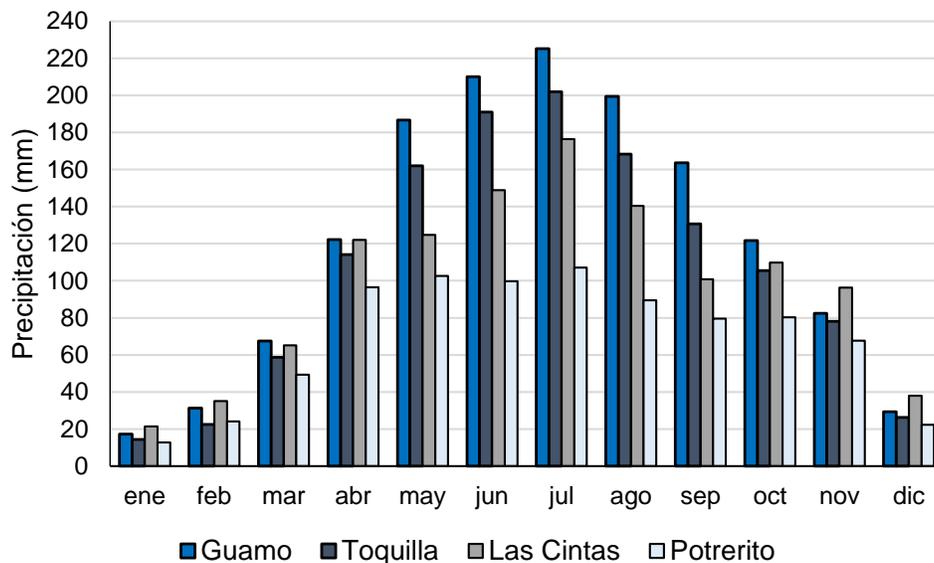


Figura 7. Precipitaciones medias mensuales estaciones de estudio. Fuente: adaptado y corregido de IDEAM, 2020.

Las series analizadas comprenden un periodo de más de treinta años y se puede observar un comportamiento monomodal marcado en las estaciones de Las Cintas, Toquilla y Guamo; con un pico en la precipitación en el mes de Julio, mientras que la estación Potreritos muestra un comportamiento semi-bimodal con precipitaciones similares entre abril y octubre, con pico en julio. La Cuenca del Lago de Tota en su vertiente oriental tiene un comportamiento monomodal cuyos meses más lluviosos son de mayo a agosto y la vertiente occidental muestra comportamiento bimodal donde los meses más lluviosos son abril y octubre ya que la precipitación monomodal típica de la región de la Orinoquia domina la zona nororiental de la cuenca mientras que la zona sur se comporta como área de transición climática entre la región

Andina y del Orinoco manifestando régimen mixto (Núñez *et al*, 2014). La estación Las Cintas es de la región norte, caso contrario de la estación Potrerito que se encuentra en la zona sur, mientras Guamo y Toquilla se localizan en la zona alta del piedemonte llanero. Se destaca que en comparación con estudios anteriores, las estaciones Toquilla y Potrerito han incrementado su precipitación total anual media, en un 0,47% y 1,52% respectivamente durante los últimos 6 años mientras que por el contrario, la estación de Las Cintas ha visto disminuida su precipitación total anual media en un 0,35% (Núñez *et al*, 2014) (González Morales, 2016).

#### 4.2.1.2. Caudal

Los caudales analizados fueron los obtenidos de las estaciones Hato Laguna, Criadero y Desaguadero. El análisis de consistencia mediante balance de masas a las estaciones en cuestión se muestra en la tabla 12, y sus resultados son aceptables, al igual que los coeficientes de correlación de Pearson.

Tabla 12. Coeficientes de correlación estaciones de caudal.

Estaciones	r Pearson	p(x) no correlación	R <sup>2</sup> (Bal. Masas)
H. Laguna - Criadero	0,5420	3.7401E-36	0,9274
H. Laguna - Desaguadero	0,6542	8.211E-49	0,9953
Desaguadero – Criadero	0,4914	6.3556E-28	0,9358

Fuente: elaboración propia.

Solamente Desaguadero – Hato Laguna cumple el criterio de correlación por balance de masas. Las demás correlaciones si bien pasaron la prueba de Pearson, no muestran una correlación estadística fuerte ( $r > 0,65$ ), por lo que se rechaza que sean lineales. Adicionalmente se encontró que existía una estación geográficamente muy cercana a la estación Desaguadero llamada Desviación Canal, que contenía datos completos desde 1970 hasta 2001. Al realizar las pruebas de balance de masas, se encontró correlación lineal entre estas estaciones en el periodo 1980-2001, con R<sup>2</sup> de 0,9957 y r de Pearson igual a 0,7277 por lo que se utilizó el método de promedios para completar datos faltantes en Desaguadero durante ese periodo. Para completar datos faltantes de las demás estaciones se utiliza método de regresión lineal parcial ponderada, encontrando los periodos de tiempo con mayor correlación lineal entre las estaciones y aplicando el método. En el Anexo D se muestra la serie de datos de las estaciones utilizadas y se resaltan

en color rojo los valores reconstruidos. Los caudales medios mensuales con los datos completos de las series se pueden observar en el cuadro 10 y gráficamente en la figura 8.

Cuadro 10. Caudal medio mensual y anual en estaciones de estudio (m<sup>3</sup>/s).

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
H. Laguna	0,187	0,174	0,191	0,356	0,495	0,687	0,945	0,951	0,633	0,597	0,586	0,307	0,509
Criadero	0,087	0,086	0,099	0,193	0,259	0,398	0,508	0,477	0,286	0,268	0,252	0,131	0,254
D.guadero	0,181	0,117	0,123	0,277	0,689	0,960	1,376	1,454	0,978	0,710	0,553	0,318	0,645

Fuente: adaptado y corregido de IDEAM, 2020.

Se observa que existe un comportamiento semi-bimodal en los caudales del río Hato Laguna y la quebrada Los Pozos, asemejándose al registrado por las estaciones Las Cintas y Potrerito, con un mes de desfase. Para el periodo 1971-2018, estas zonas de la cuenca del Lago de Tota muestran que hay influencia de los sistemas del Orinoco y la región Andina en sus regímenes climáticos e hidrológicos, con picos de caudal en Julio, escorrentías similares entre agosto y noviembre; y disminución entre diciembre y marzo. Por el contrario, se observa una marcada tendencia monomodal en el río Olarte, el cual presenta altos niveles entre mayo y septiembre con un pico de caudal en Julio y valores más bajos entre diciembre y marzo, comportamiento similar al de la estación Guamo con un mes de diferencia.

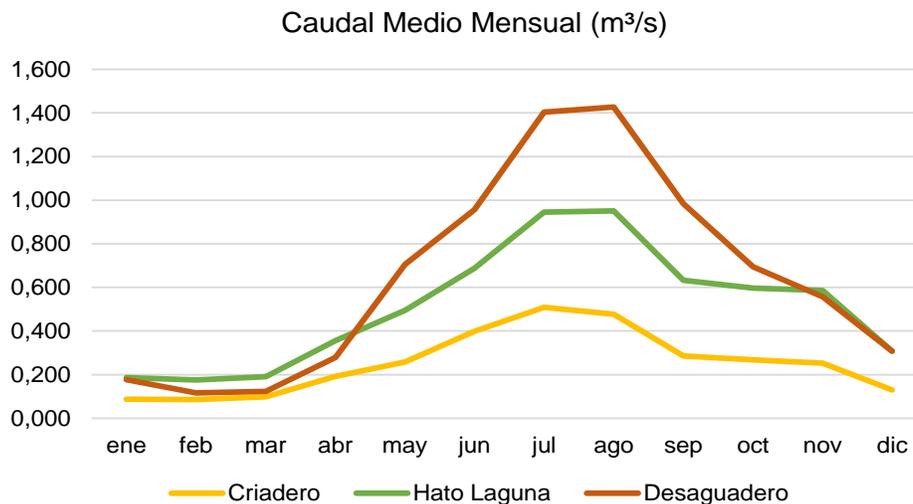


Figura 8. Caudal Medio Mensual estaciones estudio. Fuente: adaptado y corregido de IDEAM, 2020.

### 4.2.1.3. Temperatura

Las series de temperatura analizadas fueron obtenidas de las Estaciones climáticas El Túnel y Aquitania, ya que la primera cuenta con datos desde el año 1978 hasta el 2012 y nuevamente desde el 2017, mientras que la segunda tiene registros desde el año 2004 hasta la actualidad. Para determinar la temperatura ambiente media mensual se deben obtener los promedios de los datos de temperaturas medias diarias. Esta temperatura diaria se registra mediante el promedio aritmético de los valores del termómetro seco de las 7:00, 13:00 y 18:00 o 19:00 horas (IDEAM, 2018). Se descargaron las series de datos de las estaciones mencionadas y se realizó el cálculo, sin embargo, hubo meses sin datos, por lo que se recurrió a las metodologías estadísticas para completar datos faltantes. Por medio de la base de datos del IDEAM se determinó que las estaciones Aeropuerto A. Lleras (24035340) de Sogamoso y Surbata Bonza (24035120) de Duitama, contenían datos suficientes, periodos de tiempo y condiciones geográficas similares para servir como estaciones patrón. Los resultados del análisis de correlación se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Coeficientes de correlación estaciones de temperatura

Estaciones	r Pearson	p(x)	R <sup>2</sup> (Bal. Masas)
<b>Aeropuerto A. Lleras – El Túnel</b>	0,8715	1,359E -70	0,9955
<b>Aeropuerto A. Lleras – Aquitania</b>	0,6130	1,094E -12	0,9997
<b>Surbata Bonza – El Túnel</b>	0,7391	7,864E -27	0,9998
<b>Surbata Bonza – Aquitania</b>	0,2266	0,0115	0,9997

Fuente: elaboración propia.

Existe una buena correlación estadística entre los datos de las estaciones, más sin embargo la prueba de Pearson muestra datos diferentes. La significancia escogida para rechazar hipótesis nula fue de  $p(x) < 0,01$  por lo que se no se considera correlación lineal entre las estaciones de Surbata Bonza y Aquitania, pero las demás si cumplen el criterio de correlación lineal. Luego de escoger los datos faltantes mediante un análisis del comportamiento mensual de las temperaturas, se completaron las series mostradas en el Anexo E. Los valores desde 1979 hasta marzo de 2005 corresponden a la estación el Túnel y desde abril de 2005 hasta 2018 corresponden a la estación Aquitania. Los datos medios mensuales se pueden observar en el

cuadro 11, y gráficamente en la figura 9, corresponden al periodo climatológico de 1989-2018 como sugiere IDEAM (2018).

Cuadro 11. Temperatura mínima, máxima y media mensual y anual (1989-2018) (°C)

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
<b>Mínima</b>	6,84	7,43	8,42	8,92	8,96	8,80	8,29	8,11	7,91	7,98	8,29	7,17	8,09
<b>Máxima</b>	20,82	19,88	19,20	18,82	17,68	16,71	17,85	18,49	19,22	19,48	19,59	19,97	18,98
<b>Media</b>	11,64	11,93	12,14	12,26	12,07	11,72	11,12	11,01	11,29	11,59	12,01	11,78	11,71

Fuente: adaptado y corregido de IDEAM, 2020.

Se puede observar que las temperaturas máximas más altas se registran en los meses de diciembre, enero y febrero; al igual que las mínimas más bajas, mientras que las temperaturas medias más altas son marzo, abril, mayo y noviembre, cuando las medias más bajas ocurren entre julio y octubre. La cuenca ha visto un incremento de temperatura media de alrededor de 0,21 °C con respecto al periodo 1981-2010 (IDEAM, 2011), el cual es similar a las tendencias de calentamiento Global producidas por el cambio climático terrestre que se ha acelerado durante la última década (IDEAM, 2015).

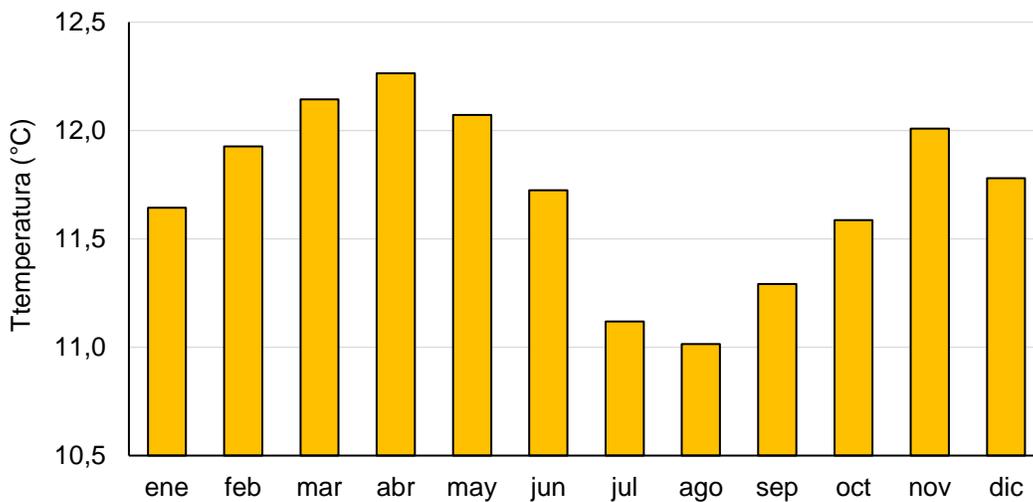


Figura 9. Temperatura media mensual cuenca Lago de Tota 1989-2018. Fuente: adaptado y corregido de IDEAM, 2020.

## 4.2.2. Calibración y validación

A continuación se presentan los resultados de la modelación de las Subcuencas Hato Laguna, Los Pozos y Olarte de la Cuenca del Lago de Tota, los parámetros de cuenca optimizados, los volúmenes de flujo acumulado y la eficiencia del modelo durante los periodos de calibración y validación.

### 4.2.2.1. Subcuenca río Hato Laguna

Esta subcuenca se encuentra en la parte norte del lago de Tota, cuya corriente principal es el río Hato Laguna, resultado de la unión de las quebradas Las Cintas y Martinera. Tiene un área de drenaje de 30,25 km<sup>2</sup> y la longitud de corriente principal es de 11,32 km. El Proyecto en el programa HEC-HMS se crea con las capas obtenidas por medio de ArcGIS, configurando los componentes y el terreno. La serie de datos de precipitación es de la estación Las Cintas, y la de caudales de la estación Hato Laguna. La identificación de corrientes con el programa revela 3 microcuencas en la subcuenca, que se nombraron por su afluente: Martinera, Las Cintas y bajo Hato Laguna; como se observa en la figura 10.

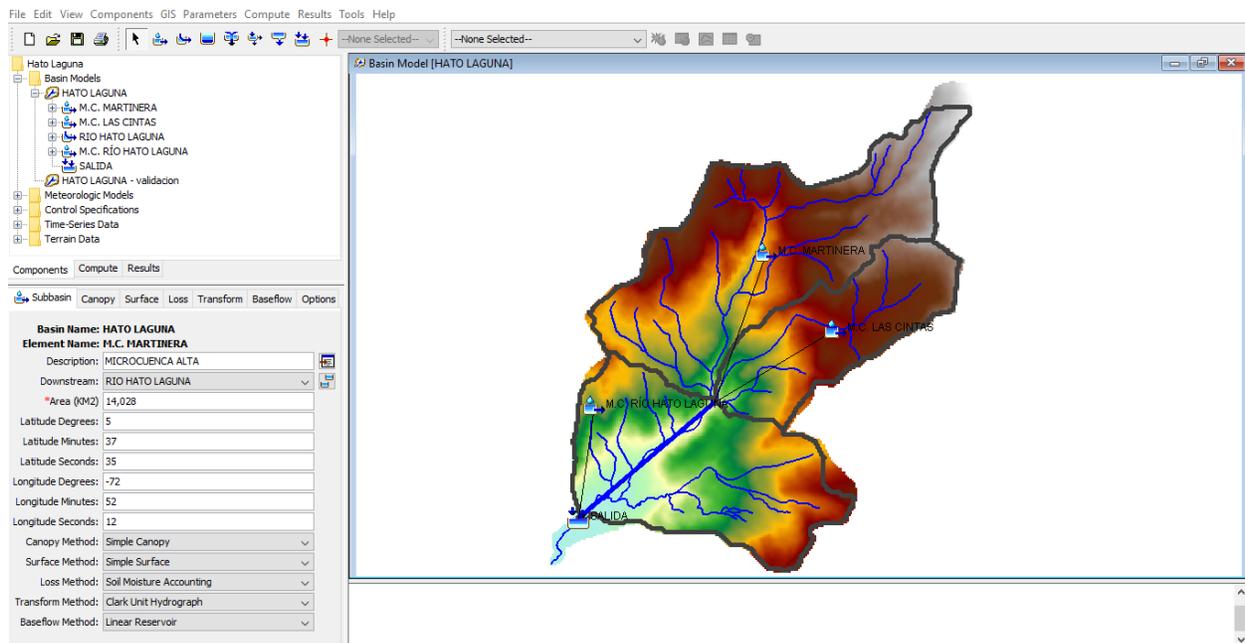


Figura 10. Subcuenca Hato Laguna en HEC-HMS. Fuente: elaboración propia.

Con la información geográfica proporcionada por COPRPOBOYACÁ, y los códigos de la leyenda CLC, se pudo determinar el coeficiente de cultivo para la subcuenca según FAO. Los resultados se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Coberturas del suelo en subcuenca Hato Laguna.

<b>Código cobertura (CLC)</b>	<b>Leyenda</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>(%)</b>	<b>Coeficiente de cultivo (Kc)</b>
2.1.1	Otros cultivos transitorios	33	1,09	1,11
2.1.4.1	Cultivo de Cebolla	30	0,99	1,09
2.3.1	Pastos limpios	67,90	2,24	1
2.4.2	Mosaico pasto-cultivo	830,51	27,45	0,77
2.4.3	Mosaico pasto, cultivo – esp. natural	348,88	11,53	0,77
2.4.4	Mosaico pasto – esp. natural	127,91	4,23	0,77
3.2.1.1.1	Herbazal denso	1315,80	43,49	0,42*
3.2.2.1	Arbustal denso	271,00	8,96	0,7*
<b>TOTAL</b>		<b>3025,00</b>	<b>100</b>	<b>0,623</b>

Fuente: Adaptado de IDEAM, 2010; FAO 2006. \*Adaptado de Buytaert W. *et al*, 2005.

Como se observa en la tabla, casi la mitad de la cuenca tiene algún grado de intervención humana en el uso de suelo, mientras que áreas de páramo no alterado asociadas a herbazal y arbustal denso ocupan poco más del 52% de la cuenca. El Kc de herbazal denso se relaciona a la vegetación de chuscal-pajonal de páramo y el Kc de arbustal denso se asocia a vegetación frailejona y arbustal de páramo, determinados en estudios de páramos sin intervención humana en Ecuador, dado que no se encontró información de esta variable en Colombia (Buytaert, *et al*, 2005) (Barrera & Torres, 2010). El valor obtenido se aplica en el modelo hidrológico como *crop coefficient* de la subcuenca.

El periodo seleccionado para la calibración es del 1 de enero de 2004 hasta el 31 de diciembre de 2013, en el que luego de ejecutar el módulo de optimización, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 15. Como se observa en la figura 11, durante la calibración el comportamiento general de la cuenca se asemeja al caudal registrado por la estación Hato Laguna, siendo el caudal modelado un poco mayor al observado durante los periodos secos y los picos de flujo en su mayoría menores a los registrados. Se debe destacar que se observan dos periodos en los que incrementa repentinamente el caudal sin haber lluvias, a inicios de 2007 y 2011, debido probablemente a reservorios o presas construidas sobre alguna(s) quebradas con

el propósito de liberar el agua durante prolongadas sequías como menciona CORPOBOYACÁ & UPJ (2005c).

Tabla 15. Resultados calibración de parámetros subcuenca Hato Laguna

Parámetro	Microcuenca		
	Martinera	Las Cintas	Bajo Hato Laguna
<b>Vegetación (<i>Canopy</i>)</b>			
Initial Storage (%)	0	0	0
Max Storage (mm)	0,612	0,221	2,237
Crop Coefficient	0,623	0,623	0,623
<b>Superficie (<i>Surface</i>)</b>			
Initial Storage (%)	10	10,5	11
Max Storage (mm)	13,187	5,113	26,211
<b>Pérdidas (<i>Loss</i>)</b>			
Initial soil content (%)	72,429	68,302	40,794
Initial GW1 Content (%)	10,998	2,805	1,880
Initial GW 2 Content (%)	19,450	14,129	2,418
Max Infiltration (mm/h)	18,550	20,707	4,149
Impervious (%)	0,22	0,25	0
Soil Storage (mm)	55,467	43,972	125,63
Tension Storage (mm)	26,319	32,493	62,81
Soil percolation (mm/h)	0,886	0,352	0,102
GW1 Storage (mm)	161,07	179,17	119,06
GW1 percolation (mm/h)	0,821	0,906	0,630
GW1 Storage coefficient (h)	962,75	541,85	416,55
GW2 Storage (mm)	321,09	376,08	384,91
GW2 percolation (mm/h)	0,696	0,666	0,579
GW2 Storage coefficient (h)	1028,9	1270,0	1730,2
<b>Transformación (<i>transform</i>)</b>			
Time of concentration (h)	25,820	24,153	24,087
Storage coefficient (h)	52,232	68,140	29,073
<b>Flujo Base (<i>Baseflow</i>)</b>			
GW1 initial discharge (m <sup>3</sup> /s)	0,02	0,015	0,001
GW2 initial discharge (m <sup>3</sup> /s)	0,04	0,04	0,009
GW1 Fraction	0,6	0,75	0,5
GW1 coefficient (h)	26,379	24,822	29,038
GW1 steps	1	1	1
GW2 Fraction	0,35	0,2	0,45
GW2 coefficient (h)	1321,0	2171,0	1687,2
GW2 steps	2	2	2

Fuente: elaboración propia.

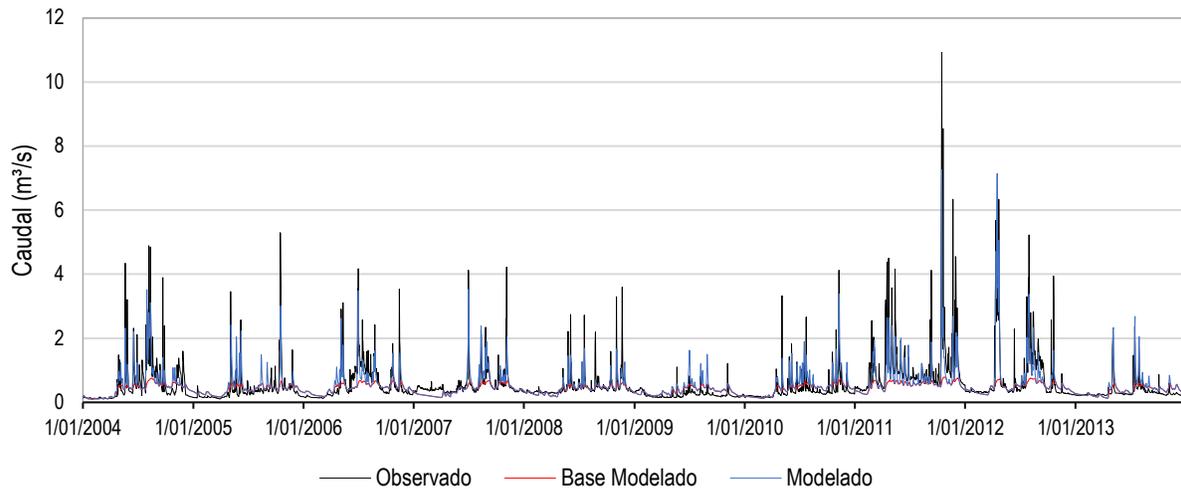


Figura 11. Caudal observado y simulado calibración subcuenca Hato Laguna. Fuente: elaboración propia.

El método de evaluación de eficiencia gráfica de la figura 12 demuestra una similitud entre los caudales simulados y observados descargados hasta mediados del año 2009, donde claramente el caudal observado fue mucho menor al simulado hasta finales de 2011, donde el comportamiento vuelve a ser similar entre ambos flujos hasta finalizar la calibración.

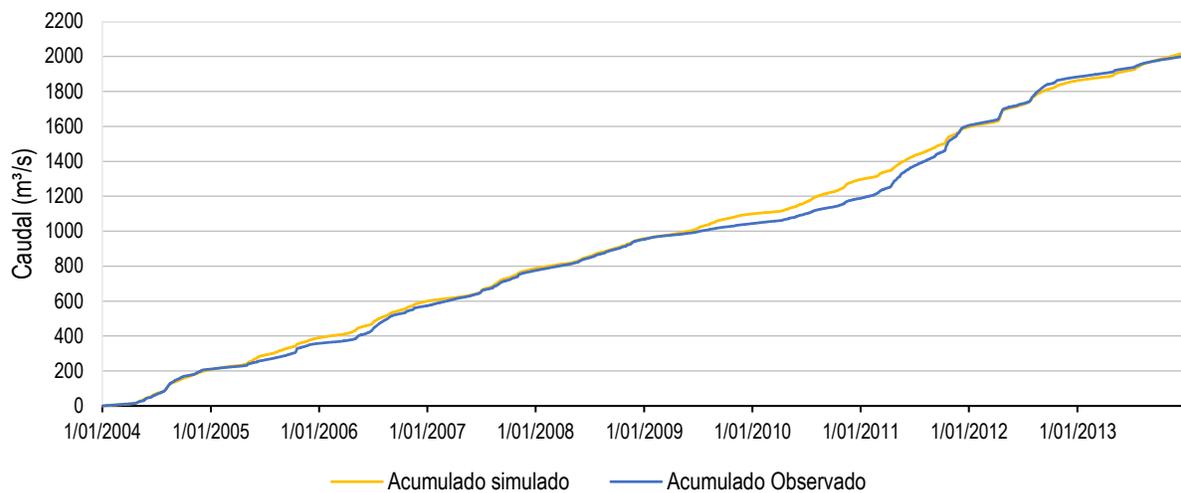


Figura 12. Caudales acumulados simulado y observado, calibración subcuenca Hato Laguna. Fuente: elaboración propia.

El periodo de validación del modelo fue desde el 1 de enero de 2014 hasta 31 de diciembre de 2018, en el que se introdujeron las series de datos de precipitación y caudal correspondientes, sin alterar ningún parámetro de los modelos de cuenca y meteorología. En la tabla 16 se puede observar la comparación de la eficiencia entre los periodos de calibración y validación de la subcuenca, donde el ENS de calibración es menor que el de validación, aunque con una diferencia pequeña. El método de *PercentBias* obtenido en la validación arroja una subestimación mayor, en contraposición a la sobreestimación de la calibración que es un poco menor.

Tabla 16. Eficiencia del modelo en subcuenca Hato Laguna.

Método	Calibración	Validación
<b>ENS</b>	0,651	0,606
<b>PercentBias</b>	0,93 %	-11,27

Fuente: elaboración propia.

Gráficamente se puede ver que el periodo de validación tiene una diferencia de caudales en la estimación de los picos, ya que la mayoría de veces son mayores los observados que los simulados. Sin embargo, los caudales base durante algunos periodos de sequía son más altos que los observados como se observa en la figura 12. En la figura 14 se puede ver la diferencia de caudales acumulados en donde existe una similitud del flujo modelado y observado hasta mediados de 2017, donde el caudal observado se incrementa hasta finalizar la simulación.

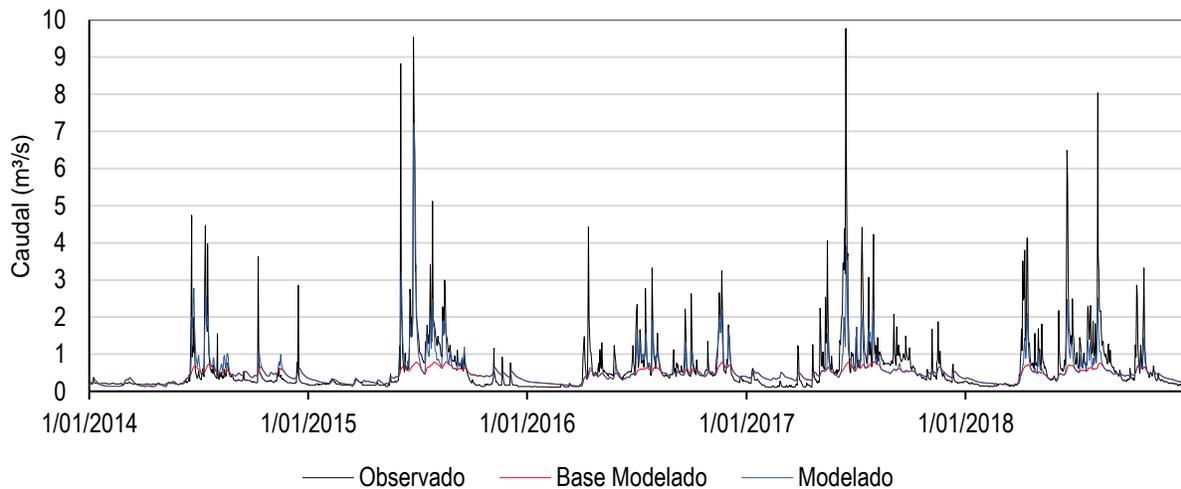


Figura 13. Caudal observado y simulado validación subcuenca Hato Laguna. Fuente: elaboración propia.

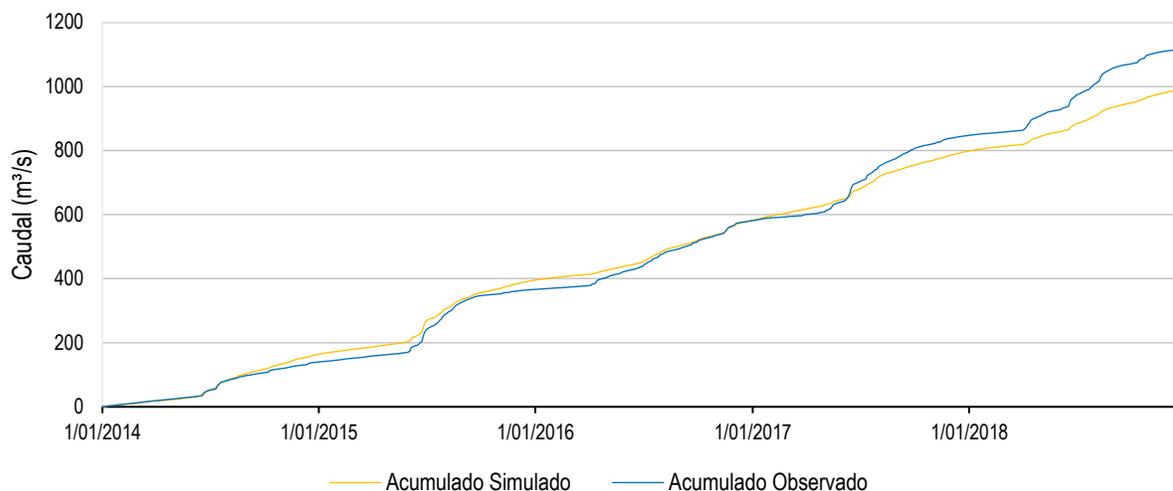


Figura 14. Caudales acumulados simulado y observado, validación subcuenca Hato Laguna. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 17 se pueden ver los volúmenes observados y simulados de la calibración y validación de la subcuenca, en la que el caudal base en ambos periodos representa más del 70% del flujo superficial, mientras que la escorrentía directa de precipitación corresponde alrededor del 26% del volumen. Existe una diferencia de cinco centésimas entre el coeficiente de escorrentía observado y simulado en la validación, mientras que los mismos coeficientes del periodo de calibración tienen una diferencia de apenas una centésima.

Tabla 17. Volumen de flujo total observado y simulado subcuenca Hato Laguna.

Parámetro	Calibración	Observado Calibración	Validación	Observado Validación
<b>Precipitación (mm)</b>	12784,40	12784,40	6375,40	6375,40
<b>Volumen descarga (mm)</b>	5770,56	5717,10	2830,61	3189,68
<b>Volumen de flujo Base (mm)</b>	4350,06	-	2236,39	-
<b>Flujo Base (%)</b>	75,38	-	79,00	-
<b>Vol. Escorrentía (mm)</b>	1420,50	-	594,21	-
<b>Escorrentía directa (%)</b>	24,62	-	21	-
<b>Coefficiente escorrentía</b>	0,451	0,447	0,444	0,500

Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.2.2.2. Subcuenca quebrada Los Pozos

Esta subcuenca se encuentra en la zona nororiental de la Cuenca del Lago de Tota, la cual tiene como corriente principal la quebrada Los Pozos de Aquitania. Tiene un área de 6,65 km<sup>2</sup> y una longitud de la corriente principal de 4,97 km. El Proyecto en el programa HEC-HMS se crea con las capas obtenidas por medio de ArcGIS, configurando los componentes de terreno y cuenca en primera medida. La serie de datos de precipitación fueron obtenidos de las estaciones Las cintas y Toquilla, ya que la subcuenca no cuenta con estación meteorológica, mientras que la serie de caudales corresponde a la estación Criadero. La identificación de corrientes con el programa revela que dada su extensión es mejor considerar la subcuenca como un solo sistema sin divisiones, como se observa en la figura 15.

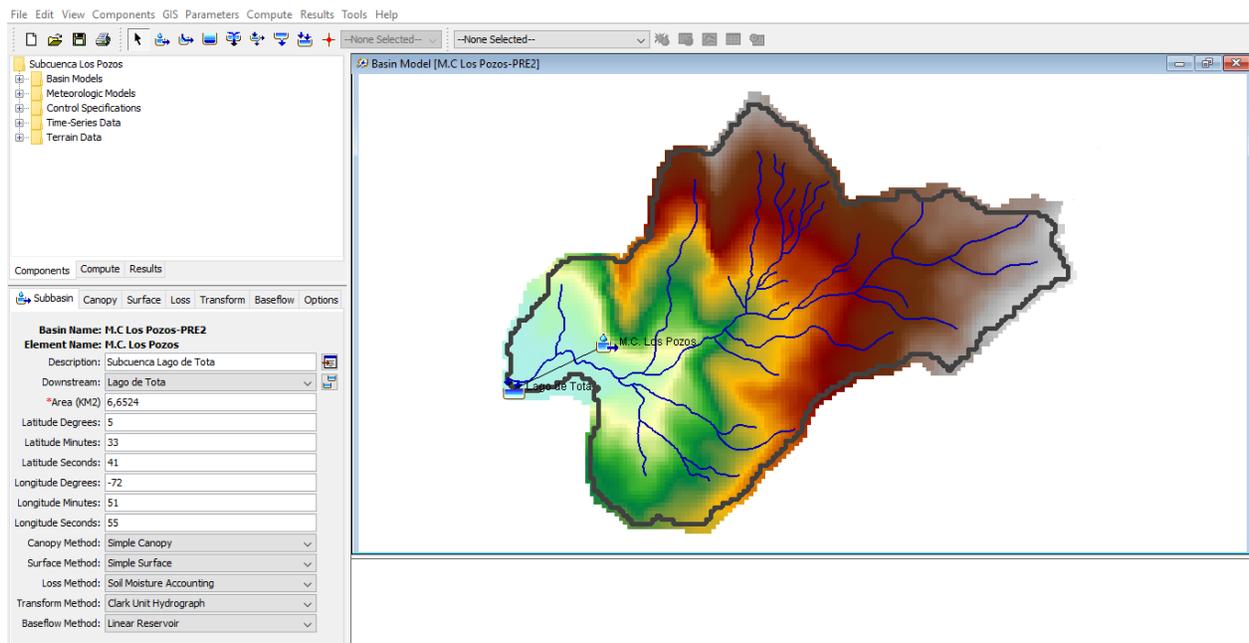


Figura 15. Subcuenca Los Pozos en HEC-HMS. Fuente: elaboración propia.

Los resultados del análisis de coberturas vegetales de la cuenca se muestran en la tabla 18, donde se observa que aproximadamente una tercera parte de la cuenca se encuentra asociada a actividades agropecuarias mientras que una gran parte del área de páramo se mantiene en buenas condiciones. Sin embargo, las coberturas demuestran muy poca presencia de frailejones densos sino más chuscal y pajonal de páramo. El coeficiente de cultivo calculado será el valor del parámetro *Crop Coefficient* en el modelo hidrológico de la subcuenca.

Tabla 18. Cobertura del suelo en subcuenca Los Pozos.

Código cobertura (CLC)	Leyenda	Área (Ha)	(%)	Coefficiente de cultivo (Kc)
2.1.5.1	Cultivo de papa	11,60	1,82	0,9
2.4.2	Mosaico pasto-cultivo	140,03	21,99	0,77
2.4.3	Mosaico pasto, cultivo – esp. natural	74,75	5,45	0,77
2.4.4	Mosaico pasto – esp. Natural	7,66	1,20	0,77
3.2.1.1.1	Herbazal denso	431,20	67,91	0,42*
<b>TOTAL</b>		<b>665,24</b>	<b>100</b>	<b>0,522</b>

Fuente: Adaptado IDEAM, 2010; FAO, 2006 y Buytaert W.*et al*, 2005\*

El periodo seleccionado para la calibración fue del 1 de enero de 2006 hasta el 31 de diciembre de 2013, ya que los datos completados de caudal del año 2005 no fueron lo suficientemente confiables para realizar la calibración. Los resultados de la optimización de los parámetros se muestran en la tabla 19.

Tabla 19. Parámetros optimizados calibración de subcuenca Los Pozos.

Parámetro	Microcuenca Los Pozos	Parámetro	Microcuenca Los Pozos
<b>Vegetación (Canopy)</b>		<b>Pérdidas (Loss)</b>	
Initial Storage (%)	0	GW1 Storage coefficient (h)	73,949
Max Storage (mm)	0,757	GW2 Storage (mm)	358,06
Crop Coefficient	0,522	GW2 percolation (mm/h)	0,205
<b>Superficie (Surface)</b>		GW2 Storage coefficient (h)	700,47
Initial Storage (%)	9,23	<b>Transformación (transform)</b>	
Max Storage (mm)	2,156	Time of concentration (h)	25,054
<b>Pérdidas (Loss)</b>		Storage coefficient (h)	26,842
Initial soil content (%)	71,36	<b>Flujo Base (Baseflow)</b>	
Initial GW1 Content (%)	2,92	GW1 initial discharge (m <sup>3</sup> /s)	0,03
Initial GW 2 Content (%)	7,58	GW2 initial discharge (m <sup>3</sup> /s)	0,07
Max Infiltration (mm/h)	24,001	GW1 Fraction	0,05
Impervious (%)	0,0	GW1 coefficient (h)	28,706
Soil Storage (mm)	34,320	GW1 steps	1
Tension Storage (mm)	31,239	GW2 Fraction	0,9
Soil percolation (mm/h)	0,346	GW2 coefficient (h)	1128,5
GW1 Storage (mm)	112,78	GW2 steps	2
GW1 percolation (mm/h)	1,320		

Fuente: elaboración propia con HEC-HMS.

Los flujos simulados y observados se pueden ver en la figura 16, donde se puede ver que en la mayoría de casos se subestiman los picos de caudal, mientras que hay periodos secos sobreestimados en algunos años y otros subestimados como principios de 2012 y 2013. Existen cambios drásticos de caudal en periodos muy cortos de tiempo, probablemente debido a extracciones irregulares de agua por parte de los pobladores de la subcuenca. En la figura 16 se observa que tanto caudal real como simulado son muy similares en tendencia y flujo hasta mediados de 2011, cuando el caudal real supera al observado, aunque la tendencia se mantiene en ambos caudales hasta el final del periodo de calibración.

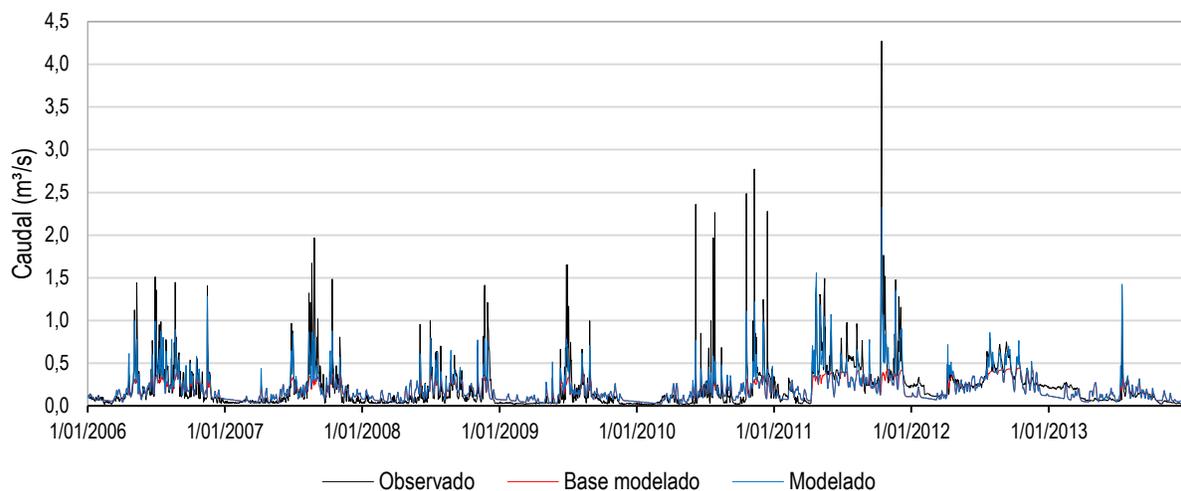


Figura 16. Caudal observado y simulado calibración subcuenca Los Pozos. Fuente: Elaboración propia.

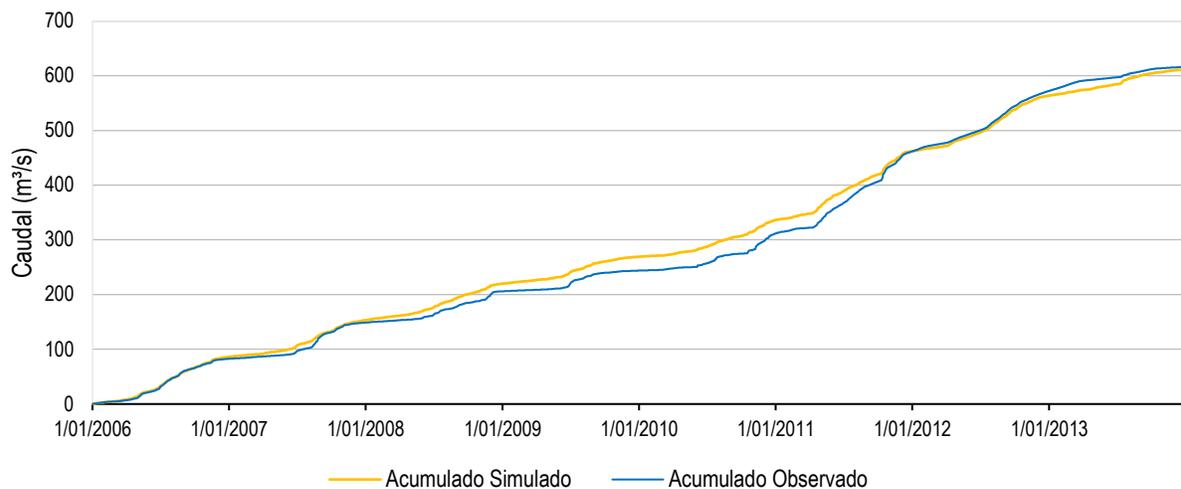


Figura 17. Caudal observado y simulado acumulado calibración subcuenca Los Pozos. Fuente: elaboración propia.

El periodo de validación se consideró desde el 1 de enero de 2014 hasta el 31 de diciembre de 2018, en el que se utilizaron las series de datos de precipitación y caudal proporcionados para dicho periodo, sin alterar ningún parámetro de los modelos de cuenca y meteorología. En la tabla 20 se puede observar la comparación de la eficiencia entre los periodos de calibración y validación de la subcuenca, donde el ENS de calibración es mejor que el de validación, y mediante el método *PercentBias* se obtuvo una sobreestimación de caudales simulados durante la validación, mientras la calibración subestima el flujo.

Tabla 20. Eficiencia del modelo en subcuenca Los Pozos.

Método	Calibración	Validación
<b>ENS</b>	0,639	0,632
<b>PercentBias</b>	-0,74%	6,43%

Fuente: elaboración propia

En la figura 18 se nota una tendencia del modelo en el periodo de validación a subestimar la mayoría de picos de caudal, aunque en menor proporción que durante el periodo de calibración. Por el contrario, los flujos base durante periodos secos tienden a ser sobreestimados en un inicio y posteriormente se estabiliza.

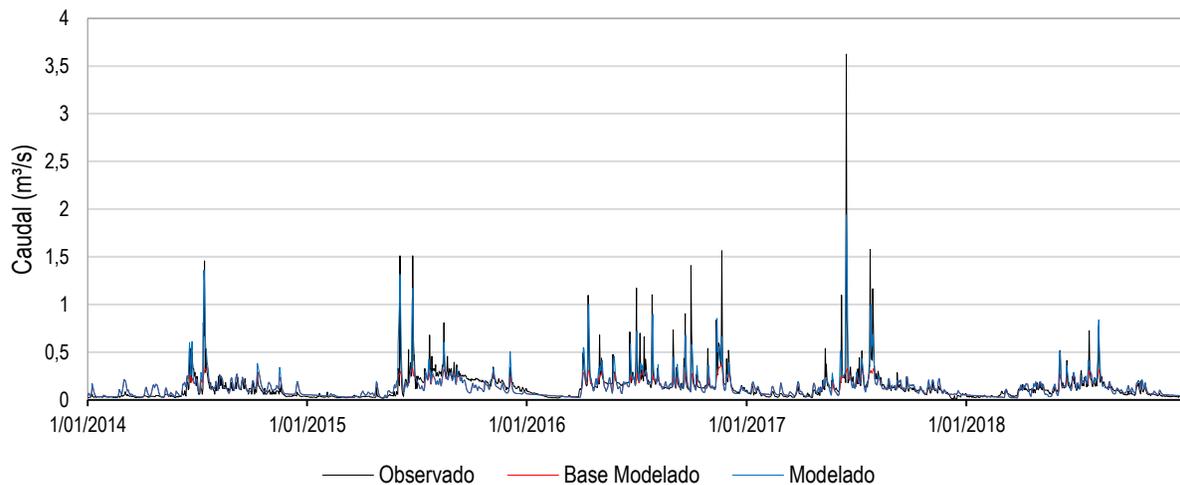


Figura 18. Caudal observado y simulado validación subcuenca Los Pozos. Fuente: elaboración propia.

La figura 19 demuestra que existe diferencia de caudales acumulados simulados y observados casi desde el inicio de la simulación. Sin embargo, la tendencia de ambas curvas es similar durante toda la validación luego de mediados del año 2014.

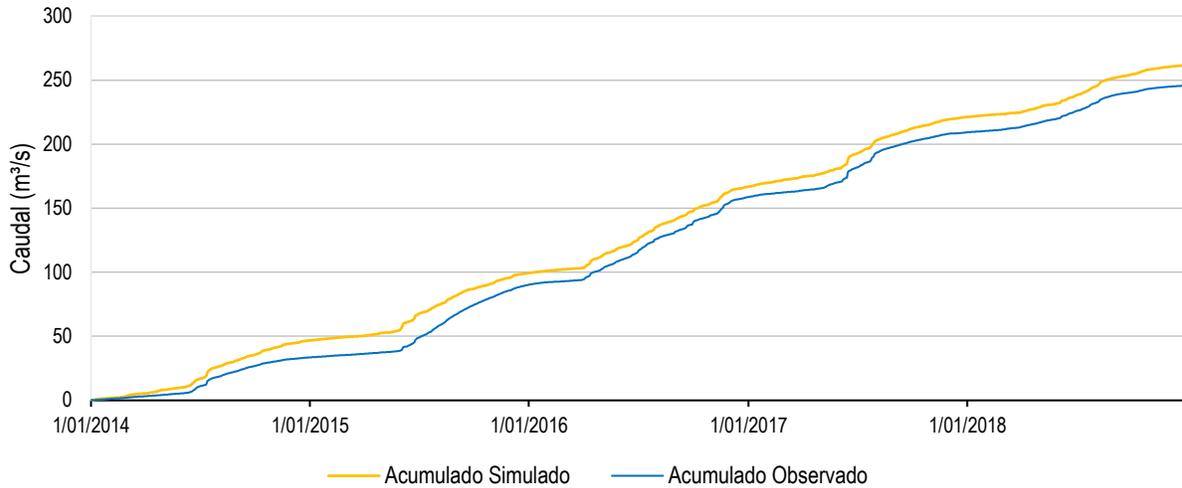


Figura 19. Caudal simulado y observado acumulado validación subcuenca Los Pozos. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 21 se ve que el caudal base en ambos periodos representa la mayor parte del flujo superficial de la subcuenca y, por el contrario, la escorrentía directa de precipitación es mucho menor. El rendimiento hídrico general de la subcuenca es alto, pero se observa que el coeficiente de escorrentía de la calibración fue mayor al de la validación, tanto del flujo observado como del simulado en el software.

Tabla 21. Volumen de flujo total observado y simulado subcuenca Los Pozos.

Parámetro	Calibración	Observado Calibración	Validación	Observado Validación
<b>Precipitación (mm)</b>	9435,7	9435,7	4216,3	4216,3
<b>Volumen descarga (mm)</b>	7941,09	8000,75	3398,82	3193,03
<b>Volumen de flujo Base (mm)</b>	6457,39	-	2872,76	-
<b>Flujo Base (%)</b>	81,31	-	84,52	-
<b>Vol. Escorrentía (mm)</b>	1483,70	-	526,06	-
<b>Escorrentía directa (%)</b>	18,69	-	15,48	-
<b>Coefficiente escorrentía</b>	0,841	0,847	0,806	0,757

Fuente: elaboración propia.

### 4.2.2.3. Subcuenca río Olarte

La subcuenca del río Olarte está ubicada en la zona sur de la cuenca del Lago de Tota, con un área de drenaje de 25,77 km<sup>2</sup> la que tiene como corriente principal el río Olarte con una longitud de 10,94km de corriente principal, entre los municipios de Tota y Aquitania. El proyecto de cuenca creado con HEC-HMS se puede observar en la figura 20, donde se han configurado los componentes de terreno y cuenca. La serie de datos de precipitación fueron obtenidos de las estaciones Guamo de Sisbaca y Potrerito, mientras que la serie de caudales corresponde a la estación Desaguadero. La identificación de corrientes con el programa revela que se deben considerar cuatro microcuencas en la subcuenca del Río Olarte, las cuales son: La Laja, Los Colorados, Alto Olarte y Bajo Olarte. La desembocadura de esta corriente se reparte una fracción en el lago de Tota, la que será la parte evaluada en esta ocasión, y otra que llega al caudal de desagüe del Lago y forma el río Upía.

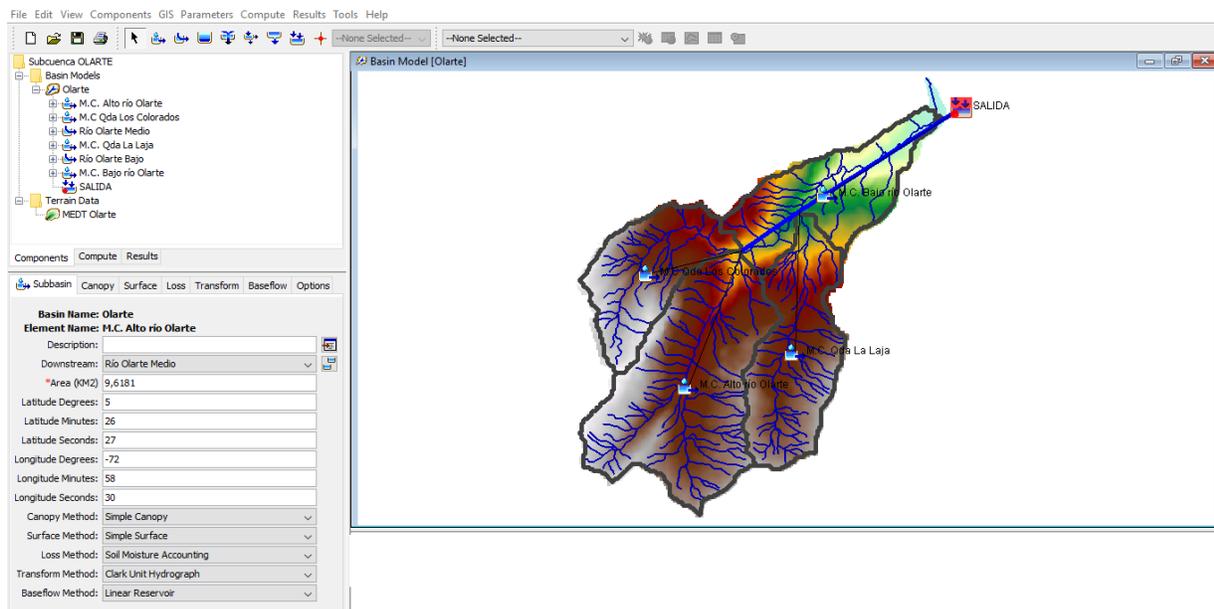


Figura 20. Subcuenca Olarte en HEC-HMS. Fuente: elaboración propia.

Los resultados del análisis de coberturas vegetales de la subcuenca Olarte demuestra que aproximadamente la mitad de esta ha sido modificada para realizar actividades agropecuarias y la otra mitad mantiene la cobertura de páramo asociada a herbazal denso con poca cobertura de arbustal denso, resaltando que se encuentra bastante fragmentado. Las áreas de las coberturas se muestran en la tabla 22, donde se calculó el coeficiente de cultivo de la cuenca que se utilizará en el modelo hidrológico.

Tabla 22. Cobertura del suelo en subcuenca Olarte.

Código cobertura (CLC)	Leyenda	Área (Ha)	(%)	Coefficiente de cultivo (Kc)
2.1.4.1	Cultivo de cebolla	5,11	0,2	1,09
2.3.1	Pastos Limpios	405,87	15,75	1
2.4.2	Mosaico pasto-cultivo	296,62	11,51	0,77
2.4.3	Mosaico pasto, cultivo – esp. natural	143,6	5,57	0,77
2.4.4	Mosaico pasto – esp. Natural	157,75	6,12	0,77
3.2.1.1.1	Herbazal denso	1342,13	52,07	0,42*
3.2.2.1	Arbustal denso	7,29	0,29	0,7*
<b>TOTAL</b>		<b>2577,26</b>	<b>100</b>	<b>0,578</b>

Fuente: Adaptado de IDEAM, 2010; FAO 2006. \*Adaptado de Buytaert W. *et al*, 2005.

El periodo de calibración es desde el 1 enero de 2004 hasta 31 de diciembre de 2011, cuyos resultados de optimización de los parámetros de las microcuencas se observa en la tabla 23. Los flujos simulados y observados se pueden ver en la figura 21, donde se observa que en la mayoría de casos se subestiman los picos, pero se obtienen aproximaciones de caudal modelado muy similares a los observados en periodos más secos.

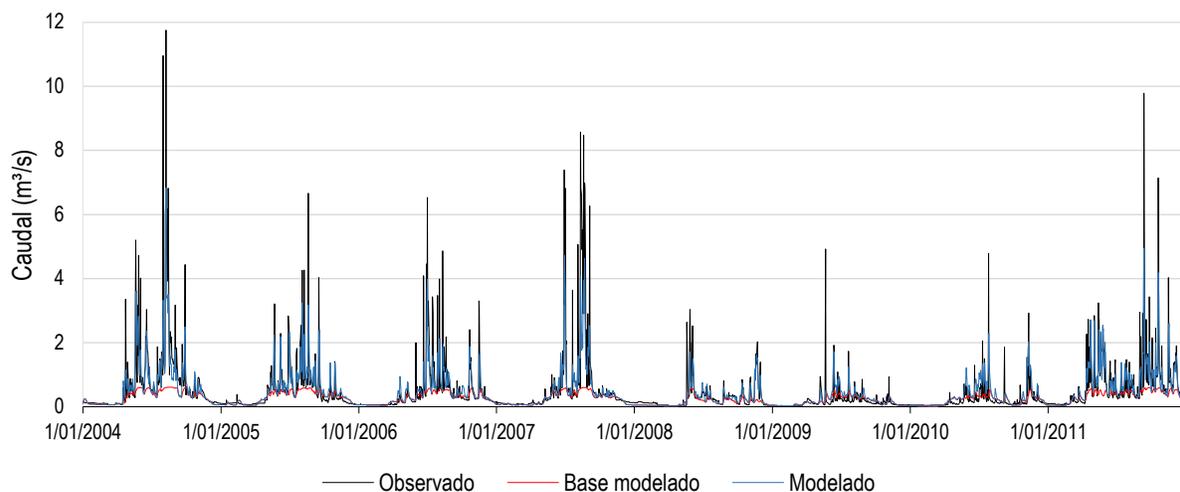


Figura 21. Caudal modelado y observado calibración subcuenca Olarte. Fuente: elaboración Propia.

Tabla 23. Parámetros optimizados calibración subcuenca Olarte.

Parámetro	Microcuenca			
	Alto río Olarte	Los Colorados	La Laja	Bajo río Olarte
<b>Vegetación (<i>Canopy</i>)</b>				
Initial Storage (%)	0	0	0	0
Max Storage (mm)	0,648	0,329	0,498	2,443
Crop Coefficient	0,578	0,578	0,578	0,578
<b>Superficie (<i>Surface</i>)</b>				
Initial Storage (%)	13,4	14,2	18	15
Max Storage (mm)	12,678	7,68	14,014	36,406
<b>Pérdidas (<i>Loss</i>)</b>				
Initial soil content (%)	76,943	76,902	72,807	35,441
Initial GW1 Content (%)	2	0,43	1,75	1,675
Initial GW 2 Content (%)	19,835	1,22	2,56	3,073
Max Infiltration (mm/h)	15,557	16,57	17,099	7,268
Impervious (%)	0	0	0	0
Soil Storage (mm)	90,959	83,737	42,604	126,97
Tension Storage (mm)	58,514	47,271	31,693	62,859
Soil percolation (mm/h)	0,10 0	0,102	0,310	0,018
GW1 Storage (mm)	107,9	104,58	157,52	131,24
GW1 percolation (mm/h)	0,619	0,939	0,324	0,528
GW1 Storage coefficient (h)	141,61	80,867	87,089	102,90
GW2 Storage (mm)	361,70	460,7	392,40	326,64
GW2 percolation (mm/h)	0,612	0,914	0,167	0,428
GW2 Storage coefficient (h)	2437,3	2429,2	2448,8	2224,6
<b>Transformación (<i>transform</i>)</b>				
Time of concentration (h)	24,365	25,566	24,310	32,683
Storage coefficient (h)	36,839	43,144	40,413	44,256
<b>Flujo Base (<i>Baseflow</i>)</b>				
GW1 initial discharge (m <sup>3</sup> /s)	0,006	0,009	0,006	0,001
GW2 initial discharge (m <sup>3</sup> /s)	0,034	0,021	0,014	0,009
GW1 Fraction	0,3	0,5	0,5	0,5
GW1 coefficient (h)	25,246	30,853	25,864	30,029
GW1 steps	1	1	1	1
GW2 Fraction	0,65	0,45	0,45	0,45
GW2 coefficient (h)	1644,5	1618,8	862,15	521,12
GW2 steps	2	2	3	3

Fuente: elaboración Propia.

La figura 22 compara los caudales acumulados simulados y observados los cuales son similares hasta mediados de 2007, donde el caudal observado es mucho mayor, luego se emparejan en el año 2011 y termina con el caudal simulado un poco menor al observado en el 2011. La tendencia del flujo es bastante similar durante la simulación, a excepción del periodo de mediados de 2007.

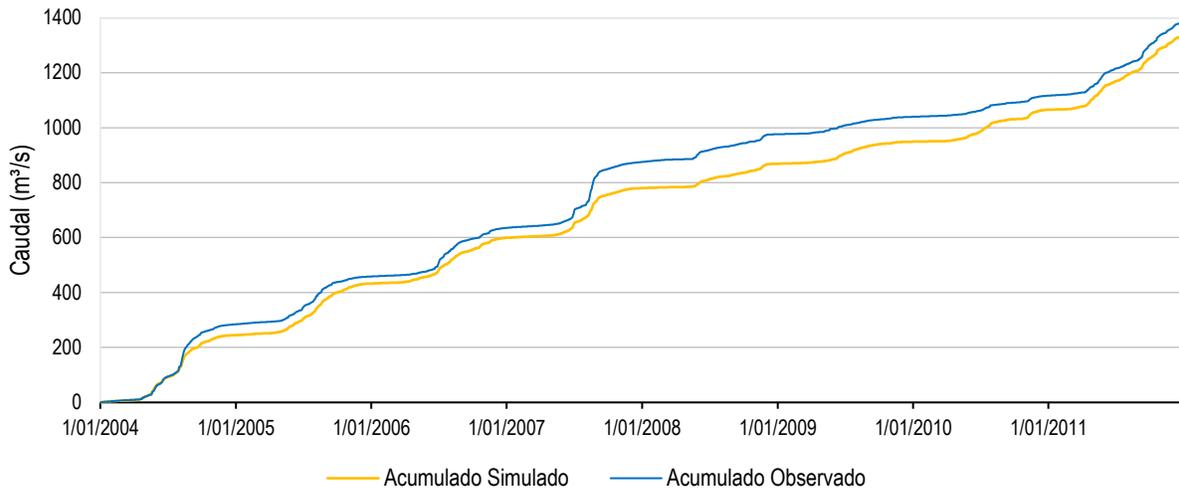


Figura 22. Caudal acumulado simulado y observado calibración subcuenca Olarte. Fuente: elaboración propia.

El periodo de validación escogido fue del 1 de enero de 2016 hasta el 10 de julio de 2019, ya que los registros de caudales anteriores tienen periodos muy extensos sin datos, lo que dificulta la modelación. Se usó el mismo modelo de cuenca de la calibración obteniendo los resultados de la tabla 24, donde se puede observar que el ENS en ambos periodos de tiempo son muy similares, siendo la calibración un poco más eficiente. El método *PercentBias* obtenido muestra una sobreestimación de caudales simulados en la validación, y una subestimación en la calibración.

Tabla 24. Eficiencia del modelo Subcuenca Olarte.

Método	Calibración	Validación
<b>ENS</b>	0,670	0,660
<b>PercentBias</b>	-3,71%	0,44%

Fuente: elaboración propia.

En la figura 23 se puede ver que el flujo de los periodos secos tiende a ser similar, aunque se subestiman los picos de caudal en algunos casos, se observa más similitud en la magnitud de estos durante la validación que en la calibración. Se puede ver en la figura 24 como el

comportamiento de los caudales acumulados es bastante similar durante toda la simulación, a excepción de un breve periodo a mediados de 2017.

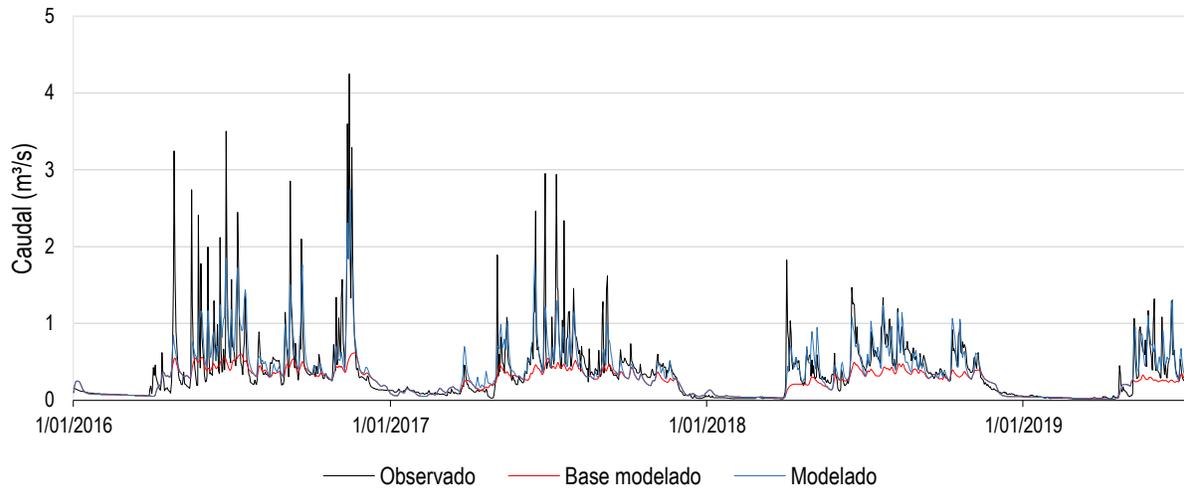


Figura 23. Caudal observado y modelado validación subcuena Olarte. Fuente: elaboración propia.

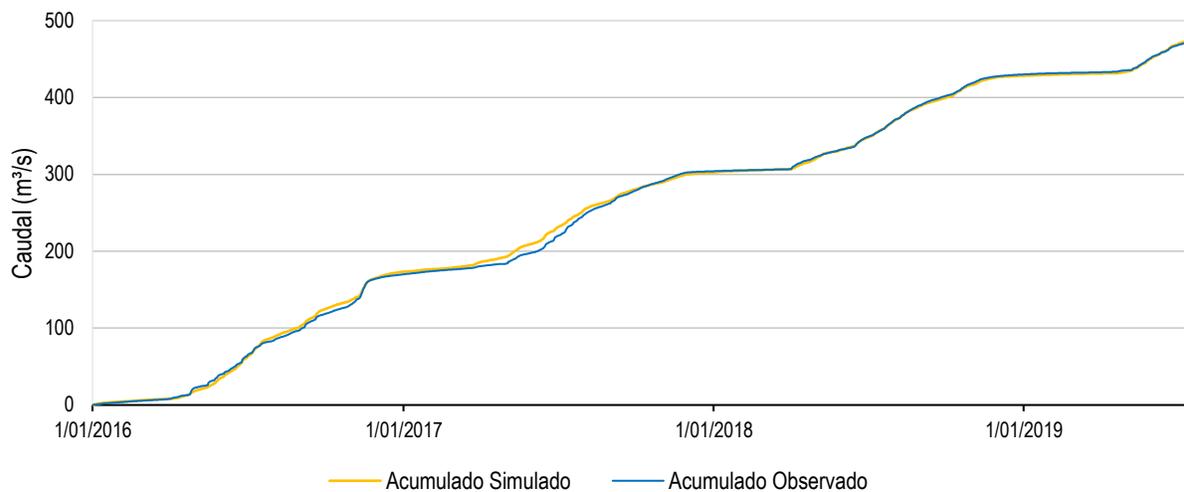


Figura 24. Caudal acumulado simulado y observado validación subcuena Olarte. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 25 se ve que el caudal base durante la calibración corresponde a un poco más de la mitad del flujo, mientras que la situación es muy distinta en el periodo de validación, puesto que el volumen base aumenta a más del 60%. El coeficiente de escurrentía tiene valores observados y simulados semejantes en ambos periodos de tiempo y, sin embargo, el periodo de calibración tuvo un rendimiento hídrico más alto que el de validación.

Tabla 25. Volumen de flujo total observado y simulado Subcuenca Olarte.

Parámetro	Calibración	Observado Calibración	Validación	Observado Validación
Precipitación (mm)	7099,80	7099,80	2692,79	2692,79
Volumen descarga (mm)	4759,52	4942,23	1689,15	1682,23
Volumen de flujo Base (mm)	2601,68	-	1115,18	-
Flujo Base (%)	54,66	-	66,02	-
Vol. Escorrentía (mm)	2157,84	-	573,97	-
Escorrentía directa (%)	45,34	-	33,98	-
Coefficiente escorrentía	0,670	0,696	0,627	0,624

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.3. Análisis de resultados modelación hidrológica

La cobertura vegetal observada en las subcuencas muestra una clara tendencia a la transformación de los usos del suelo y, por lo tanto, un efecto negativo en la modelación hidrológica. La heterogeneidad de coberturas se ve reflejada en el  $K_c$  obtenido en las subcuencas, pues entre mayor área de cobertura vegetal agropecuaria, más elevado será este coeficiente, lo que se traduce en aumentos de pérdida de agua por evapotranspiración, afectando el rendimiento hídrico de las subcuencas (Daza, Hernández & Triana, 2013), (Balthazar, *et al*, 2015). Como se observa en la tabla 26, los conflictos de uso del suelo demuestran que la diferencia en hectáreas entre el uso potencial y actual de páramo está en un rango de 45,4 – 42,04% en las subcuencas Hato Laguna y Olarte. Esto quiere decir que alrededor de la mitad del ecosistema de páramo en estas zonas ha sido degradado y perdido parte de sus características hidrológicas, afectando negativamente la oferta hídrica. Sin embargo, en el caso de la subcuenca de Los Pozos la diferencia entre uso potencial y actual del suelo es de 27,9% indicando menor pérdida del ecosistema y más disponibilidad del recurso hídrico.

La evapotranspiración potencial ( $ET_0$ ) es un componente esencial en los procesos de precipitación-escorrentía, que junto con el tipo de cobertura vegetal implican una importante pérdida de agua en el ciclo hidrológico. Este parámetro en zonas de alta montaña de la cordillera oriental, se mide en rangos desde 770 a 1000 mm anuales, como se muestra en el cuadro 12, donde se hace una comparación de los promedios anuales de las estaciones de la cuenca del lago de Tota con otras en altitudes similares.

Tabla 26. Conflictos en uso del suelo de subcuencas Hato Laguna, Olarte y Los Pozos.

Subcuenca	Área (Ha)	Área agropecuaria (Ha)	Área páramo (Ha)	Área declarada páramo (Ha)	Diferencia áreas Páramo (Ha)
Hato Laguna	3025,00	1438,22	1586,78	2906,83	1320,05
Los Pozos	665,24	234,04	431,2	598,00	166,8
Olarte	2577,26	1227,87	1349,39	2328,30	978,91
<b>TOTAL</b>	<b>6267,5</b>	<b>2900,13</b>	<b>3367,37</b>	<b>5833,13</b>	<b>2465,76</b>

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 12. Evapotranspiración potencial en estaciones de alta montaña.

Nombre estación [código]	Departamento	Municipio	Elevación (msnm)	ETP anual (mm)
Potrerito [35090010]	Boyacá	Aquitania	3047	858,5
Las Cintas [35190010]	Boyacá	Sogamoso	3400	802,2
El Túnel [3509503]	Boyacá	Cúitiva	3020	978,0
El Mortiño [24030660]	Boyacá	El Cocuy	3409	775,1
Teatinos [35070310]	Boyacá	Samacá	3250	826,2
El Verjón [21200240]	Bogotá	Bogotá D.C.	3250	813,6
San Isidro [35030230]	Cundinamarca	Fómeque	3500	786,0
Pantano redondo 1 [21201060]	Cundinamarca	Zipaquirá	3160	835,0
El Picacho [23190130]	Santander	Tona	3310	799,0

Fuente: adaptado de IDEAM (2011).

En Colombia existe una relación entre la altitud y  $ET_0$ , la cual disminuye unos 235 mm/año por kilómetro de aumento en altitud (Jaramillo Robledo, 2006). Pero como se mostró en el cuadro anterior, las estaciones del Lago de Tota tienen cifras superiores a estaciones ubicadas en altitudes similares. Este parámetro meteorológico se determina por el método de Penman Montheith que utiliza variables como presión de saturación de vapor, presión atmosférica,

radiación solar, velocidad del viento, temperatura y humedad del aire, simplificando las variables como se describe en el documento técnico del IDEAM sobre evapotranspiración de referencia de Colombia (Gómez Blanco & Cadena, 2017). Es posible que la evapotranspiración en la cuenca del Lago de Tota sea mayor debido a alguna de las variables descritas, no obstante, en zonas de páramo protegidas sin transformación antrópica como en El Cocuy y Chingaza (Fómeque), la evapotranspiración potencial es menor e incluso, la evapotranspiración real puede ser menor, donde  $ET_r$  oscila entre 224,0 a 328,4 mm/año (Valencia & Tobón, 2017).

Se observa que el modelo considera como nulo el almacenamiento inicial de agua en la vegetación, puesto que la simulación se inicia en un periodo seco en el que no existe precipitación sobre la superficie de las plantas, sin que signifique que no haya evapotranspiración, ya que estos son parámetros distintos en el modelo. El almacenamiento máximo de precipitación obtenido por el modelo en algunas subcuencas coincide con el de Valencia-Leguizamón y Tobón (2017) en el que coberturas de frailejón, chuscal y pajónal bajo condiciones de dosel seco, interceptan en promedio 0,06 – 0,42 mm y un máximo de 5,6 mm de lluvia, dependiendo de la intensidad de precipitación. Sin embargo, dicho rango promedio no coincide con el obtenido en las microcuencas Martinera, Los Pozos y Alto río Olarte, que se encuentran un poco por encima; a la vez que las microcuencas bajo río Olarte y bajo río Hato Laguna tienen valores muy elevados, ya que son subcuencas con mayor cantidad de cobertura vegetal agropecuaria y vegetación secundaria, donde la interceptación se encuentra en rangos de 2,17 - 2,3 mm (Ramos & Armenteros, 2019). Los parámetros de superficie indican que las microcuencas bajo río Olarte y bajo río Hato Laguna retienen más agua en su superficie, y ya que este parámetro se relaciona directamente con el terreno, probablemente se debe a que las parcelas tienen surcos donde se retiene el agua lluvia. Las microcuencas con un valor intermedio de almacenamiento de agua en superficie son Martinera, alto río Olarte y Las Lajas, que según el análisis de HEC-HMS tienen más sumideros (*sinks*), mientras que Los Pozos y los Colorados presentaron menos áreas con depresiones. Estas depresiones generalmente son pequeñas lagunas, humedales y turberas, las que son bastante comunes en la alta montaña y contribuyen en muy buena medida a la regulación hídrica del páramo (Buytaert, *et al*, 2010), (Llambí *et al*, 2012). Los cambios de cobertura del suelo en la cuenca del lago de Tota no han sido significativos durante el periodo 1995-2012 (Mateus, 2014), por lo que los coeficientes y parámetros de vegetación y superficie modelados, no se deberían cambiar del periodo de calibración al de validación.

El modelo resultante de las subcuencas muestra un significativo nivel de humedad inicial en la mayoría de microcuencas, con niveles por encima del 65% a excepción de las microcuencas con mayor cobertura agropecuaria, las cuales apenas llegan al 40%. Los suelos de páramo

generalmente son de tipo andosol, rico en materia orgánica y estructura porosa, lo que permite que el contenido de agua en suelo saturado sobrepase el 80% de volumen, comparado con los valores de 30 a 40% de suelos agrícolas (Llambí *et al*, 2012). Estudios llevados a cabo en un páramo de Ecuador, muestran que la variabilidad anual de la humedad del suelo supera la capacidad de campo y es cercana al punto de saturación la mayor parte del tiempo, e incluso en las temporadas más secas la humedad se mantiene por encima del 50% (Torres Romero & Proaño Santos, 2018). En el páramo de Sumapaz se comprobó que la humedad del suelo con cobertura nativa tiene una humedad entre 20 y 37% más alta que suelos utilizados en ganadería y agricultura (Daza, Hernández & Triana, 2014). Trabajos acerca de humedad de suelos del páramo de Siscunsi, cerca de la cuenca del Lago de Tota demuestran que en suelos con cobertura conservada de páramo, la humedad puede superar el nivel de saturación, en rangos de 72 – 120%, mientras que donde existen plantaciones de pino combinadas con frailejón, la humedad promedio está en rangos de 36 – 64% (Moyano Pérez, 2018). Al comenzar la simulación en temporada seca, algo de la humedad del suelo se ha evapotranspirado, pero los porcentajes de humedad en el modelo siguen sin alejarse demasiado de los valores mencionados anteriormente. Por el contrario, la capacidad de almacenamiento del suelo durante la modelación arrojó cifras muy dispares, ya que las microcuencas bajo río Hato Laguna y bajo río Olarte tienen la mayor capacidad de almacenamiento, asociado a la actividad agrícola desarrollada en estas. En la reserva del borde norte de Bogotá las zonas que son labradas frecuentemente pierden capacidad de almacenamiento, con valores entre 21,9 y 123,83 mm, mientras suelos conservados y estables presentan capacidades máximas de almacenamiento por encima de los 300 mm (Agualimpia & Castro, 2013). En el caso de los páramos ecuatorianos, la capa de suelo tiene potencial de almacenamiento de 108 a 156,5 mm aproximadamente (Torres Romero & Proaño Santos, 2018), por lo que los datos obtenidos en las microcuencas Los Pozos y Las Cintas se asemejarían a los suelos intervenidos, y en cambio las microcuencas alto río Olarte, los Colorados y Martinera se acercan un poco más a los rangos de suelos de páramo, resultados algo contradictorios. Recientemente, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) ha divulgado la contratación de un estudio de suelos en la cuenca del lago de Tota, sin embargo, no se han publicado los resultados, lo cual sería un insumo vital para la modelación hidrológica. (IGAC, 2019). La infiltración es un parámetro muy importante en el modelo hidrológico y según Daza, Hernández & Triana (2014), en suelos de uso agropecuario del páramo de Sumapaz la infiltración oscila entre 4,1 y 17,2 mm/h; mientras que en cobertura nativa supera los 25 mm/h; rango similar al registrado en el páramo de Papallacta, Ecuador; donde coberturas de plantas nativas obtuvieron tasas de 33,4 hasta 34,2 mm/h de infiltración, comparado con coberturas de pino y

tierras agrícolas cuyos valores fueron entre 3,96 y 7,92 mm/h (Arcos, 2010). Los datos de infiltración de las microcuencas analizadas son comparables a los mencionados, ya que las microcuencas con mejor cobertura vegetal son las que mostraron los valores más altos.

En cuanto a los parámetros de subsuelo que controlan el flujo base de las subcuencas, en el modelo de HEC-HMS se considera que el agua subterránea 1 (GW1) es la capa del subsuelo que sigue al primer horizonte de suelo, mientras que el agua subterránea 2 (GW2) se considera como la capa geológica del suelo de la subcuenca (HEC, 2018). Estudios de Torres y Proaño (2018) encontraron que en el horizonte de suelo entre los 70 y 110 cm de profundidad la capacidad de almacenamiento es más estable, pues la humedad se encontraba entre la capacidad de campo y el punto de saturación con variaciones leves, y un almacenamiento entre 326 y 365 mm. En el estudio de delimitación del complejo de páramos Tota – Bijagual – Mamapacha, se identificaron las zonas hidrogeológicas y potenciales recargas de agua subterránea, en la que las zonas norte y oriental de la cuenca son de muy alta y alta potencialidad de almacenamiento, mientras el sur es de alta y media potencialidad. Esto se debe a que en la cuenca existen depósitos aluviales y predominancia de arenitas de alta porosidad, que permiten retener altas cantidades de agua (CORPOBOYACÁ & Humboldt, 2015). Se puede observar que las variables de agua subterránea en el modelo son similares en las microcuencas, aunque con algunas variaciones donde la percolación es mayor en la subcuenca Hato Laguna y en menor medida en Los Pozos.

Las variables de tiempo de concentración y coeficiente de almacenamiento se relacionan con el exceso de precipitación que se convierte en escorrentía y, puesto que los datos ingresados son diarios, el programa no permite un valor inferior al de 24 horas. Las descargas iniciales del flujo base son en cierta medida controladas por el área de las microcuencas, ajustadas a los análisis de las coberturas del terreno.

Durante el periodo de calibración y validación de las subcuencas hubo años normales, secos y lluviosos; y como sugiere IDEAM (2014a), el umbral de normalidad de precipitaciones anuales debe considerarse entre 80% - 120% con respecto a la media de los últimos 30 años por lo menos. En la figura 25 se observan las anomalías anuales registradas en las 4 estaciones usadas para la modelación hidrológica, donde se observa que la estación Las Cintas presentó 3 años que superan la normalidad y solamente 1 año de déficit de lluvias; Potrerito presenta 2 años de exceso y 1 de déficit, al igual que Toquilla y Guamo tuvo 3 años de déficit y ninguno de excesos. Los años de excesos coinciden con el fenómeno de la Niña 2010 - 2011, pero solamente el año 2009 coincide con un fenómeno de El Niño, ya que el del 2014 - 2015 solamente afectó levemente la estación Potrerito. Estas condiciones permiten simular gran rango de escenarios para las

subcuencas, demostrando que los modelos otorgan confiabilidad suficiente para simular el comportamiento de los futuros escenarios de cambio climático.

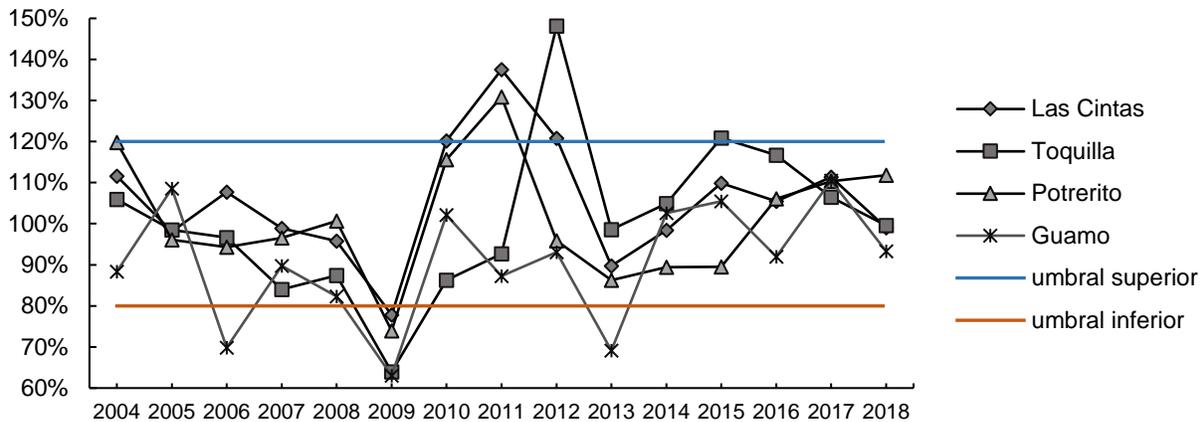


Figura 25. Anomalías anuales de precipitación periodo de calibración y validación. Fuente: elaboración propia.

El rendimiento hídrico observado de las subcuencas se puede comparar mediante el coeficiente de escorrentía el cual es bastante variable de una subcuenca a otra. Los coeficientes de escorrentía de las subcuencas de Lago de Tota muestran un comportamiento muy relacionado con las coberturas vegetales, puesto que las microcuencas con más cobertura de páramo tuvieron mejor rendimiento hídrico, dado que la subcuenca del río Hato Laguna presentó el rendimiento más bajo, mejoró en la subcuenca del río Olarte y el más alto se presentó en la Quebrada Los Pozos. Normalmente, una cuenca de páramo no intervenida presenta un alto rendimiento hídrico (>60%), comparado con cuencas en altitudes menores con rendimientos más bajos, debido principalmente a la baja evapotranspiración del clima frío y húmedo; la retención de agua del suelo y las características de la vegetación (Llambí *et al*, 2012). Pero debido a la alteración humana del ecosistema, los procesos hidrológicos se trastornan provocando crecidas más fuertes y reducciones de caudal base en temporadas secas como las observadas en el Río Olarte y rendimiento hídrico menor como se observó en el río Hato Laguna. Sin embargo, la percolación del agua subterránea influye también en el balance hídrico de una cuenca, que puede ser insignificante (menos del 5%) hasta representar más del 60% de las pérdidas (Crespo P, *et al*, 2014), (Torres Romero & Proaño Santos, 2018). La tabla 27 muestra distintos rendimientos hídricos en cuencas de páramo comparadas con las de este estudio, donde hay un amplio rango de resultados, que están determinados por diferentes condiciones. La subcuenca Hato Laguna presenta valores similares a cuencas con intervenciones antrópicas en Ecuador y Sumapaz, donde las pérdidas por evapotranspiración se relacionan directamente con zonas de actividad

agropecuaria que extraen agua y esta se evapora o infiltra. En cambio, las subcuencas Olarte y Los Pozos tienen rendimientos hídricos similares a los de Chingaza o Rabanal (Gacheneca), las que presentan características similares de suelos y coberturas vegetales.

Tabla 27. Coeficientes de escorrentía en cuencas de páramo.

Cuenca	Ubicación	Altitud (msnm)	Coefficiente de Escorrentía	Mayor fuente de pérdidas	Autor (es)
R. Hato Laguna	Boyacá, Colombia	3015 - 3990	0,47	Percolación	Este estudio
Q. Los Pozos			0,80	profunda	
R. Olarte			0,65		
R Carchi	Galeras, Ecuador	2932 - 4188	0,51	Evapo- transpiración	Guerra Amán (2019)
R. Quinuas	Cuenca, Ecuador	3612 - 4400	0,46	Percolación profunda	Cabrera, Timbe & Crespo (2019)
Alto R. Jatunhuaycu	Antisana, Ecuador	4036 - 4520	0,16	Percolación profunda	Torres & Proaño (2018)
Q. Cárdenas	Quindío, Colombia	3800 - 4730	0,51	Evapo- transpiración	Gutiérrez Uribe, (2016)
Alto R. Tunjuelo	Sumapáz, Colombia	2960 - 3450	0,49	Evapo- transpiración	Lizarazo Rincón (2018)
Q. La Chucua	Chingaza, Colombia	2464 - 3541	0,73	Percolación profunda	Gil Morales (2012)
R. Gacheneca	Boyacá, Colombia	2700 - 3350	0,57	Evapo- transpiración	Beltrán García (2018)

Fuente: elaboración propia.

La incertidumbre que tiene el modelo en cuanto al volumen simulado de flujo total es aproximadamente de  $\pm 4,3\%$  en la subcuenca del río Hato Laguna,  $\pm 2,9\%$  en la quebrada Los Pozos y  $\pm 2,8\%$  en la subcuenca Olarte. El caudal base calculado muestra que la mayoría del flujo es subsuperficial, situación bastante común en microcuencas de páramo donde predominan fenómenos de rápida infiltración del agua a las capas profundas que son liberadas lentamente en temporadas secas (Crespo P. *et al*, 2014). El caso de la subcuenca Olarte sugiere una rápida colmatación del suelo en temporadas lluviosas, por lo que genera mayor volumen de escorrentía directa en proporción a Los Pozos y Hato Laguna, pues estas dos muestran rangos similares a otros estudios (Gil Morales, 2016), (Cabrera, Timbe & Crespo, 2019), (Crespo P. *et al*, 2014).

### 4.3. Escenarios de cambio climático

Los resultados de los escenarios de cambio climático se realizan para las variables temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial. Los cambios de cobertura vegetal no se han tenido en cuenta, ya que no han sido significativos durante las últimas dos décadas, y si el área de cultivo de cebolla ha incrementado ligeramente, se ha concentrado en las zonas aledañas al Lago, mientras que las coberturas de páramo han aumentado 0,5% en 20 años (Mateus, 2014). Ya que el cambio del uso del suelo no fue un factor representativo en la modelación y al estar fuera de los alcances de este trabajo de investigación, no se considera en los análisis de escenarios de cambio climático.

#### 4.3.1. Escenarios de cambio en la Temperatura

Para la generación de series de temperatura se utilizó ARMA (1, 1) en el programa *gretl*, obteniendo un  $\Phi$  de -0,3427 y  $\theta$  de 0,4852. Adicionalmente se aplicó la probabilidad de años cálidos y fríos a la serie proyectada, siendo 5 años probables con temperaturas más altas y 4 con temperaturas por debajo de la media. Los resultados de la predicción del modelo corresponden a ES1, encontrando que la tendencia de la serie histórica de temperatura aumenta 0,21 °C por década. Por lo tanto, ES1 de temperatura en el periodo 2020 – 2050 corresponde a un incremento de 0,63°C con respecto a la temperatura media de 11,71°C del período de referencia 1989-2018. En el caso de ES2, según el ensamble multiescenario de cambio climático para precipitación y temperatura del IDEAM, en la región del lago de Tota para el periodo 2040-2070 el aumento será entre 1,21 – 1,6°C, respecto al periodo 1976-2005. Para este trabajo se utilizó un aumento de 1,39 °C, siendo la temperatura media de la cuenca del lago en dicho periodo de referencia igual a 11,51°C. Es así que ES2 de temperatura es un aumento de 1,19 °C respecto al periodo de referencia 1989-2018.

Para ES3, el modelo RCP8.5 de los escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura del IDEAM revela que en la región del lago de Tota para el periodo 2040-2070, el aumento será entre 2 – 3,5°C, respecto al periodo 1976-2005. En este estudio se tomó un aumento de 2,16 °C, con respecto a la media de 11,51°C, por lo que ES3 de temperatura es un aumento de 1,96 °C respecto al periodo 1989-2018. En la figura 26 se muestran los resultados de los escenarios de temperatura para la cuenca del lago de Tota en azul, el rango de confianza de la proyección (95%) y la temperatura media anual en rojo.

Se puede observar un incremento más leve en ES1, un incremento moderado en ES2 y un incremento acelerado en ES3, que tienen una temperatura media de 12,53 °C, 13,01 °C y 13,54°C

respectivamente al finalizar las predicciones. Según Arango, Dorado, Guzmán y Ruíz (2012) las anomalías de temperaturas durante las últimas 4 décadas han incrementado en el altiplano cundiboyacense entre 0,5 – 1,5 °C, aseverando un constante aumento de temperatura en todas las regiones del país en el futuro, especialmente en la cordillera oriental (entre 1,5 – 2,5 °C durante 2041-2050).

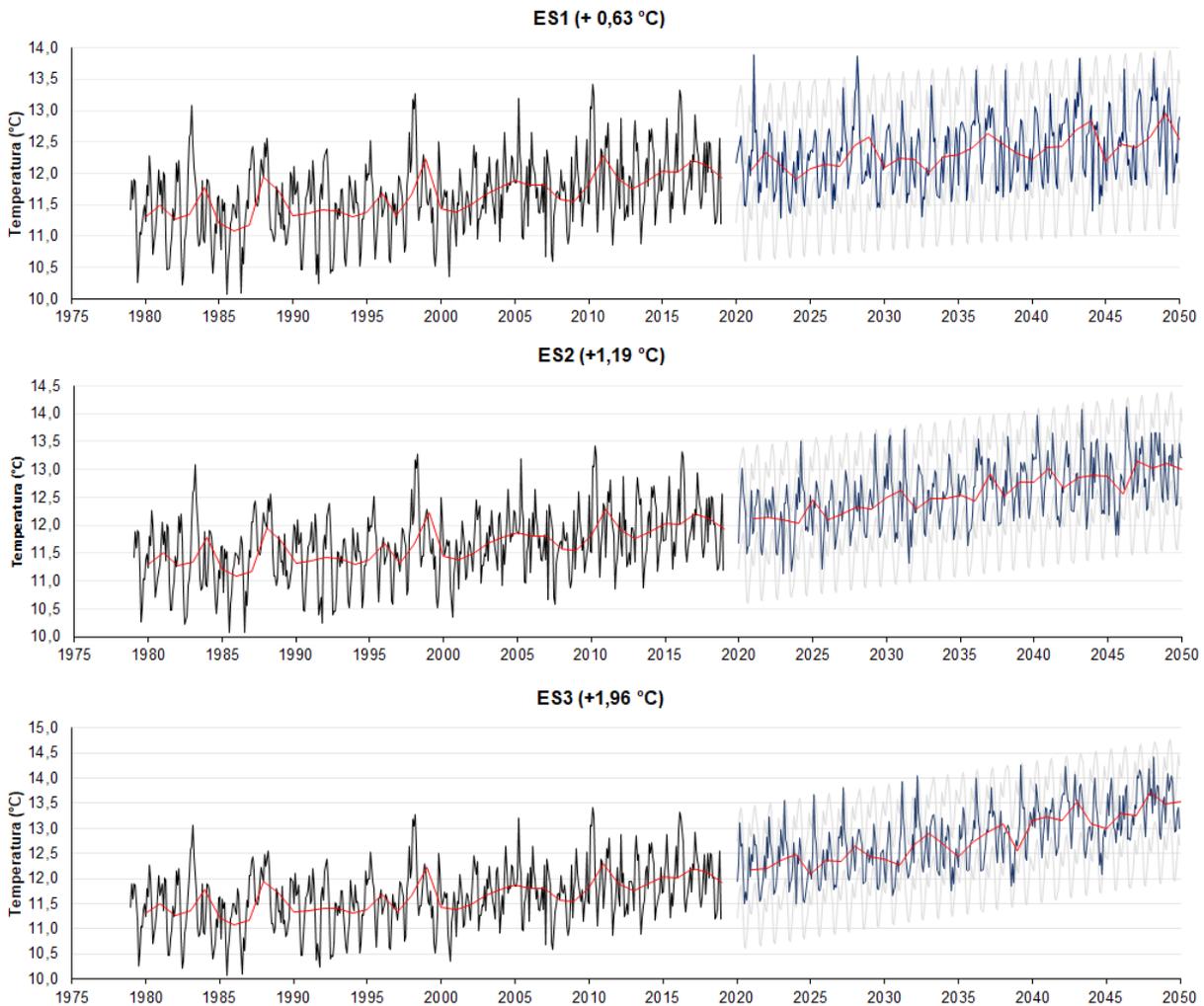


Figura 26. Proyecciones de temperatura en ES1, ES2 y ES3. Fuente: elaboración propia.

En comparación, las anomalías de temperatura que más se ajustan con las proyecciones del equipo de trabajo del IDEAM son las de ES3, por lo que se convierte en el escenario más probable a suceder en la cuenca del Lago. Lo anterior concuerda con lo expuesto por la Organización Meteorológica Mundial que indica que las temperaturas de la década 2010-2019 han sido las más altas registrados en la historia a nivel mundial, que se vería reflejado en un aumento entre 3 a

5°C a finales de siglo (OMM, 2020). En otros trabajos publicados, la tendencia del incremento de la temperatura en la alta montaña es similar a los de este estudio, los cuales son de 0,85 – 2,94°C dependiendo del escenario y el tiempo proyectado (Gutiérrez Uribe, 2016) (Gonzales Morales, 2016) (Beltrán García, 2018).

En contraste con el periodo de referencia 1989-2018, en la tabla 28 se ven las diferencias del comportamiento mensual por década de la temperatura media y el aumento comparativo entre los diferentes escenarios, al igual que la diferencia porcentual de los escenarios respecto al periodo de referencia. En la figura 27 se ilustra el aumento general de cada escenario en el periodo 2020 – 2049 comparado al periodo de referencia.

Tabla 28. Comparación decadal del aumento en la temperatura media (°C) de ES1, ES2 y ES3 respecto al periodo 1989-2018.

Esce- nario	Perio- do	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Actual	89-18	11,64	11,93	12,14	12,26	12,07	11,72	11,12	11,01	11,29	11,59	12,01	11,78	11,71
	20-29	12,10	12,45	12,83	12,77	12,51	12,08	11,57	11,67	11,74	12,02	12,37	12,13	12,19
	30-39	12,14	12,54	13,00	12,84	12,65	12,34	11,65	11,74	11,86	12,21	12,53	12,24	12,31
	40-49	12,29	12,77	13,34	13,02	12,85	12,48	12,09	11,94	12,03	12,47	12,78	12,51	12,55
	20-49	12,18	12,58	13,06	12,87	12,67	12,30	11,77	11,78	11,87	12,23	12,56	12,29	12,35
Dif (%)		4,6	5,5	7,5	5,0	5,0	4,9	5,9	7,0	5,2	5,6	4,6	4,4	5,42
ES1	20-29	12,04	12,44	12,69	12,78	12,57	12,28	11,68	11,61	11,78	12,11	12,56	12,24	12,23
	30-39	12,62	12,77	13,19	13,11	12,90	12,54	11,94	11,97	12,10	12,42	12,82	12,61	12,58
	40-49	12,77	13,24	13,62	13,36	13,21	12,80	12,39	12,29	12,43	12,95	13,22	12,76	12,92
	20-49	12,48	12,82	13,17	13,08	12,90	12,54	12,00	11,96	12,10	12,49	12,86	12,54	12,58
	Dif (%)		7,1	7,5	8,4	6,7	6,8	7,0	8,0	8,6	7,2	7,8	7,1	6,4
ES2	20-29	12,34	12,49	13,02	12,85	12,70	12,29	11,74	11,78	11,87	12,23	12,62	12,27	12,35
	30-39	12,75	12,94	13,46	13,28	13,10	12,74	12,11	12,16	12,27	12,63	12,93	12,53	12,74
	40-49	13,47	13,56	13,81	13,71	13,65	13,23	12,82	12,71	13,01	13,28	13,48	13,18	13,33
	20-49	12,85	13,00	13,43	13,28	13,15	12,75	12,22	12,22	12,38	12,72	13,01	12,66	12,81
	Dif (%)		10,4	9,0	10,6	8,3	8,9	8,8	9,9	10,9	9,6	9,7	8,3	7,5
ES3	20-29	12,34	12,49	13,02	12,85	12,70	12,29	11,74	11,78	11,87	12,23	12,62	12,27	12,35
	30-39	12,75	12,94	13,46	13,28	13,10	12,74	12,11	12,16	12,27	12,63	12,93	12,53	12,74
	40-49	13,47	13,56	13,81	13,71	13,65	13,23	12,82	12,71	13,01	13,28	13,48	13,18	13,33
	20-49	12,85	13,00	13,43	13,28	13,15	12,75	12,22	12,22	12,38	12,72	13,01	12,66	12,81
	Dif (%)		10,4	9,0	10,6	8,3	8,9	8,8	9,9	10,9	9,6	9,7	8,3	7,5

Fuente: Elaboración propia.

En ES1 los meses con mayor aumento son marzo y agosto, con incrementos más elevados que el anual; a su vez marzo, julio y agosto son los meses con mayores aumentos relativos en ES2; y por último enero, marzo y agosto son los meses que aumentan más su temperatura media con respecto a la media actual en ES3. Lo de ES3 parece coincidir con lo propuesto por IDEAM (2015)

con respecto a un aumento marcado en la temperatura del trimestre diciembre – enero – febrero y más leve en el trimestre septiembre – octubre – noviembre para el departamento de Boyacá. Se puede observar un cambio en la temperatura muy pronunciado en todos los escenarios durante marzo y agosto, probablemente por ser los meses con mayor variabilidad interanual, por lo que marzo desplaza a abril como mes más caluroso en los tres escenarios; y agosto ya no sería el mes más frío en ES1 y ES3 al reemplazarlo julio. Los incrementos entre escenarios se hacen más pronunciados entre décadas, por ejemplo, existe una diferencia anual de 0,16 °C durante 2020 – 2029 y una diferencia anual de 0,78 °C durante 2040 – 2049 entre ES1 y ES3.

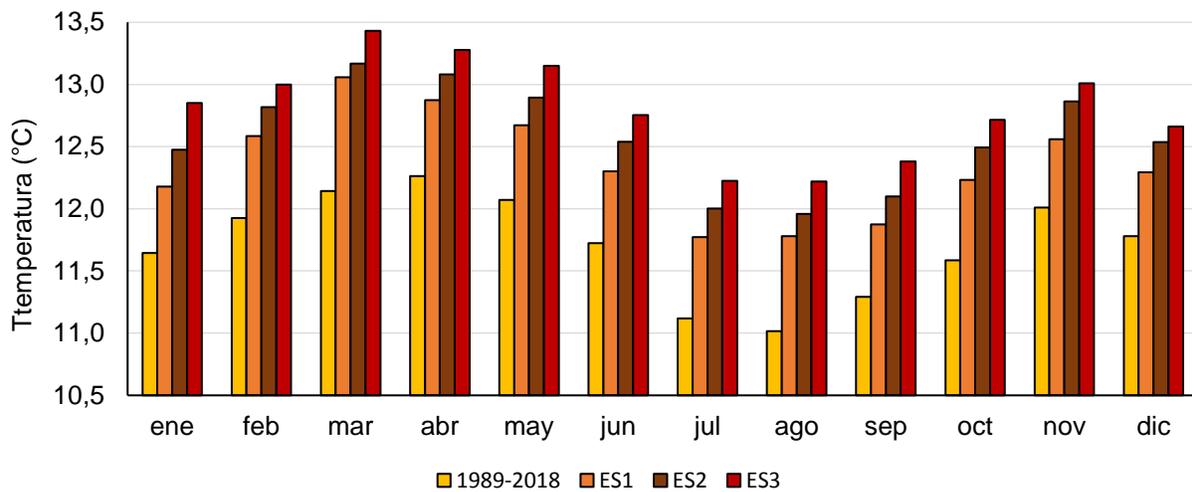


Figura 27. Comparativo del aumento de temperatura ES1, ES2, y ES3 con respecto al periodo 1989-2018. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.2. Escenarios de cambio en la Precipitación

En primera medida se analizaron las anomalías de las estaciones utilizadas en la calibración y validación del modelo hidrológico, mediante la normalización de los datos mostrados en la figura 28. Existe una tendencia general de comportamiento similar entre las estaciones, encontrando que los años 1979, 1994, 1998 y 2017 fueron años en los que las 4 estaciones coincidieron en temporadas más lluviosas, mientras que 1995, 1997, 2002 y 2009 fueron años secos en los 4 lugares. Cabe agregar que condiciones muy húmedas (precipitaciones  $> \sigma$ ) existieron en la estación Guamo en 7 años, en la estación Potrerito se presentó 6 años, en la estación Toquilla por 5 años y en Las Cintas 7 años. Las condiciones más secas (precipitaciones  $< -\sigma$ ) ocurrieron 5 veces en la estación Guamo, 6 años en la estación Potrerito, 7 veces en Las Cintas y 5 años en Toquilla. Años muy lluviosos y muy secos ocurrieron a lo largo de las 4 décadas analizadas

en Las Cintas, Toquilla y Potrerito; sin embargo, en el caso de Guamo los años más áridos todos ocurrieron después del 2000 y los años más húmedos sucedieron antes del año 2000.

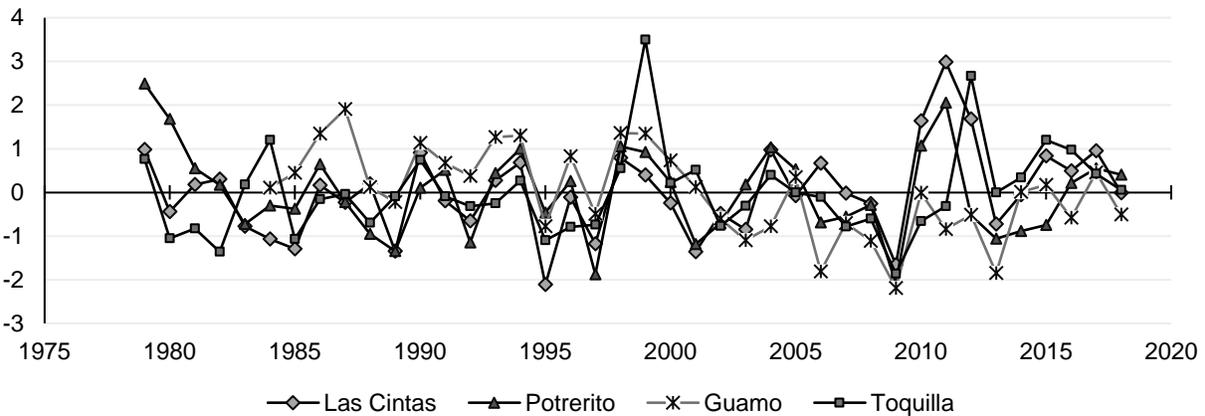


Figura 28. Anomalías de precipitación estaciones de estudio (1979 – 2018). Fuente: elaboración propia.

Es así que, para los escenarios de cambio de precipitación, todas las estaciones tienen probabilidades de que ocurran 5 años más lluviosos y 5 años menos lluviosos; con al menos 1 año en el que coincidan condiciones muy húmedas y un año de condiciones muy secas en las 4 estaciones durante el periodo 2020 – 2049.

Para la predicción de las precipitaciones mensuales de las cuatro estaciones se utilizó ARMA (1,1). La predicción obtenida del modelo sirvió como ES1 de precipitación para cada estación. El ES2 se generó según el ensamble multiescenario de cambio climático para precipitación y temperatura del IDEAM; el cual predice cambios entre -20 y 40% en las zonas de influencia de las estaciones de precipitación de este estudio para el periodo 2040-2070 respecto a 1976-2005. Igualmente, el ES3 está basado en RCP8.5 del IDEAM, que propone un rango de -20 y 30% en el cambio de la precipitación media anual en las subcuencas modeladas durante el periodo 2040 – 2070. Los resultados de la tabla 29 contienen los escenarios y cambios esperados para cada estación, notando que las estaciones Las Cintas, Potrerito y Toquilla en los 3 escenarios aumentan sus precipitaciones, mientras que en Guamo disminuye. La estación con el mayor incremento es Potrerito en ES2 con 33%, mientras que Guamo presenta la mayor reducción en ES1 con -18% aproximadamente. En la figura 29 se muestran gráficamente las series mensuales y anuales de precipitación para los diferentes escenarios de cambio climático. No existen diferencias grandes con respecto a la precipitación esperada a nivel mensual y anual en las estaciones Las Cintas y Toquilla, puesto que para cada escenario los aumentos de lluvias son muy similares entre sí, aunque se encuentran comportamientos más extremos en la variación interanual. El caso de la estación Potrerito muestra diferencias muy marcadas entre escenarios,

puesto que ES1 mantiene una tendencia relativamente similar a la observada en la serie histórica, con un aumento muy leve en la media anual, sin embargo, ES2 tiene un comportamiento muy distinto, con un incremento muy acelerado de la precipitación, situación semejante a la de ES3, con un aumento más controlado pero muy superior al de las demás estaciones. Las predicciones de la estación Guamo muestran una leve recuperación anual durante la primera década de las simulaciones en los tres escenarios, pero disminuye drásticamente en ES1 y ES3 durante el periodo 2030-2049, y en ES2 se estabiliza un poco en la última década de la predicción. La incertidumbre de los escenarios de cambio de precipitación es de  $\pm 2,3\%$  para ES1,  $\pm 1,23\%$  para ES2 y  $\pm 1,43\%$  en ES3.

Tabla 29. Resultados Modelo ARMA y Cambios de precipitación para ES1, ES2 y ES3.

Parámetro	Las Cintas	Potrerito	Toquilla	Guamo
<b>ARMA (1,1)</b>				
$\Phi$	-0,1501	-0,8509	-0,4557	-0,4776
$\theta$	0,1510	0,9837	0,5322	0,3569
<b>Precipitación media</b>				
<b>Anual 1989 – 2018 (mm)</b>	1211,93	828,32	1303,86	1456,95
<b>Cambio Precipitación</b>				
<b>ES1 (%)</b>	14,0	5,0	8,6	-18,4
<b>Precipitación media</b>				
<b>Anual ES1 (mm)</b>	1381,60	869,73	1415,99	1188,87
<b>Cambio Precipitación</b>				
<b>ES2 (%)</b>	12,6	33,6	9,1	-11,1
<b>Precipitación media</b>				
<b>Anual ES2 (mm)</b>	1364,63	1161,96	1422,51	1290,79
<b>Cambio Precipitación</b>				
<b>ES3 (%)</b>	10,6	25,1	7,1	-13,9
<b>Precipitación media</b>				
<b>Anual ES3 (mm)</b>	1340,39	1088,03	1396,43	1254,43

Fuente: Elaboración propia.

Trabajos de investigación realizados en cuencas de páramo muestran resultados muy heterogéneos en cuanto a los cambios de precipitación, pues se proyectaban incrementos hasta de 40% o reducciones de -35% en 5 escenarios de cambio climático para la cuenca del Lago de Tota (Gonzales Morales, 2016). En la cuenca de la quebrada Cárdenas, Quindío; los cambios de la precipitación no varían ampliamente entre 6 escenarios y se esperan reducciones entre 19 y 21% (Gutiérrez Uribe, 2016). Por el contrario, en la cuenca alta del río Tunjuelito, en el páramo

de Sumapaz, se predice un aumento medio de 9,48% de la precipitación en tres escenarios de cambio climático durante el periodo 2017-2040 (Lizarazo Rincón, 2018). Mientras tanto, en la quebrada La Chucua de Chingaza se pronostica una disminución del 7,2% de la precipitación para el año 2030. (Gil Morales, 2012).

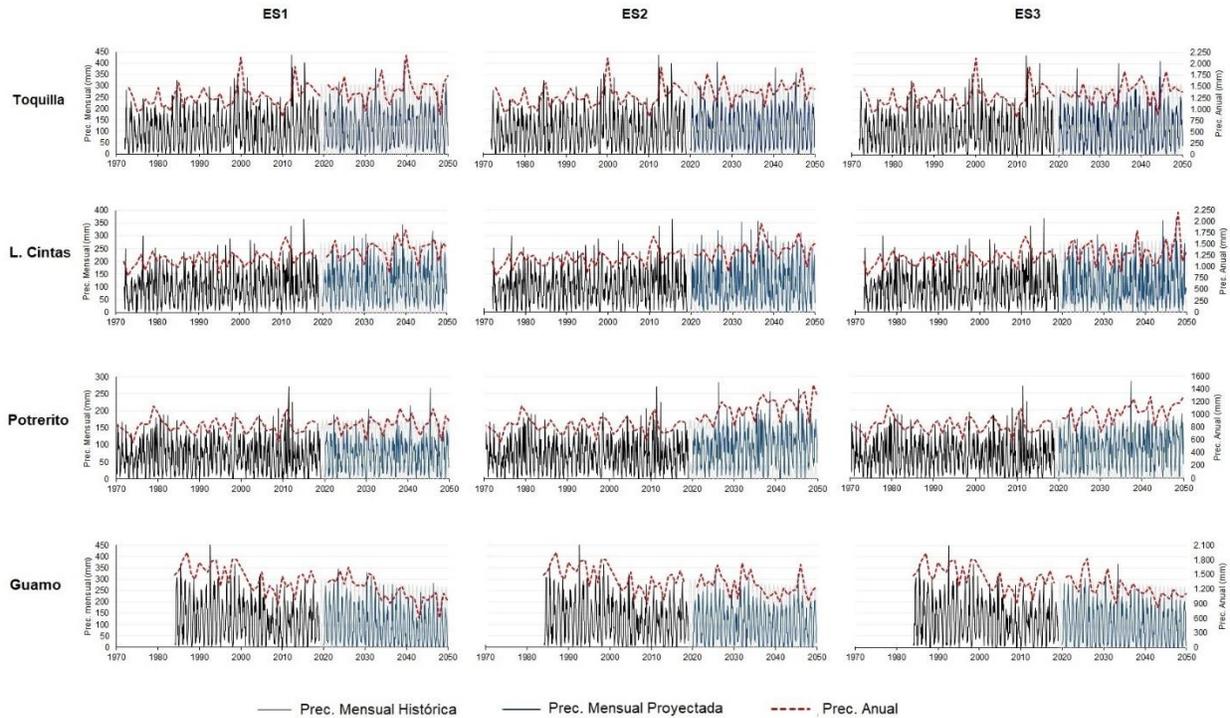


Figura 29. Precipitación mensual proyectada estaciones de estudio para ES1, ES2 y ES3. Fuente: elaboración propia.

El algoritmo en Python se aplicó a las series mensuales de las 4 estaciones y los 3 escenarios, obteniendo un total de 131.400 datos diarios, que se pueden consultar en el anexo de resultados de proyecciones de precipitación.

### 4.3.3. Escenarios de cambio en la Evapotranspiración

Para aplicar la ecuación 9, los coeficientes  $a$  y  $b$  fueron 0,25 y 0,54 respectivamente, tomados de los valores reportados en trabajos de investigación para zonas de alta montaña en Colombia (Marín Valencia, 2010), (Guzmán, *et al*, 2013), (Zuluaga Pulgarín, 2018). Además, se debió corregir la temperatura en función de la altitud media de las subcuencas, la cual se reduce aproximadamente  $0,61^{\circ}\text{C}$  por cada 100 msnm (Castro, Agualimpia & Sánchez, 2016). Los resultados comparados a los promedios climáticos del IDEAM (2011) y el factor de corrección se muestran en la tabla 30.

Tabla 30. Comparativo ET<sub>0</sub> (mm) por fórmula de Turc e IDEAM subcuencas de estudio periodo 1981-2010.

Subcuenca	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
<b>Hato Laguna</b>													
IDEAM	66	68,1	70,7	66,4	68,0	64,7	71,1	73,3	68,6	68,7	62,2	64,4	812,2
TURC	82,50	73,69	76,17	70,42	67,71	62,97	62,27	61,41	64,75	67,49	69,63	76,58	835,5
Factor corrección	0,80	0,92	0,93	0,94	1,01	1,03	1,14	1,19	1,06	1,02	0,89	0,84	0,97
<b>Olarte</b>													
IDEAM	72,6	63,6	76,2	70,2	71,5	67,8	74,5	77,6	73,4	73,9	67,0	70,2	858,5
TURC	79,69	71,27	73,70	68,21	65,52	60,80	59,91	59,05	62,38	65,12	67,35	74,01	807,1
Factor corrección	0,91	0,89	1,03	1,03	1,09	1,12	1,24	1,31	1,18	1,13	0,99	0,95	1,06
<b>Los Pozos</b>													
IDEAM	69,3	65,85	73,45	68,3	69,75	66,25	72,8	75,45	71	71,3	64,6	67,3	835,3
TURC	81,09	72,48	74,93	69,31	66,61	61,88	61,09	60,23	63,57	66,30	68,49	75,29	821,3
Factor corrección	0,85	0,91	0,98	0,99	1,05	1,07	1,19	1,25	1,12	1,08	0,94	0,89	1,02

Fuente: elaboración propia.

La diferencia anual entre de la ET<sub>0</sub> reportada por IDEAM y la obtenida por formula de Turc no es mayor al 10%, siendo el trimestre julio, agosto y septiembre en el que existe más diferencia. A partir de los resultados obtenidos se aplica la fórmula de Turc, conservando los coeficientes de la ecuación a los datos de temperatura proyectados. Estos resultados se muestran en la tabla 31, en los que se puede ver que la subcuenca del río Olarte es más afectada por el cambio de evapotranspiración potencial, puesto que en el escenario más adverso hay una diferencia de 68,4 mm anuales con respecto al periodo de referencia 1989 – 2018. Es así que para la subcuenca del río Hato Laguna, los cambios de Evapotranspiración Potencial para los diferentes escenarios se definen como un cambio medio anual de 4,36% para ES1, 5,85% para ES2 y 7,31% para ES3. En la subcuenca del río Olarte el cambio sería de 4,7% para ES1, 6,35% para ES2 y 7,88% para ES3. Para la subcuenca de la quebrada Los Pozos habría un aumento de 4,37% para ES1, 5,84% para ES2 y 7,31% para ES3. Estas proyecciones son coherentes con los cambios de temperatura previstos, aunque pueden registrar variaciones multitemporales por fenómenos del Niño y la Niña, que en el caso de la zona altoandina colombiana no afecta de manera significativa este parámetro, dado que las anomalías se sitúan alrededor del 7% (Hurtado Moreno & Cadena, 2019).

Tabla 31. Cambio medio mensual y anual de la ET<sub>0</sub> (mm) de subcuencas en estudio para ES1, ES2 y ES3.

Subcuenca	ene	feb	mar	abr	may	Jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
<b>Hato Laguna</b>													
<b>1989 – 2018</b>	66,17	68,61	71,67	66,94	68,61	65,58	72,11	74,24	69,41	69,51	62,89	64,80	820,5
<b>ES1</b>	68,57	71,61	75,81	69,54	71,29	68,15	75,63	78,55	72,35	72,64	65,16	67,04	856,3
<b>ES2</b>	69,89	72,61	76,27	70,37	72,24	69,16	76,81	79,49	73,44	73,82	66,35	68,07	868,5
<b>ES3</b>	71,47	73,29	77,46	71,18	73,29	70,12	77,98	80,76	74,68	74,73	66,97	68,62	880,5
<b>Olarte</b>													
<b>1989 – 2018</b>	72,80	64,11	77,32	70,81	72,19	68,79	75,65	78,68	74,34	74,84	67,80	70,66	867,9
<b>ES1</b>	75,65	67,12	82,11	73,76	75,22	71,69	79,64	83,62	77,73	78,47	70,43	73,30	908,7
<b>ES2</b>	77,21	68,13	82,65	74,70	76,28	72,83	80,97	84,69	78,99	79,83	71,81	74,51	922,6
<b>ES3</b>	79,07	68,81	84,02	75,62	77,47	73,91	82,29	86,15	80,42	80,89	72,52	75,15	936,3
<b>Los Pozos</b>													
<b>1989 – 2018</b>	70,67	67,45	75,68	69,95	71,53	68,32	75,26	77,91	73,17	73,42	66,41	68,87	858,6
<b>ES1</b>	73,24	70,40	80,05	72,67	74,33	71,00	78,93	82,44	76,27	76,73	68,80	71,25	896,1
<b>ES2</b>	74,65	71,39	80,54	73,53	75,31	72,05	80,16	83,42	77,42	77,97	70,06	72,35	908,8
<b>ES3</b>	76,33	72,06	81,79	74,38	76,41	73,05	81,38	84,76	78,73	78,94	70,71	72,93	921,4

Fuente: elaboración propia.

Aunque es probable que la ET<sub>0</sub> aumente en relación con la temperatura, la tendencia histórica de la cuenca del Lago de Tota es a la baja a medida que aumenta la Humedad Relativa; esto es causado por fenómenos de neblina continua que reducen la tasa de evapotranspiración hasta un 63%, bloqueando los rayos del sol que evaporan el agua de la superficie y las plantas (Tobón, 2019). Por el contrario, diversas investigaciones llevadas a cabo en zonas de páramo demuestran que realizar este cálculo con la metodología de Penman-Monteith de la FAO puede llevar a cometer errores por encima del 30% en la ET<sub>0</sub>, si no se tienen datos de la radiación solar, especialmente en épocas de verano (Córdova, Carrillo, Crespo, Wilcox & Celleri, 2015). Algunos estudios en cuencas de alta montaña muestran tendencias similares, como lo que ocurre en la cuenca alta del río Tunjuelito, donde la evapotranspiración real es muy baja actualmente, pero se espera que el aumento de temperatura incremente la evapotranspiración y afecte negativamente el rendimiento hídrico de la cuenca a finales del siglo XXI (Lizarazo & Peña, 2019). Un comportamiento similar se observa en la cordillera central, donde la ET<sub>0</sub> de la cuenca alta del río Coello, Tolima muestra un incremento interanual alrededor de 10% para el periodo 2011-2030, siendo más evidente durante los meses más secos (Castañeda Morales, 2016); semejante a lo

reportado por Gutiérrez Uribe (2016) en el páramo de Romerales donde  $ET_0$  incrementa entre 3 y 7% dependiendo de los escenarios de cambio climático para el periodo 2040 – 2065.

#### **4.4. Efectos de los escenarios de cambio climático en la disponibilidad y permanencia de Caudales**

Al aplicar el modelo hidrológico a las subcuencas se realiza en periodos de 10 años para cada escenario de cambio climático. Los parámetros del Modelo de cuenca del periodo de calibración y validación permanecen iguales, cambiando en el modelo meteorológico la  $ET_0$  media mensual calculada con anterioridad y la serie de tiempo de precipitación con los datos diarios generados. Los datos de caudales diarios obtenidos en la aplicación del modelo hidrológico a las subcuencas, bajo los tres escenarios de cambio climático, se pueden ver en el anexo de resultados de proyecciones de caudal.

##### **4.4.1. Subcuenca río Hato Laguna**

Para ES1 se encontró que respecto al periodo de referencia 2004 – 2018 de la calibración y validación del modelo, el caudal aumenta aproximadamente 2,7% en la década 2020 – 2029; 20,3% durante 2030 – 2039; 15,25% en la década 2040 – 2049 y un incremento medio del 12,77% para el periodo completo. En ES2 la oferta hídrica aumenta solo 0,7% en la década 2020 – 2029; 21,21% en la década 2030 – 2039 y 15,46% en la década 2040 – 2049, para un incremento del 12,46% en la escorrentía del periodo 2020-2049. Bajo el ES3 hay un ascenso del caudal descargado en la subcuenca del 12,32% en la década 2020 – 2029; 1,45% en la década 2030 – 2039; y 12,62% en la década de 2040 – 2049, con un incremento medio de 9,96% para el periodo de 30 años. El flujo base se incrementa en los 3 escenarios, alrededor de 8,70 % en ES1, 4,5% en ES2 y 2,3% en ES3, al igual que los incrementos en los volúmenes de escorrentía directa, los cuales son de 26,1% para ES1, 38,45% en ES2 y 29,07% para ES3. Otro aspecto a destacar es que la proporción de escorrentía directa incrementa en los tres escenarios, siendo el porcentaje más alto el de ES2 con 28,67%, lo que implica que mayor cantidad de caudal se explica por precipitación en exceso. El coeficiente de escorrentía no aumenta considerablemente en ninguno de los escenarios planteados, por lo que el rendimiento hídrico prácticamente es el mismo, suponiendo que en la subcuenca el incremento de precipitación y el de caudal es proporcional, como puede verse en la tabla 32. Ya que el incremento en el porcentaje del flujo base es mayor en ES1 que ES2 y ES3, esto puede ser debido a la mayor Evapotranspiración presentada a medida que hay mayores incrementos en la temperatura, por lo que el rendimiento hídrico de la subcuenca puede verse afectado negativamente por este parámetro a más largo plazo.

Tabla 32. Volumen de Flujo acumulado simulado Subcuenca río Hato Laguna para ES1, ES2 y ES3.

Escenario	Precipitación (mm)	Volumen descarga (mm)	Volumen flujo Base (mm)	Flujo Base (%)	Vol. Escorrentía directa (mm)	Escorrentía directa (%)	Coef. Escorrentía
<b>Referencia (2004 – 2018)</b>	19159,80	8601,17	6586,45	76,57	2014,71	23,43	0,449
<b>ES1</b>							
<b>2020 – 2029</b>	12895,53	5891,27	4498,96	76,36	1392,31	23,63	0,457
<b>2030 – 2039</b>	14535,28	6900,15	5021,12	72,77	1879,03	27,23	0,475
<b>2040 – 2049</b>	14045,28	6609,01	4798,06	79,06	1810,94	20,94	0,471
<b>ES2</b>							
<b>2020 – 2029</b>	12615,91	5774,66	4294,56	74,37	1480,10	25,63	0,458
<b>2030 – 2039</b>	14328,91	6950,62	4790,05	68,91	2160,57	31,09	0,485
<b>2040 – 2049</b>	13968,68	6620,70	4681,02	70,70	1939,67	29,30	0,474
<b>ES3</b>							
<b>2020 – 2029</b>	13796,11	6440,79	4699,22	72,96	1741,57	27,04	0,467
<b>2030 – 2039</b>	12964,95	5817,35	4293,70	73,81	1523,65	26,19	0,448
<b>2040 – 2049</b>	13669,60	6458,21	4521,17	70,00	1937,04	30,00	0,472

Fuente: elaboración propia.

La oferta hídrica en general muestra una tendencia al aumento, sin ser muy significativo en los tres escenarios, estando en el rango de normalidad de 80 – 120% establecido por el IDEAM (2018). Durante la calibración y validación del modelo hidrológico se observó una tendencia a subestimar la mayoría de los picos de caudal ocasionados por eventos extremos de lluvia, puesto que los caudales pico reales, en promedio estaban un 48% por arriba de los caudales pico simulados cuando el caudal simulado era mayor a 3,0 m<sup>3</sup>/s, lo que podría repetirse en el caso de las proyecciones de caudal realizadas hasta el año 2050 y presumiblemente dichos caudales extremos serán mayores a los obtenidos en la simulación. En la figura 30 se muestran los caudales simulados de la subcuenca en los 3 escenarios de cambio climático, observando picos de caudal más seguidos en ES2 y ES3, mientras que ES1 los caudales son más homogéneos, encontrando diferencias más pronunciadas entre periodos de bajos y altos caudales en el ES3, por lo que se supone un clima más extremo con aumentos mayores de temperatura.

Del análisis de la curva de duración de caudales se pudo determinar que, con respecto al periodo de referencia, el caudal medio de la subcuenca sería mayor un 15,7% en ES1, alrededor de 15,3% en ES2 y aproximadamente 11,5% en ES3, como se puede observar en la tabla 33. El

resultado del IRH del periodo de referencia es calificado como regulación moderada, siendo un poco mejor en ES1 y disminuyendo en ES2 y ES3. Por lo tanto, el caudal ambiental sería Q85 (caudal que excede el 85% del tiempo), cuyos resultados se muestran en la tabla 33. Gráficamente se puede ver el comportamiento de las curvas de duración de caudal medio diario de cada escenario en la figura 31, donde los comportamientos son muy similares, aunque hay un caudal mayor en las excedencias del 5% al 35% aproximadamente y entre 70 y 85%, en todos los escenarios.

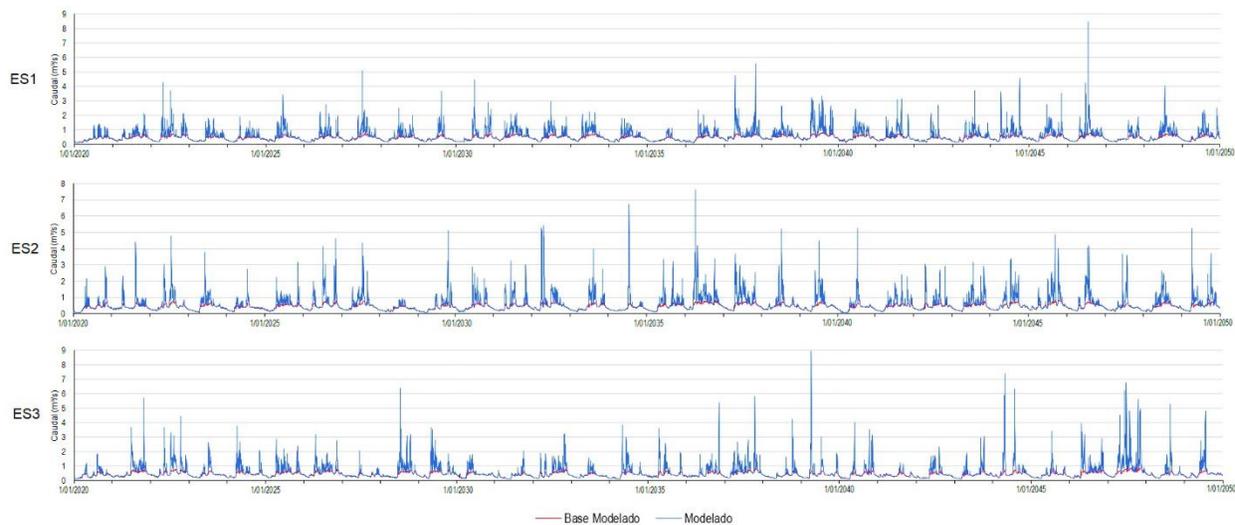


Figura 30. Caudales simulados subcuenca Hato Laguna para ES1, ES2 y ES3. Fuente: elaboración propia.

Tabla 33. IRH y caudal ambiental subcuenca río Hato Laguna para ES1, ES2 y ES3.

Escenario	Caudal Medio (m <sup>3</sup> /s)	IRH	Calificación	Caudal Ambiental (Q85) (m <sup>3</sup> /s)
<b>Referencia (2004 – 2018)</b>	0,536	0,744	Moderada	0,230
<b>ES1</b>	0,620	0,751	Moderada	0,272
<b>ES2</b>	0,618	0,720	Moderada	0,247
<b>ES3</b>	0,598	0,701	Moderada	0,261

Fuente: elaboración Propia

El incremento sustancial de los volúmenes de escorrentía directa junto con el IRH demuestra que la subcuenca del río Hato Laguna puede presentar crecientes de caudal más grandes provocadas por el incremento en las lluvias y clima más caluroso. Además, el aumento en el caudal ambiental

puede ser indicador positivo de que las condiciones de la cuenca mejorarían en permanencia hídrica del caudal superficial, que implica mayor disponibilidad del recurso hídrico.

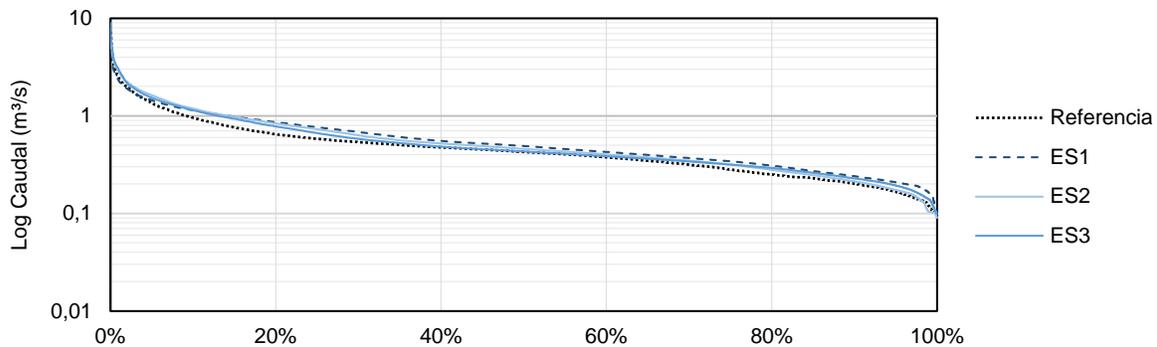


Figura 31. Curvas de duración de caudales medios diarios río Hato Laguna periodo de referencia vs ES1, ES2 y ES3. Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2. Subcuenca quebrada Los Pozos

Para ES1 se encontró que respecto al periodo de referencia 2006 – 2018 de la calibración y validación del modelo, el caudal aumenta aproximadamente 12,49% en el decenio 2020 – 2029; 27,96% en la década 2030 – 2039 y 22,40% para la década 2040 – 2049; para un incremento medio de 17,28% del escenario. En ES2 el flujo total de la subcuenca incrementa 14,66% en la década 2020 – 2029; aumenta un 21,16% en el decenio 2030 – 2039 y un aumento del 23,9% en la década 2040 – 2049, para un incremento del 19,9% en la escorrentía del periodo 2020-2049. Bajo el ES3 hay un ascenso del caudal descargado del 16,39% en la década 2020 – 2029; 15,5% en el decenio 2030 – 2039; y 18,16% en la década de 2040 – 2049, con un incremento medio de 16,68% para el periodo de 30 años. El flujo base se incrementa en los 3 escenarios, alrededor de 31,2% en ES1, 28,45% en ES2 y 22,54% en ES3, pero se encontró una disminución en los volúmenes de escorrentía directa, los cuales decrecen 26,65% para ES1, 19,73% en ES2 y 10,47% para ES3. Como se observa en la tabla 34 el porcentaje de flujo base incrementa en los tres escenarios con respecto al periodo de referencia, mientras la escorrentía directa decrece en los tres escenarios, lo que demuestra la gran capacidad de regulación de esta subcuenca.

La precipitación en la quebrada Los Pozos es de tendencia creciente, ya que incrementa 21,65% en ES1; 20,74% en ES2 y 20,12% en ES3, pero dicho incremento no se refleja en el coeficiente de escorrentía pues este disminuye, aunque el rendimiento hídrico de la subcuenca sigue siendo prácticamente igual, por lo que el incremento de lluvia se traduce en un incremento de escorrentía. Aunque la diferencia entre caudales base es relativamente baja, se observa que

disminuye ante escenarios más cálidos, provocado por la mayor Evapotranspiración presentada a medida que incrementa la temperatura, aunque sin consecuencias negativas para la oferta hídrica de la quebrada.

Tabla 34. Volumen de Flujo simulado acumulado Subcuenca quebrada Los Pozos para ES1, ES2 y ES3

Escenario	Precipitación (mm)	Volumen descarga (mm)	Volumen flujo Base (mm)	Flujo Base (%)	Vol. Escorrentía directa (mm)	Escorrentía directa (%)	Coef. Escorrentía
<b>Referencia (2006 – 2018)</b>	13652,0	11339,91	9330,15	82,27	2009,76	17,73	0,831
<b>ES1</b>							
<b>2020 – 2029</b>	11974,88	9812,66	8857,82	90,27	954,84	9,73	0,819
<b>2030 – 2039</b>	13399,33	11161,86	10108,89	90,56	1052,97	9,44	0,833
<b>2040 – 2049</b>	12951,95	10677,27	9283,55	86,95	1393,71	13,05	0,825
<b>ES2</b>							
<b>2020 – 2029</b>	12079,24	10002,06	9089,38	90,87	912,68	9,13	0,828
<b>2030 – 2039</b>	12808,08	10568,70	9205,36	87,10	1363,34	12,90	0,825
<b>2040 – 2049</b>	13153,31	10808,30	9361,61	86,61	1446,68	13,39	0,822
<b>ES3</b>							
<b>2020 – 2029</b>	12371,21	10152,96	8877,94	87,44	1275,02	12,56	0,821
<b>2030 – 2039</b>	12326,80	10075,66	8769,08	87,03	1306,58	12,97	0,817
<b>2040 – 2049</b>	12546,14	10307,71	8737,32	84,76	1570,39	15,24	0,821

Fuente: elaboración propia.

La oferta hídrica en general muestra una tendencia al aumento superior al 15% en los tres escenarios, estando cerca de sobrepasar el rango de normalidad de 80 – 120% establecido por el IDEAM (2018). Durante la calibración y validación del modelo hidrológico se observó una tendencia a subestimar las crecientes de caudal, ya que los caudales pico reales eran en promedio un 51,8% mayores a los simulados, cuando el caudal de crecida modelado era mayor a 1,0 m<sup>3</sup>/s y presumiblemente los caudales de crecida simulados serán mayores a los obtenidos en la simulación. En la figura 32 se muestran los caudales simulados de la subcuenca en los 3 escenarios de cambio climático, observando periodos secos y húmedos más marcados en ES2 y ES3.

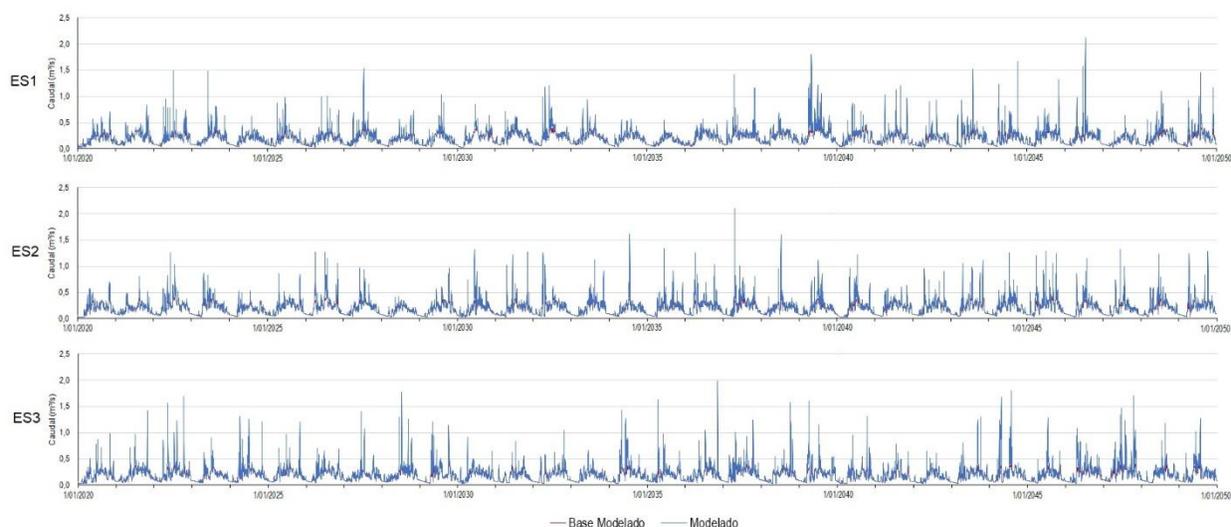


Figura 32. Caudales simulados subcuena Los Pozos para ES1, ES2 y ES3. Fuente: elaboración propia.

La curva de duración obtenida de los diferentes escenarios permite mostrar que el caudal medio de la subcuena será mayor en 21,3% durante ES1, alrededor de 20,2% durante ES2 y aproximadamente 17,5% durante ES3 como se observa en la Tabla 35. Igualmente se puede notar una mejoría en el IRH durante todos los escenarios, los cuales mejoran 9, 7 y 5 puntos porcentuales en ES1, ES2 y ES3 respectivamente, lo que demuestra que la microcuena cuenta con una buena capacidad de regulación hídrica ante eventuales lluvias más torrenciales. En consecuencia, el caudal ambiental calculado fue Q75 en el periodo de referencia y Q85 en los escenarios, los cuales son mayores al actual, lo que supone una mejora en la disponibilidad del recurso hídrico superficial de la microcuena.

Tabla 35. IRH y caudal ambiental subcuena Quebrada Los Pozos para ES1, ES2 y ES3.

Escenario	Caudal Medio (m <sup>3</sup> /s)	IRH	Calificación	Caudal Ambiental (Q75 – Q85) (m <sup>3</sup> /s)
<b>Referencia (2006 – 2018)</b>	0,183	0,673	Moderada	0,068
<b>ES1</b>	0,222	0,760	Alta	0,085
<b>ES2</b>	0,220	0,746	Moderada	0,078
<b>ES3</b>	0,215	0,737	Moderada	0,075

Fuente: elaboración propia.

En la figura 33 se pueden ver las curvas de duración de caudales medios diarios obtenidos de los escenarios y se observa que comparados con el periodo de referencia hay un incremento en el caudal de excesos a partir del 20% e igualmente el caudal mínimo es mayor. La gráfica y los datos de IRH demuestran que los caudales de crecida no incrementan en mayor medida en ninguno de los escenarios, pero sí incrementan los caudales medios y más bajos, por lo que la permanencia de los caudales superficiales se vería afectada positivamente.

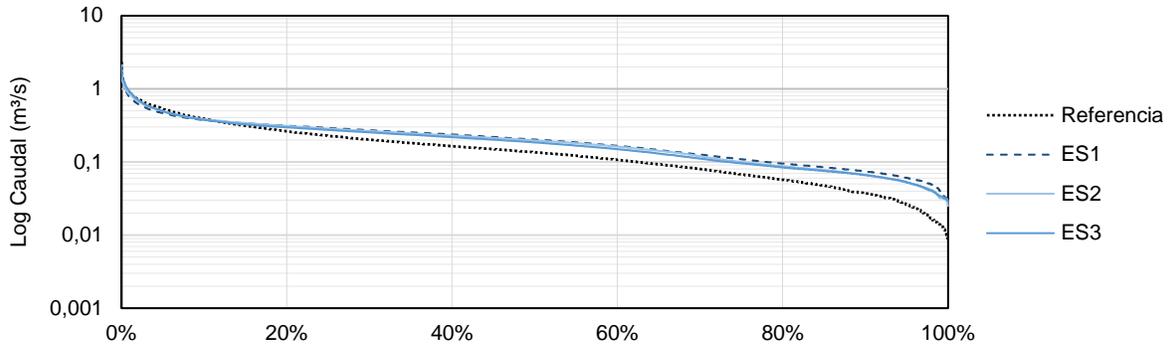


Figura 33. Curvas de duración de caudales medios diarios quebrada Los Pozos, periodo de referencia vs ES1, ES2 y ES3. Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.3. Subcuenca río Olarte

Para ES1 se encontró que respecto al periodo de referencia 2004 – 2011, 2016 – 2019, de la calibración y validación del modelo, el caudal incrementa alrededor de 5,00% en el decenio 2020 – 2029; 7,38% en la década 2030 – 2039 y decrece un 3,55% para la década 2040 – 2049; para un incremento medio de 2,94% del escenario. En ES2 el flujo total de la subcuenca incrementa 24,61% en la década 2020 – 2029; aumenta un 41,46% en el decenio 2030 – 2039 y un aumento del 43,88% en la década 2040 – 2049, para un incremento del 36,7% en la escorrentía del periodo 2020-2049. Bajo el ES3 hay un ascenso del caudal descargado del 22,9% en la década 2020 – 2029; 25,11% en el decenio 2030 – 2039; y 26,7% en la década de 2040 – 2049, con un incremento medio de 24,9% para el periodo de 30 años. El flujo base incrementa alrededor del 12,29% en ES1, 26,46% en ES2 y 20,54% en ES3; mientras el flujo de escorrentía directa disminuye 9,77% para ES1, pero incrementa 50,5% en ES2 y 30,85% para ES3, como se observa en la tabla 36.

El escenario ES1 muestra los coeficientes de escorrentía más bajos, puesto que el aumento de precipitación en este es aproximadamente del 5,1%, aunque el volumen de descarga es prácticamente el mismo, por lo que bajo este escenario se conserva la oferta hídrica. En ES2 hay

un considerable aumento en el volumen de descarga, dado el gran aumento de lluvia del escenario cercano a 29,7%, lo que incrementa hasta en 4 puntos porcentuales el coeficiente de escorrentía hacia la última década de la simulación. En ES3 el coeficiente de escorrentía incrementa levemente, puesto que el exceso de lluvia no es tan importante como el observado en ES2, pero es aproximadamente 22,1%.

Tabla 36. Volumen de Flujo acumulado simulado Subcuenca río Olarte para ES1, ES2 y ES3.

Escenario	Precipitación (mm)	Volumen descarga (mm)	Volumen flujo Base (mm)	Flujo Base (%)	Vol. Escorrentía directa (mm)	Escorrentía directa (%)	Coef. Escorrentía
<b>Referencia</b>							
<b>(2004 – 11, 2016 – 19)</b>	9792,59	6448,67	3716,86	57,63	2731,81	42,36	0,658
<b>ES1</b>							
<b>2020 – 2029</b>	9008,51	5888,14	3748,20	63,65	2139,94	36,35	0,654
<b>2030 – 2039</b>	9272,51	6021,52	3777,33	62,73	2244,19	37,27	0,649
<b>2040 – 2049</b>	8577,01	5408,39	3362,54	62,17	2045,85	37,83	0,631
<b>ES2</b>							
<b>2020 – 2029</b>	10297,88	6987,57	4009,28	57,37	2977,29	42,62	0,679
<b>2030 – 2039</b>	11334,01	7932,47	4122,90	51,97	3809,57	48,03	0,700
<b>2040 – 2049</b>	11506,89	8068,20	4129,65	51,18	3938,55	48,82	0,701
<b>ES3</b>							
<b>2020 – 2029</b>	10165,08	6891,86	3875,11	56,23	3016,75	43,77	0,678
<b>2030 – 2039</b>	10420,68	7015,99	3916,65	55,82	3099,34	44,17	0,673
<b>2040 – 2049</b>	10611,69	7104,87	3895,73	54,83	3209,14	45,17	0,669

Fuente: elaboración propia.

El volumen de flujo base de esta subcuenca tiene incrementos en los tres escenarios, dependiendo más del volumen de lluvia que de la evapotranspiración, sin embargo, hay diferencias entre la proporción de flujo base y el flujo total, ya que el primero disminuye a medida que el clima es más cálido, en los tres escenarios, indicando que la temperatura más alta aumenta las pérdidas por evapotranspiración.

Los caudales de crecida durante la calibración y validación del modelo eran mayores a los simulados aproximadamente un 46,3% cuando el caudal superaba los 4 m<sup>3</sup>/s, por lo que los caudales proyectados que se observan en la figura 34 pueden ser menores a los reales cuando ocurran picos de caudal.

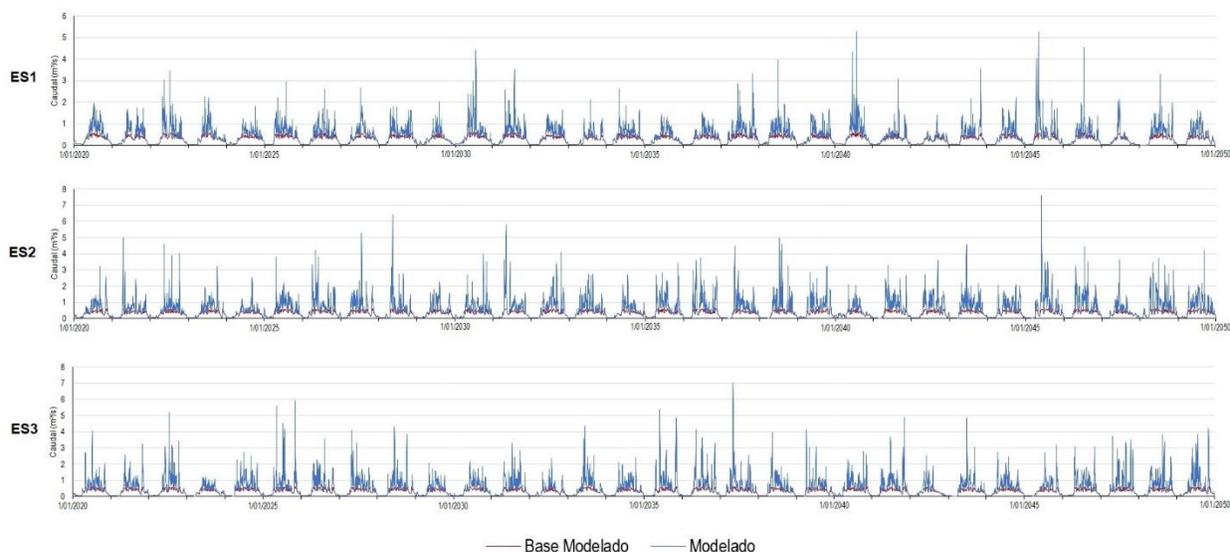


Figura 34. Caudales simulados subcuenca río Olarte para ES1, ES2 y ES3. Fuente: elaboración propia.

En cuanto al caudal medio de la subcuenca, se determinó a partir de la curva de duración de caudales medios diarios que este parámetro es mayor en 3% durante ES1, un 36,8% en ES2 y un 24,9% durante ES3, siendo estos dos últimos muy superiores a los rangos de normalidad. Así mismo, el IRH de la subcuenca mejora un poco con respecto al periodo de referencia, aunque su calificación se mantiene como baja, lo que incide en la capacidad de la subcuenca para regular caudales de crecida. Igualmente, a partir del resultado del IRH se calculó que el caudal ambiental corresponde a Q75, cuyos resultados se pueden observar en la tabla 37.

Tabla 37. IRH y caudal ambiental subcuenca Río Olarte para ES1, ES2 y ES3.

Escenario	Caudal Medio (m <sup>3</sup> /s)	IRH	Calificación	Caudal Ambiental (Q75) (m <sup>3</sup> /s)
<b>Referencia (2004 – 11, 2016 – 19)</b>	0,429	0,595	Baja	0,073
<b>ES1</b>	0,442	0,648	Baja	0,093
<b>ES2</b>	0,587	0,627	Baja	0,146
<b>ES3</b>	0,536	0,627	Baja	0,108

Fuente: elaboración propia.

Al observar la figura 35 se puede notar que en las curvas de duración de caudales proyectados con respecto al periodo de referencia hay flujo mayor en los 3 escenarios, sobre todo entre el 50 y 80% de las excedencias, encontrando caudales mínimos similares entre ES2 y ES3, y los de

ES1 un poco menores. Esto indica que el incremento en las lluvias podría afectar positivamente la permanencia del caudal superficial del río Olarte sobre todo en los caudales medios, ya que el exceso de lluvia se convierte en flujo base más estable.

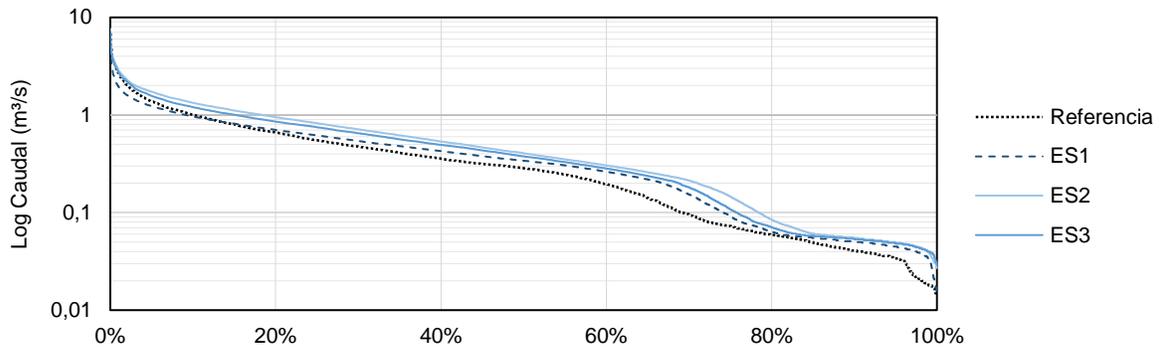


Figura 35. Curvas de duración de caudales medios diarios Subcuenca Río Olarte, periodo de referencia vs ES1, ES2 y ES3. Fuente: elaboración propia.

## 5. Conclusiones

- Las problemáticas de la cuenca del Lago de Tota han generado diferentes mecanismos de gestión que buscan mitigar los impactos producidos por las diferentes actividades económicas que dependen directa e indirectamente del recurso hídrico, reducir la contaminación de los ríos, quebradas y corrientes que desembocan en el lago y restaurar zonas intervenidas del páramo que rodea la alta montaña de la cuenca, con resultados mixtos y en muchos casos insuficientes. Esto debido a la desconexión entre entidades del orden nacional, departamental, municipal y Corpoboyacá, además de una comunidad con una histórica vocación agrícola destacada por las malas prácticas y detrimento del medio ambiente en pro de la expansión de tierras productivas y las utilidades económicas a corto plazo. Sin embargo, los recientes esfuerzos de organizaciones locales, departamentales, nacionales e internacionales han puesto en marcha en la cuenca del lago proyectos piloto que involucran a la academia, entidades gubernamentales y comunidades en la adaptación al cambio climático y el cuidado de los recursos hídricos, cuyos resultados son observables más a largo plazo y constituyen una hoja de ruta para seguir una agenda común para todas las partes involucradas.
- La gestión local de los municipios destina muy pocos recursos económicos a proyectos y programas relacionados con la protección de los recursos naturales de su territorio, incluido el recurso hídrico, y llama la atención que ningún municipio de la cuenca tenga un indicador de inversión ambiental favorable, a excepción de Sogamoso. Así mismo, no hay articulación del cambio climático y recursos hídricos en varios de los documentos de gestión ambiental revisados de orden Nacional, departamental y municipal.
- La calidad de agua del lago y sus corrientes tributarias, observada durante los últimos años, no muestra una clara mejoría en aspectos fisicoquímicos y microbiológicos, reflejado en el estado de meso-eutrofia que actualmente manifiesta el cuerpo principal de agua, el relativamente bajo índice de calidad de agua superficial y los elevados niveles de nutrientes encontrados. Los sectores culpables de la mayor contaminación del agua en la cuenca son el agropecuario y piscícola, aunque este último la autoridad ambiental lo ha reglamentado hace poco, le siguen los vertimientos de aguas residuales domésticas pues hay un deficiente tratamiento de la planta de aguas residuales de Aquitania y por último los desechos expuestos al ambiente de la minería de carbón que acidifican las quebradas. A esto se debe agregar el efecto de los contaminantes emergentes como compuestos

orgánicos persistentes provenientes de plaguicidas, que pueden tener efectos crónicos en la salud de las personas que tomen agua del lago. Si bien el IRCA de las poblaciones que se abastecen de la cuenca del Lago es bajo o sin riesgo, este indicador no mide metales y otros contaminantes trazas tóxicos para personas, animales y plantas a largo plazo.

- El 83,83% de la demanda actual de recursos hídricos es producto del consumo humano y actividades antrópicas fuera de la cuenca del lago, y al existir un transvase de recurso hídrico tan alto, la presión por la demanda del recurso hídrico se incrementa considerablemente, creciendo aún más en años secos, puesto que la oferta hídrica de la cuenca está muy ligada a las lluvias que aportan el agua a las corrientes superficiales y el subsuelo. Además, solamente una pequeña fracción de la demanda hídrica es utilizada por habitantes dentro de la misma cuenca, y sin embargo, son los mayores responsables de la degradación de los recursos y servicios ecosistémicos del páramo como provisión y regulación hídrica.
- El modelo hidrológico, acorde a la metodología de evaluación de eficiencia utilizada, es apropiado para representar el flujo Precipitación – Escorrentía de las subcuencas instrumentadas analizadas, y se demuestra que el software HEC – HMS es un programa adecuado para simulaciones en ecosistemas de páramo. La calibración y validación del modelo usando la metodología *Soil Moisture Accounting* tiende a sobreestimar los caudales base durante temporadas de baja precipitación en las subcuencas Hato Laguna y Los Pozos, mientras que se comporta más adecuadamente en la subcuenca Olarte. Así mismo se observó una inclinación a subestimar los caudales de crecida en todas las subcuencas simuladas.
- El rendimiento hídrico expresado en el coeficiente de escorrentía, para la subcuenca del río Hato Laguna se encuentra en valores de 0,450 en promedio; 0,429 año seco y 0,514 año húmedo. Para la quebrada los Pozos el coeficiente de escorrentía fue 0,831 en promedio; 0,760 en año seco y 0,861 en año húmedo. En la subcuenca del río Olarte el coeficiente de escorrentía fue de 0,658 en promedio; 0,554 en año seco y 0,693 en año húmedo. Las diferencias encontradas entre periodos secos y húmedos están relacionadas con el volumen de lluvia precipitada, afectando en mayor medida los años secos que los años lluviosos la oferta hídrica disponible; pero las diferencias entre subcuencas se debe a la cobertura vegetal principalmente, pues entre mayor área con vegetación de páramo

(arbustal y herbazal denso del código Corine Land Cover Colombia) mayor rendimiento hídrico en la subcuenca; puesto que los conflictos de uso del suelo medidos en la diferencia entre uso actual y uso potencial del suelo es de 45,4%, 42,1% y 29,7% en la subcuenca Hato Laguna, Olarte y Los Pozos respectivamente.

- El flujo base modelado corrobora que el suelo y vegetación de páramo tienen una alta capacidad de retención, al ser el mayor porcentaje del flujo total de caudal en las tres subcuencas. Así mismo la cantidad de flujo de escorrentía directa en menor porcentaje confirma que las subcuencas a pesar de tener una topografía accidentada con altas pendientes, mantienen una capacidad de regulación buena, especialmente la quebrada Los Pozos.
- La oferta hídrica media modelada de la subcuenca del río Hato Laguna es 16,9 Mm<sup>3</sup>/año, la del río Olarte es 13,5 Mm<sup>3</sup>/año, y la quebrada Los Pozos oferta 5,8 Mm<sup>3</sup>/año, que en total suman 36,2 Mm<sup>3</sup>/año de agua, lo que corresponde al 71,41% de la oferta hídrica media de la cuenca del Lago de Tota.
- La metodología ARMA (p, q) usada para proyectar las series de temperatura y precipitación bajo diferentes escenarios de cambio climático es apropiada para este estudio. Los 3 escenarios de cambio de temperatura se ajustan a las posibles rutas de cambio climático para la zona del Lago de Tota, y los escenarios de precipitación se enmarcaron en los rangos que se incluyen en la 3<sup>o</sup> comunicación del cambio climático para Colombia. Igualmente, el uso de la fórmula de Turc como metodología para ET<sub>o</sub> demostró un alto grado de ajuste al compararse con la reportada por el IDEAM, con una divergencia anual del 3%, 6% y 2% para las microcuencas Hato Laguna, Olarte y Los Pozos respectivamente.
- Según los escenarios de cambio climático propuestos, se observan incrementos de caudal en todas las subcuencas, relacionados con el aumento de las lluvias que se esperan en 3 de las 4 estaciones analizadas. El caso de la subcuenca del río Olarte se presumía un contraste de precipitaciones más leve debido a la influencia de la estación Guamo, la cual según los escenarios de cambio de precipitación tendría déficit de lluvias en rangos entre 11% y 19%, sin embargo, no afectó significativamente la precipitación calculada en esta microcuenca.

- Los caudales de flujo base simulados incrementan en los tres escenarios en todas las subcuencas, pero no en la misma proporción, puesto que la subcuenca del río Hato laguna entre más cálido el escenario, el caudal base es relativamente menor, situación similar a la quebrada Los Pozos. Esto se relaciona con el aumento de la  $ET_0$  y disminución de la precipitación en los escenarios de mayor temperatura observados en las subcuencas, puesto que la Evapotranspiración al depender de la temperatura, provocará mayores pérdidas en los meses más secos y cálidos (diciembre – enero – febrero), cuando el caudal base baja. Lo observado en el río Olarte indica que en ES2 incrementa más el caudal base, seguido de ES3 y por último ES1; ya que el volumen tan alto de lluvia precipitada de ES2 y ES3 supera las pérdidas de evapotranspiración de estos escenarios, mejorando el volumen de flujo base.
- La simulación de escorrentía directa del exceso de lluvia, es más alta en comparación al periodo de referencia en la subcuenca Hato Laguna y Olarte, puesto que el porcentaje de incremento del flujo de escorrentía directa es mayor que el del flujo total entre más cálido y lluvioso sea el escenario. En la subcuenca Los Pozos el caudal de exceso de lluvia disminuye en todos los escenarios, aunque en menor porcentaje cuando el escenario es más caluroso. Esto se debe a la variabilidad climática que supone un escenario con aumentos más drásticos de temperatura, que se traducen en climatología más inestable y con probabilidades de eventos de precipitación más extremos a medida que la temperatura aumenta, por lo tanto, implica que los eventos de inundación no serán más frecuentes, pero si más extremos en las subcuencas Hato Laguna y Olarte.
- El rendimiento hídrico de las subcuencas no se vería afectado en gran medida por los excesos de precipitación, y en realidad incrementan en la subcuenca Hato Laguna y Olarte, en esta última hasta cuatro puntos porcentuales en ES2; a diferencia del descenso en el coeficiente de escorrentía observado en la quebrada Los Pozos, aunque en cualquier caso es menor a dos puntos porcentuales. En consecuencia, se observa que entre mayor sea la precipitación mayor volumen de caudal disponible en las subcuencas, en aproximadamente la misma proporción de la calibración y validación del modelo hidrológico.

- La disponibilidad del recurso hídrico calculada mediante la oferta hídrica media para las tres subcuencas sería de 40,49 Mm<sup>3</sup>/año en ES1, para ES2 44,93 Mm<sup>3</sup>/año y en ES3 42,54 Mm<sup>3</sup>/año; por lo que ES2 es el escenario más favorable para la oferta hídrica, mientras que ES3 sería menos favorable y ES1 sería el más desfavorable. En todos los casos hay un incremento con respecto a la oferta hídrica de caudales superficiales actual, que en el futuro sería aproximadamente 56,71 Mm<sup>3</sup>/año en ES1, 62,93 Mm<sup>3</sup>/año en ES2, y 59,57 Mm<sup>3</sup>/año en ES3 para toda la cuenca del Lago de Tota.
  
- La capacidad de retención y regulación hídrica obtenida del IRH permite concluir que las subcuencas Hato Laguna y Los Pozos tienen calificaciones moderadas, y Olarte calificación baja, y que respecto al periodo de referencia el IRH mejora en ES1, y decae en ES2 y ES3. La quebrada Los Pozos tiene la mejor capacidad de regulación, seguida del río Hato Laguna, en las que el aumento de las precipitaciones y el consecuente aumento de caudales afectaría en menor medida la homogeneidad del flujo, lo que se traduce en menores caudales de crecida después de lluvias torrenciales. Además, ante posibles periodos de sequía prolongados no habría una disminución drástica del caudal base. Por el contrario, la subcuenca del río Olarte tiene una limitada retención hídrica, por lo que precipitaciones muy intensas producirían caudales pico más fuertes, y el caudal mínimo durante los meses más secos sería muy bajo en cualquier escenario.
  
- La permanencia de los caudales analizados mediante la curva de duración de caudales diarios simulados y el caudal ambiental, demuestra que en la subcuenca del río Hato Laguna incrementan los caudales medios y altos en los tres escenarios (Q excedidos el 20% del tiempo) comparados al periodo de referencia, y el caudal ambiental en los tres escenarios presenta una mejoría siendo más favorable en ES1 que los otros dos escenarios. En la microcuenca de la quebrada Los Pozos los mayores incrementos se observarían en los caudales medios y mínimos (Q excedidos del 30% - 99% del tiempo) debido a su capacidad de regulación que almacena el agua de temporadas húmedas y la libera durante temporadas secas; y su caudal ambiental mejora notablemente en los tres escenarios propuestos. Para la subcuenca del río Olarte los caudales medios, máximos y mínimos son mayores en ES2 y ES3, mientras que en ES1 los caudales máximos (Q excedidos el 10% del tiempo) son un poco menores comparados con el periodo de referencia de calibración – validación; sin embargo, los caudales ambientales serían mucho más altos que el registrado en el periodo de referencia, especialmente en ES3.

- En términos generales, la oferta hídrica superficial de las quebradas y ríos que dependen del páramo de la cuenca del lago de Tota no se verán afectados negativamente por el cambio climático global, en los escenarios analizados. Los incrementos de temperatura que se esperan para esta región de alta montaña afectarían positivamente la distribución de precipitaciones de la cuenca del Lago y, sin embargo, eventos de variabilidad climática como fenómenos de El Niño pueden extender los periodos secos y el fenómeno de La Niña contribuir con precipitaciones muy intensas, como se ha registrado en las últimas dos décadas. El incremento de la escorrentía superficial total en consecuencia, podría reforzar la problemática del arrastre de nutrientes (nitrógeno y fósforo), residuos de pesticidas y plaguicidas e incremento de sólidos suspendidos que serían depositados en el espejo del lago de Tota, contaminantes que afectan la salud de la población que se abastece del agua de la cuenca y favorecen la eutroficación del lago. Se debe agregar que el incremento de precipitaciones en exceso puede anegar las zonas bajas y llanas cultivadas de las subcuencas, dañar infraestructura vial por eventuales crecientes, provocar fenómenos de remoción en masa más frecuentes, afectar el turismo y generar pérdidas económicas para la región. Al mismo tiempo, los incrementos de temperatura de escenarios más cálidos, a largo plazo ponen en riesgo los niveles de caudal mínimo en las quebradas y ríos, favorecen los incendios forestales especialmente en el páramo y generaría conflictos sociales por el uso del agua en épocas de sequía.

## 6. Recomendaciones

La gestión ambiental de entidades territoriales nacionales, departamentales y locales debe procurar la unificación de objetivos y esfuerzos en pro de la recuperación del lago de Tota, lo que implica una mayor inversión financiera a políticas, programas y proyectos enfocados en recuperación y restauración de recursos naturales, y priorizar estrategias de conversión de actividades productivas, producción más limpia y sostenible en los cultivos, optimización de la aplicación de fertilizantes y plaguicidas; y eliminación de prácticas como pastoreo y quemas en zonas de páramos.

Se debe mejorar la estructuración de instrumentos de gestión para que incluyan el componente del cambio climático como un eje transversal en la formulación de políticas, programas y proyectos; especialmente elaborar e implementar el Plan Integral para Cambio Climático en los municipios de la cuenca y que dependen del recurso hídrico de esta. Igualmente es necesario continuar con programas y proyectos enfocados en resultados a largo plazo y llevar los proyectos piloto a toda la cuenca; con apoyo internacional, estatal, de la empresa privada, académico y comunitario.

Es importante fortalecer la educación y comunicación ambiental, sobre todo en las generaciones jóvenes que sufrirán las consecuencias del cambio climático las próximas décadas, y ayudarlos a prepararse y adaptarse efectivamente a los riesgos asociados. Por lo tanto, desde la perspectiva de la gestión del riesgo, se deben concertar con la comunidad los cambios necesarios para garantizar que las actividades humanas desarrolladas en la cuenca no impacten negativamente el ecosistema de la cuenca del lago.

Se recomienda extender el conocimiento hidrológico de la cuenca incrementando el número de estaciones hidro-climatológicas en subcuencas no instrumentadas, como estaciones de medición de caudal en el río Tobal de Aquitania, la quebrada el Salitre de Cuitiva y la quebrada La Puerta de Tota. Adicionalmente es recomendable profundizar el conocimiento de la evapotranspiración real de las coberturas vegetales asociadas al páramo, instalando instrumentos de medición de esta variable hidrológica muy poco estudiada en estos ecosistemas y que son fundamentales para calibrar apropiadamente los modelos hidrológicos y mejorar el entendimiento del ciclo hidrológico de los páramos.

Para un modelamiento más completo de la hidrología de la cuenca, se recomienda realizar estudios de suelos para tener mejor información de las características de infiltración y percolación del suelo y subsuelo, la capacidad de almacenamiento de agua y el comportamiento de los suelos bajo diferentes escenarios de cambio climático. Para futuras investigaciones es recomendable evaluar las implicaciones del cambio de cobertura vegetal en el ecosistema de páramo, ya sean por causas antrópicas, como restauración activa de vegetación; o naturales como sucesión generada por los cambios de temperatura, puesto que es un factor importante en la capacidad de retención y regulación hídrica de las cuencas de alta montaña.

Finalmente se recomienda que las instituciones gubernamentales preparen sus territorios ante los efectos del cambio climático sobre el recurso hídrico, que según los resultados de este trabajo, principalmente se deben enfocar en infraestructura para mitigar eventos de crecientes de caudales, obras de contención de pendientes y suelos inestables, obras y mantenimiento de sistemas de abastecimiento y tratamiento de agua potable, construcción y optimización de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas, agrícolas y piscícolas, y prevención de ocurrencia de incendios forestales en zonas de páramo. Además, se deben impulsar programas innovadores para uso racional de recursos hídricos, especialmente aquellos de bajo costo y basados en soluciones naturales. En esencia, es imperativo implementar tecnologías y estrategias que permitan a la comunidad adaptarse ante la inminente crisis climática, y hacer un verdadero uso sostenible de los recursos hídricos de la cuenca del Lago de Tota.

## 7. Referencias Bibliográficas

- Abella, Johanna, & Martínez, Maria Jose. (2012). Contribución de un afluente tributario a la eutrofización del Lago de Tota (Boyacá, Colombia). *Revista Colombiana de Química*, 41(2), 243-261.
- Adedeji, Olufemi; Reuben, Okocha, & Olatoye, Olufemi. (2014). Global Climate Change. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 02(02), 114-122. doi: 10.4236/gep.2014.22016
- Agualimpia, Yolima del C., & Castro Méndez, Carlos Enrique. (2013). Capacidad de reserva de agua en los suelos del borde norte de Bogotá. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(1), 55-61. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-00542013000100010&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542013000100010&lng=es&tlng=es).
- Alaska Satellite Facility (2011). *Conjunto de Datos ALOS PALSAR Radiometric Ground Corrected (RTC)*. Plancha AP\_24449\_FBD\_F0090\_RT1. Tomado de: [10.5067 / Z97HFCNKR6VA](https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA)
- Alcaldía de Cúitiva & CORPOBOYACÁ (2005). *Esquema de Ordenamiento Territorial de Cúitiva*. Cúitiva, Boyacá: Hidrogeología y Geotecnia Ambiental LTDA.
- Alcaldía municipal de Aquitania (2016). *Plan de desarrollo: Soluciones firmes para Aquitania 2016-2019*. Aquitania, Boyacá: Alcaldía municipal y Concejo Municipal de Aquitania.
- Alcaldía Municipal de Tota (2015). *Esquema de Ordenamiento Territorial de Tota: Revisión General*. Tota, Boyacá: Grupo Proyectamos Soluciones S.A.S.
- Alcaldía Municipal de Tota (2016). *Plan de Desarrollo Unidos dejaremos huella 2016-2019*. Tota, Boyacá: Alcaldía y Concejo Municipal de Tota.
- Alcaldía Municipio de Sogamoso (2016). *Revisión general Plan de Ordenamiento Territorial*. Sánchez Moreno, et al. (Compiladores). Tomo I: Componente General. Sogamoso, Boyacá: Alcaldía Municipio de Sogamoso.
- Alcaldía Municipio de Sogamoso (2016a). *Plan de desarrollo municipal: Sogamoso Incluyente 2016-2019*. Sogamoso, Boyacá: Alcaldía y Concejo Municipal de Sogamoso.

Alcaldía Municipio de Sogamoso (2020). *Informe de Gestión de Gobierno 2016-2019*. Sogamoso, Boyacá: Alcaldía municipio de Sogamoso.

Álvarez Arango, Luisa Fernanda. (2005). *Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. Bogotá D.C: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D. & Ruíz, J. F. (2012). Cambio climático más probable para Colombia a lo largo del siglo XXI respecto al clima presente. Subdirección de Meteorología. Bogotá: IDEAM. Tomado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Escenarios+Cambio+Climatico+%28Ruibiz%2C+Guzman%2C+Arango+y+Dorado%29.pdf/fe5d64fb-3a82-4909-a861-7b783d0691cb>

Arcos, María Emilia (2010). *Influencia de la cobertura vegetal en la capacidad de infiltración de agua en suelos de páramo*. (Pregrado en licenciatura educación ambiental, Trabajo de Grado). Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador. <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/1070/1/99554.pdf>

Armada Nacional (1998). *Informe final levantamiento topográfico, batimétrico y sedimentológico laguna de Tota*. Cartagena de Indias, Colombia: Centro de Investigaciones Oceanográfico.

Arnell, N. W., & Reynard, N. S. (1996). The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *Journal of Hydrology*, 183(3), 397-424. doi: [10.1016/0022-1694\(95\)02950-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02950-8)

Arnell, Nigel W. (1999). The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global environmental change*, 9(1), 5-23.

Baethgen, Walter E., & Magrin, Graciela O. (1995). Assessing the impacts of climate change on winter crop production in Uruguay and Argentina using crop simulation models. *Climate change and agriculture: analysis of potential international impacts*, 207-228.

Balthazar, Vincent; Vanacker, Veerle; Molina, Armando & Lambin, Eric F. (2015). Impacts of forest cover change on ecosystem services in high Andean mountains. *Ecological Indicators*, 48, 63-75. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.043>

- Banco de Desarrollo de America Latina - CAF. (2017). Project Document for Andes adaptation to the impact of Climate Change in Water Resources Project (AICCA) (G. E. Unit, Trans) pp. 120. Caracas, Venezuela: Banco de Desarrollo de América Latina.
- Barnett, Tim; Malone, Robert; Pennell, William; Stammer, Detlet; Semtner, Bert, & Washington, Warren. (2004). The Effects of Climate Change on Water Resources in the West: Introduction and Overview. *Climatic Change*, 62(1), 1-11. doi: 10.1023/B:CLIM.0000013695.21726.b8
- Barrera Crespo, Pedro David & Torres Vázquez, Christian Oswaldo. (2010). *Estudio sobre la generación de escorrentía en microcuencas de páramo con énfasis en la hidrofísica de suelos*. (Pregrado en Ingeniería Civil, Trabajo de Grado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Barrera H, July Andrea; Espinosa R, Adriana Janneth, & Álvarez S, Juan Pablo. (2019). Contaminación en el Lago de Tota, Colombia: toxicidad aguda en *Daphnia magna* (Cladocera: Daphniidae) e *Hydra attenuata* (Hydroidea: Hydridae). *Revista de Biología Tropical*, 67, 11-23.
- Barrera Sarmiento, Juan Sebastián. (2017). *Propuesta de manejo y monitoreo del recurso hídrico en microcuenca la Martinera, páramo de Siscunsí*. (Ingeniero Ambiental, Trabajo de Pregrado), UPTC, Tunja, Boyacá.
- Barrera Sarmiento, Juan Sebastián. (2017a). *Propuesta de Manejo y Monitoreo del Recurso Hídrico en microcuenca La Martinera, páramo de Siscunsí*. Ponencia presentada en III Congreso de Ciencias Ambientales, Barranquilla, Colombia.
- Beltrán García, Luis Eduardo. (2018). *Efecto de las variables climáticas y uso del suelo sobre la oferta hídrica en la Cuenca del Río Gachaneca (Boyacá-Colombia) como escenario para la gestión integral del recurso hídrico*. (Magister en Ciencias Ambientales, Trabajo de Investigación), Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Bogotá D.C.
- Bergström, Sten; Carlsson, Bengt; Gardelin, Marie; Lindström, Göran; Pettersson, Anna, & Rummukainen, Markku. (2001). Climate change impacts on runoff in Sweden—assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling. *Climate research*, 16(2), 101-112.

- Birundu, Anne M., & Mutua, Benedict M. (2017). Analyzing the Mara River Basin Behaviour through Rainfall-Runoff Modeling. *International Journal of Geosciences*, 08(09), 1118-1132. doi: 10.4236/ijg.2017.89064
- Boninsegna, J., & Villalba, Ricardo. (2006). Los escenarios de Cambio Climático y el impacto en los caudales. *Documento sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan en escenarios de Cambio Climático*. Primer informe a la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Buitrago, J., & Vergara, I. (1988). *Investigación hidrogeológica de la cuenca del lago de Tota*. (Ingeniero de Minas, Trabajo de Pregrado), UPTC, Sogamoso, Boyacá.
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., & Deckers, J. (2005). The effect of land-use changes on the hydrological behavior of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes*, 3985-3997.
- Buytaert, W.; Céleri, R.; De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2010). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. 26 p.
- Buytaert, Wouter, & De Bièvre, B. (2012). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8). W08503, doi:10.1029/2011WR011755
- Buytaert, Wouter; Céleri, Rolando, & Timbe, Luis. (2009). Predicting climate change impacts on water resources in the tropical Andes: Effects of GCM uncertainty. *Geophysical Research Letters*, 36(7).
- Buytaert, Wouter; Céleri, Rolando; De Bièvre, Bert; Cisneros, Felipe; Wyseure, Guido; Deckers, Jozef, & Hofstede, Robert. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 53-72. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Cabrera Balarezo, Juan José. (2017). *Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo*. (Proyecto de Grado para Ingeniero Civil), Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

- Carlson, Robert E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369. doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361
- Caspers, H. (1982). *Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control* (1ª ed. Vol. 69). París: Organization for Economic Co-Operation and Development (OCDE).
- Castañeda Morales, Yeraldine. (2016). *Modelación del efecto del cambio de uso del suelo en la cuenca del río Coello, bajo escenario de cambio climático, a través de la aplicación del modelo hidrológico SWAT*. (Ingeniero Forestal, Trabajo de Grado), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C.
- Castro Méndez, C., Agualimpia Dualiby, Y., & Sánchez Sánchez, F. (2016). Modelo climático de los páramos de la Cordillera Oriental colombiana aplicado a regímenes de temperatura del suelo. *Perspectiva Geográfica*, 21(1), 33-62. <https://doi.org/10.19053/01233769.4541>
- Cisneros, Felipe; Sáenz, Melio; Coello, Cristian, & Pacheco, Esteban. (2014). *Evaluación de herramientas de modelización para la toma de decisiones en la revitalización hidrológica y forestal en cuencas de montaña*. Presentado en: 7th International Perspective on Water Resources and the Environment; Quito, Ecuador: AAWRE.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social - CONPES. (2011). *estrategia institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia: Documento CONPES 3700*. Bogotá D.C: Departamento Nacional de Planeación. Recuperado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3700.pdf>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social - CONPES. (2014). *Manejo Ambiental Integral de la cuenca hidrográfica del lago de Tota: Documento CONPES 3801*. Bogotá D.C: Departamento Nacional de Planeación. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/conpes/12-Conpes%20No.%203801-2014.pdf>
- Contraloría General de Boyacá – CGB (2012). *Informe sobre el estado de los recursos naturales y del ambiente en el departamento de Boyacá 2011 -2012*. Tunja, Boyacá: CGB.
- Contraloría General de Boyacá – CGB (2019). *Informe sobre el estado de los recursos naturales y del ambiente en el departamento de Boyacá 2018 -2019*. Tunja, Boyacá: CGB.

Contraloría General de la República – CGR (2013). *Actuación especial – evaluación de la gestión del lago de Tota*. Bogotá D.C: Contraloría delegada Medio Ambiente.

Córdova, Mario; Carrillo-Rojas, Galo; Crespo, Patricio; Wilcox, Bradford; & Célleri, Rolando. (2015). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data. *Mountain Research and Development* 35(3), 230-239. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-0024.1>

CORPOBOYACÁ & Pontificia Universidad Javeriana - PUJ (2005a). Problemática ambiental. En: *POMCA de la cuenca Lago de Tota* (30pp.). Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

CORPOBOYACÁ & Pontificia Universidad Javeriana - PUJ (2005b). Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del lago de Tota. En: *POMCA de la cuenca Lago de Tota* (151pp.). Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

CORPOBOYACÁ & Pontificia Universidad Javeriana - PUJ (2005c). Oferta y demanda del recurso hídrico. En: *POMCA de la cuenca Lago de Tota* (16pp.). Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

CORPOBOYACÁ & Pontificia Universidad Javeriana - PUJ (2005d). Caracterización fisicoquímica del lago de Tota y sus principales tributarios. En: *POMCA de la cuenca Lago de Tota* (40pp.). Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

CORPOBOYACÁ & Pontificia Universidad Javeriana - PUJ (2005e). Diagnóstico cuantitativo del recurso hídrico. En: *POMCA de la cuenca Lago de Tota* (67pp.). Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

CORPOBOYACÁ (2009). *Lineamientos generales para la construcción del documento de seguimiento y evaluación del EOT municipio de Aquitania*. Disponible en: <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2015/11/lineamientos-pot-aquitania.pdf>

CORPOBOYACÁ & NEOTROPICAL (2011). *Formulación del Plan de Manejo del Parque Natural Regional Siscunsi – Ocetá* (138 pp.) Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ

CORPOBOYACÁ (2012). *Resolución 1539 de 2012: Por medio de la cual se reglamenta el uso del recurso hídrico de las corrientes pertenecientes a las microcuencas los Pozos,*

*Hatolaguna, Olarte y Tobal, afluentes del lago de Tota y derivaciones a través de motores u otros combustibles.* Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

CORPOBOYACÁ & Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. (2015). Estudios técnicos, económicos, sociales y ambientales para la identificación y delimitación del complejo Tota – Bijagual – Mamapacha a escala 1:25.000 (479 pp.). Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

CORPOBOYACÁ, DNP, DANE, Minambiente, CGR & IDEAM. (2016). *Contabilidad ambiental y económica para el agua: caso piloto para la cuenca del lago de Tota.* Bogotá, D.C: CORPOBOYACÁ.

CORPOBOYACÁ. (2009). *Plan de Gestión Ambiental Regional PGAR 2009-2019* (A. L. P. Ltda. Ed.). Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

CORPOBOYACÁ. (2016). *Plan de Acción 2016-2019.* Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

CORPOBOYACÁ. (2019). *Audiencia pública para la presentación de resultados de la gestión adelantada en el marco del plan de acción 2016-2019.* Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

CORPOBOYACÁ. (2019a). *Audiencia pública para la presentación del informe de nivel de cumplimiento del plan de acción 2016-2019.* Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

CORPOBOYACÁ (2019b). *Expediente OOPV-00017-18: Proceso sancionatorio por PSMV del municipio de Aquitania.* Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

CORPOBOYACÁ (2019c). *Resolución 4574 de 2019: Por medio de la cual se reglamenta el uso del recurso hídrico de las Aguas derivadas del Lago de Tota a través del Túnel de Cuítiva y se toman otras determinaciones.* Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

CORPOBOYACÁ. (2020). *Informe de Gestión del Plan de Acción 2016-2019.* Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

Corporación Autónoma Regional de la Sabana de Bogotá y los valles de Ubaté y Chiquinquirá - CAR. (1978). *Estudio de conservación y manejo del Lago de Tota y su cuenca: Informe principal* (CAR & FONADE Eds.). Bogotá, D.C: CAR.

- Cottrell, Allin & Lucchetti, Riccardo (2020). Gretl User's Guide. *Capítulo 30: Modelos univariados de series de tiempo*. Tomado de <http://www.gnu.org/licenses/fdl.html>
- Crespo P. *et al*, (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. En: Cuesta F, Sevink J, Llambí LD, De Bièvre B, Posner J, Editores. *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*, CONDESAN.
- Daza Torres, Martha Constanza, & Hernández Florez, Fanny, & Alba Triana, Flor (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapáz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 67(1), 7189-7200. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1799/179930032006>
- Devia, Gayathri K.; Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Dibike, Yonas B., & Coulibaly, Paulin. (2005). Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 307(1), 145-163. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.012>
- Duarte Prieto, Freddy Santiago (2017). *Técnica de reducción de escala estadística basada en la teoría del caos: Aplicación y desempeño en la Cuenca del Río Bogotá*. (Magister en Ingeniería Civil, Tesis de Maestría), Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, D.C.
- Espinosa R, Adriana Janneth. (2018). *El agua, un reto para la salud pública. La calidad del agua y las oportunidades para la vigilancia en Salud Ambiental*. (Doctora en Salud Pública, Tesis de Doctorado), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. tomado de: <http://bdigital.unal.edu.co/63280/1/PhD%20Adriana%20J%20EspinosaRamirez.pdf>
- Evans, Jason, & Schreider, Sergei. (2002). Hydrological impacts of climate change on inflows to Perth, Australia. *Climatic Change*, 55(3), 361-393.
- Farfán Durán, Juan Fernando. (2016). *Impacto del cambio climático en los caudales de una cuenca de paramo. Primera aproximación*. (Ingeniero Civil, Trabajo de grado), Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. Tomado de: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/24355>

Franco Vidal, Lorena; Delgado, Juliana, & Andrade, Germán I. (2013). Factores de la vulnerabilidad de los humedales altoandinos de Colombia al cambio climático global. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*; 22 (2). 69-85. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v22n2.37018>

Fundación Montecito (9 de junio de 2015). Filtro verde, Cúitiva. *Boletín a la comunidad y medios*. 4 pp. Recuperado de [http://www.fundacionmontecito.org/uploads/1/2/6/1/12616542/filtro\\_verde\\_boletin\\_02\\_09\\_jun\\_2015.pdf](http://www.fundacionmontecito.org/uploads/1/2/6/1/12616542/filtro_verde_boletin_02_09_jun_2015.pdf)

Gil Morales, Eydith Girleza. (2012). *Modelación Hidrológica de los Páramos Andinos con TOPMODEL: páramo de Chingaza, Colombia*. (Magister en Bosques y Conservación Ambiental: Tesis de Maestría), Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Gil Padilla, L., Pedroza Ramos, A., & Aranguren Riaño, N. (2016). Valoración ambiental del litoral del Lago de Tota basado en estructura y función de macroinvertebrados. *Cultura Científica*, (14), 16-25. Recuperado de [https://www.jdc.edu.co/revistas/index.php/Cult\\_cient/article/view/35](https://www.jdc.edu.co/revistas/index.php/Cult_cient/article/view/35)

Gil Padilla, Luz Nidia. (2016). *Rutas tróficas en macrozooplancton del lago de Tota – Boyacá, Colombia*. (Magister en Ciencias Biológicas, Trabajo de Investigación), UPTC: Tunja, Boyacá. Tomado de: <https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2258/1/TGT-924.pdf>

Girard, James E. (2010). *Principles of Environmental Chemistry* (2<sup>a</sup> ed.). Burlington, Massachusetts: Jones & Barlett Learning.

Gobernación de Boyacá (2016). *Plan de Desarrollo departamental 2016-2019: Creemos en Boyacá*. Tunja, Boyacá: Gobernación de Boyacá.

Gobernación de Boyacá (2019). *Informe de Gestión: tercer trimestre 2019, anual y cuatrienio*. Tunja, Boyacá: Gobernación de Boyacá.

Gómez Vianchá, Blanca Katherine. (2014). Características de calidad del agua: Cuenca del Lago de Tota (Laboratorio de Calidad Ambiental) (1<sup>o</sup> ed. 34 pp.). Tunja, Boyacá: CORPOBOYACÁ.

- Gómez, J. & Cadena, M (2017). Validación de las fórmulas de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) para Colombia (Ver.2, 47 p). Bogotá: IDEAM.
- González Morales, Carolina. (2016). *Impactos de la variabilidad climática y las actividades humanas en la dinámica hidrológica del lago de Tota*. (Magister en Ingeniería Ambiental, Trabajo de Grado), Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Guerra Amán, María José (2019). *Estimación de la variabilidad espacial y temporal de la esorrentía en microcuencas de páramos del Ecuador*. (Maestría en Ingeniería Civil – mención Hidráulica, Proyecto de Investigación). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Guevara, Fidel Torres. (2009). Sistema de innovación regional como adaptación al cambio climático y ecoinnovacion en el entorno de los páramos (7 pp.) Lima, Perú: Instituto de Montaña.
- Guio Torres, María Paula, & Rodríguez Rivera, María Fernanda. (2019). *Evaluación de la influencia de descargas difusas en el grado de eutrofización de un cuerpo de agua léntico a través del modelo PLOAD. Caso de estudio Lago de Tota*. (Ingeniero Ambiental y Sanitario, Trabajo de Pregrado), Universidad de La Salle, Bogotá, D.C. Tomado de [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/1178](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1178)
- Gutiérrez Uribe, Mateo. (2016). *Sensibilidad del recurso hídrico en el páramo Romerales ante el cambio climático*. (Magister en Ingeniería de Recursos Hidráulicos, Trabajo de grado), Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Guzmán M., O.; Baldión R., J. V.; Simbaqueva F., O.; Zapata, H. J.; Chacón C., C. (2013). Coeficientes para estimar la radiación solar global a partir del brillo solar en la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé* 64(1): 60-76.
- Hamlet, Alan F., & Lettenmaier, Dennis P. (1999). Effects of climate change on hydrology and water resources in the Columbia River Basin. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6), 1597-1623.
- Henry, J Glynn, & Heinke, Gary W. (1999). *Ingeniería Ambiental* (H. J. Escalona y García Ed y traductor). Ciudad de México, D.C: Pearson Educación.

Hernández Muñoz, Aurelio. (1994). *Depuración de aguas residuales* (3 ed.). Madrid, España: Paraninfo S.A.

Hernández, Esnedy; Aguirre, Néstor; Palacio, Jaime; Ramírez, John Jairo; Duque, Santiago R.; Guisande, Cástor, . . . Mogollón, Martha. (2013). Comparative evaluation of some limnological characteristics of six lentic environments of Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 69(69), 216-228.

Hubbard, Alun L. (1997). Modelling climate, topography and palaeoglacier fluctuations in the Chilean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, 22(1), 79-92.

Hurtado Moreno, G. & Cadena, M (2019). Caracterización climática de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) en Colombia: distribución espacio-temporal, variabilidad interanual y afectación por el fenómeno El Niño oscilación sur (ENOS). (Ver.2, 30 p). Bogotá D.C: IDEAM.

Hurtado, Gonzalo, & González, Olga. (2012). Evaluación de la afectación territorial de los fenómenos El Niño/La Niña y análisis de la confiabilidad de la predicción climática basada en la presencia de un evento. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia*, 38.

Hydrological Engineering Center – HEC. (2018). User's Manual for HEC-HMS V4.4.1. Tomado de: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.4>.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Bogotá, DC: IDEAM.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2011). Promedios climatológicos en Colombia. Periodo 1981 – 2010, 6 pp. Tomado de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2013). Hoja Metodológica Índice de calidad del agua en corrientes superficiales (ICA) (Vers. 1, 12 pp.). Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2014). Determinación de un rango normal para la precipitación - Análisis comparativo entre los umbrales de normalidad (80-120%) y (90-110%) (Vers. 1, 12 pp.). Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2015). *Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Estudio Técnico Completo*. Bogotá, Colombia: UNATINTAMEDIOS.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2016). Formato Común de Hoja Metodológica de Indicadores Ambientales: índice de retención y regulación hídrica (Vers. 1, 16 pp.). Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA (2017). Resumen ejecutivo tercera comunicación nacional de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). Bogotá D.C. Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2018). Documento Metodológico estadísticas de variables meteorológicas (Vers. 2, 112 pp.). Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2019). Estudio Nacional del Agua 2018. M. García Herrán, N. O. Vargas Martínez, O. Jaramillo Rodríguez & J. P. Marín Salazar (Eds.) (1 ed., Vol. 1, 452 pp.). Bogotá. D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2020). Base de Datos Hidroclimatológicos de Colombia. Consultado el 15/12/2019, de IDEAM <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (2012). Mapas Físico - Políticos del territorio colombiano. Escala 1:100.000. Recuperado de: [Mapas Departamentales Físico Políticos | GEOPORTAL \(igac.gov.co\)](http://www.igac.gov.co/geoportal)

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (23 de agosto de 2019). Suelos de la cuenca del Lago de Tota estarán “bajo observación” por casi un mes. *Noticias IGAC*. Recuperado de <https://igac.gov.co/es/noticias/suelos-de-la-cuenca-del-lago-de-tota-estaran-bajo-observacion-por-casi-un-mes>

Instituto Nacional de Salud – INS. (2015-2019). *Estado de la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en Colombia*. Bogotá D.C: INS.

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC

Jacobsen, Dean, & Dudgeon, D. (2008). Tropical high-altitude streams. *Tropical stream ecology*, 219-256.

Jaramillo Robledo, A. (2006). Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé (Colombia)*. 57(4), 288 – 298. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc057\(04\)288-298.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc057(04)288-298.pdf)

Kiely, Gerard. (1999). *Ingeniería Ambiental: Fundamentos, entorno, tecnologías y sistemas de gestión* (1ª ed. Vol. 1). Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U.

León Aristizábal, Gloria (2011). Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala sobre el noroccidente de Suramérica asociada al ciclo ENOS 2009-2010 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Colombia. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia*, 20.

Lizarazo Rincón, Yuliete Milena. (2018). *Análisis hidrológico de la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz y predicción ante escenarios climáticos*. (Magister en Ciencias Ambientales, Trabajo de grado), Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá D.C. recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12010/3401>

- Lizarazo, Yuliete Milena & Peña, David Santiago. (Noviembre de 2019). Análisis hidrológico de la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz y predicción ante escenarios climáticos. En *I Simposio de Investigación, Gestión y Cambio Climático en Ecosistemas de Alta Montaña en Colombia: libro de resúmenes*. Parque Nacional Natural Chingaza. Bogotá D.C, Colombia.
- Llambí, Luis Daniel; Soto, Alejandra; Celleri, Rolando; De Bievre, Bert; Ochoa, Boris, & Borja, Pablo. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos: Proyecto Páramo Andino* (1ª ed.): Proyecto Páramo Andino.
- Manahan, Stanley E. (2007). *Introducción a la Química Ambiental* (I. Mora Leyva, Traductor. 1ª ed. Vol. 1). Ciudad Universitaria, México D.F: Reverté Ediciones.
- Marín Valencia, Valentina (2010). *Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca*. (Pregrado en Ingeniería Civil – Trabajo de Grado). Universidad Pontificia Javeriana, Bogotá D.C.
- Mariño Martínez, J. E., Veloza Franco, J. A. & Martínez Sánchez, A. (2018). Analysis of precipitation and recharge of aquifers in Tota and Ibagué (Colombia) from stable isotopes (18O and 2H). *Revista Facultad de Ingeniería*, 27(47), 61-71. <https://doi.org/10.19053/01211129.v27.n47.2018.7752>.
- Martínez-Austria, Polioptro F., & Patiño-Gómez, Carlos. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 3, 5-20.
- Mateus, María Cristina. (2014). Análisis de la cobertura vegetal, uso del suelo y su impacto en la desecación del Lago de Tota. 18pp. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/11585>.
- McCarl, Bruce A.; Thayer, Anastasia W., & Jones, Jason P. H. (2016). The Challenge of Climate Change Adaptation for Agriculture: An Economically Oriented Review. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 48(4), 321-344.
- Mendoza, Víctor; Villanueva, Elba E; & Adem, Julián. (1997). Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change. *Climate Research*, 09(1-2), 139-145.

Metcalf & Eddy, Inc. (2003). *Wastewater Engineering: treatment and reuse* (4 ed.). Boston: McGraw Hill.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. (2017). *Política Nacional de Cambio Climático: documento para tomadores de decisiones*. Bogotá, D.C: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado de [https://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Politica\\_Nacional\\_de\\_Cambio\\_Climatico\\_-\\_PNCC\\_/PNCC\\_PoliticasyPublicas\\_LIBRO\\_Final\\_Web\\_01.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Politica_Nacional_de_Cambio_Climatico_-_PNCC_/PNCC_PoliticasyPublicas_LIBRO_Final_Web_01.pdf).

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá, D.C: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

Ministerio de la Protección Social – MPS & Ministerio de Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial – MAVDT (2007). *Resolución 2115: Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano*. Bogotá D.C: MPS & MAVDT.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (4 de Octubre de 2019). Minvivienda le cumple a Aquitania con la primera piedra del alcantarillado de aguas lluvias en Aquitania, Boyacá. *Sala de prensa Minvivienda*. Recuperado de <http://www.minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/noticias/2019/octubre/minvivienda-le-cumple-a-aquitania-con-la-primera-piedra-del-alcantarillado-de-aguas-lluvias-en-aquitania-boyaca>

Mojica, Andrea, & Guerrero, Jairo A. (2013). Evaluación del movimiento de plaguicidas hacia la cuenca del Lago de Tota, Colombia. *Revista Colombiana de Química*, 42(2), 29-38. DOI: 42-2-2013\_A\_04

Molnar, P. (2011). "Calibration". *Watershed Modelling*, SS 2011. Suiza: Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich.

Moyano Pérez, Juan Sebastián (2018). *Método de correlación de humedad edáfica en suelos intervenidos forestalmente y protegidos en el páramo de Siscunsi, Boyacá*. (Pregrado en Ingeniería ambiental, Trabajo de Grado). Universidad Santo Tomás, Bogotá D.C, Colombia. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/10663/2018juanmoyano.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

- Muñoz-López, Claudia Liliana; Aranguren-Riaño, Nelson Javier, & Duque, Santiago R. (2017). Morfología funcional del fitoplancton en un lago de alta montaña tropical: Lago de Tota (Boyacá-Colombia). *Revista de Biología Tropical*, 65, 669-683.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1— A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Noriega, Jorge; Castillo, Diana; Vásquez, Andrea, & Monroy, Daniel. (2010). Estudio preliminar del estado de la microcuenca Los Pozos y su posible efecto en un sector de la laguna de Tota, Boyacá-Colombia. *Revista de Tecnología*, 9(2), 150-164.
- Núñez, Lisandro; Triana, Jose Ville; Verdugo, Nelsy; Sopó, Germán, & Martínez, Oscar. (2014). *Informe Batimetría Lago de Tota* (40 pp.). Bogotá, D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Ordúz, R. A. (2018). *Análisis multitemporal del espejo de agua del lago de Tota ubicado en el departamento de Boyacá, para los años 1989, 2001 y 2018*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/17668>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar, capítulo IV. En: *Evapotranspiración del cultivo*, 161-208. Roma, Italia: FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura - UNESCO. (1982). *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América de sur*. Oficina Regional de Ciencias y Tecnología de la UNESCO para América latina y el Caribe. Montevideo. Uruguay: Unesco.
- Organización Meteorológica Mundial (15 de enero de 2020). La Organización Meteorológica Mundial confirma que 2019 fue el segundo año más cálido jamás registrado. *Comunicados de prensa*. Recuperado de: <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/la-organizaci%C3%B3n-meteorol%C3%B3gica-mundial-confirma-que-2019-fue-el-segundo>
- Pedroza-Ramos, A., Caraballo, P., & Aranguren-Riaño, N. (2016). Estructura trófica de los invertebrados acuáticos asociados a *Egeria densa* (Planch. 1849) en el lago de Tota

- (Boyacá-Colombia). *INTROPICA*, 11(1), 21-34. Recuperado a partir de <http://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/intropica/article/view/1858>
- Perico Granados, Néstor; Caro Camargo, Carlos; Acosta, Pedro, & Bohórquez Herrera, Jimena. (2015). *Páramo de Siscunsi, en la Cuenca Alta de la Martinera*. Artículo presentado en Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería, Cartagena, Colombia.
- Plazas Figueroa, Diego Alirio. (2016). *Diseño de medidas de manejo ambiental orientadas a la disminución de los niveles de eutrofización: estudio de caso en la microcuenca del río hatolaguna en el humedal lago de Tota (municipios de Aquitania-Sogamoso, Boyacá)*. (Ingeniero Ambiental, Proyecto de pregrado), Universidad Libre, Bogotá D.C. Colombia.
- Ramos Franco, Alba Luz, & Armenteros Pascual, Dolores. (2019). Interceptación y escorrentía del bosque altoandino en la reserva forestal protectora "El Malmo". *Acta Biológica Colombiana*, 24(1), 97-108. <https://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n1.67039>
- Rhodes, Christopher J. (2016). The 2015 Paris Climate Change Conference: COP21. *Science Progress*, 99(1), 97-104. doi: 10.3184/003685016X14528569315192
- Ribeiro Neto, A; da Paz, Adriano; Marengo, J A; & Chou, S. (2016) Hydrological Processes and Climate Change in Hydrographic Regions of Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, 8, 1103-1127. doi: [10.4236/jwarp.2016.812087](https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.812087).
- Ruiz, Daniel. (2016). Impacts of climate change on biodiversity in the Tropical Andes CLIMATE COMPONENT METHODOLOGY Analysis of AGCMs simulation outputs and reanalysis data. Version: 05/02/2016.
- Ruiz, Daniel; Moreno, Hernán Alonso; Gutiérrez, María Elena, & Zapata, Paula Andrea. (2008). Changing climate and endangered high mountain ecosystems in Colombia. *Science of the Total Environment*, 398(1-3), 122-132. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.02.038>
- Salamanca Reyes, Javier; Botia Becerra, Jorge, & Ardila Vega, Andrea. (2008). *Aves del Páramo de Siscunsi* (Vol. 1). Boyacá: Asociación para la Investigación y Conservación de la Vida Silvestre Neotropical.

- Scharffenberg, William A., & Fleming, Matthew J. (2006). *Hydrologic modeling system HEC-HMS: user's manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Secretaría de Salud de Boyacá. (2012). *Mapa de Riesgo de la Calidad del agua para consumo humano de la Laguna de Tota, Fuente abastecedora del casco urbano de los municipios de Firavitoba y Cúitiva*. Tunja, Boyacá: Programa de calidad de agua para consumo humano.
- Secretaría de Salud de Boyacá. (2013). *Mapa de Riesgo de la Calidad del agua para consumo humano de los nacimientos los Curís y el Vivero, fuente abastecedora del casco urbano del municipio de Aquitania*. Tunja, Boyacá: Programa de calidad de agua para consumo humano.
- Secretaría de Salud de Boyacá. (2016-2019). *Informe de vigilancia de la calidad del agua para consumo humano: Acueductos Rurales*. Tunja, Boyacá: Gobernación de Boyacá.
- Singh, Aparajita. (2018). A concise review on introduction to hydrological models. *Global Research and Development Journal for Engineering*, 3(10), 14-19. [https://www.grdjournals.com/article?paper\\_id=GRDJEV031100020](https://www.grdjournals.com/article?paper_id=GRDJEV031100020)
- Timbe Castro, L., Crespo Sánchez, P., & Cabrera-Balarezo, J. (2019). Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo. *DYNA*, 86(210), 338-344. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.70738>
- Tobón, Conrado de Jesús. (Noviembre de 2019). Ecohidrología del Páramo de Chingaza: Hacia una comprensión de los procesos y su funcionamiento ecohidrológico. En *I Simposio de Investigación, Gestión y Cambio Climático en Ecosistemas de Alta Montaña en Colombia: libro de resúmenes*. Parque Nacional Natural Chingaza. Bogotá D.C, Colombia.
- Torres Romero, S. F. & Proaño Santos, C. O (2018). Componentes del balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 28 (2): 52 – 66. <http://doi.org/10.17163/lgr.n28.2018.04>.
- Turc, L. (1961). Water requirements assessment of irrigation, potential evapotranspiration: simplified and updated climatic formula. *Annales agronomiques* (Vol. 12, pp. 13-49).

- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD. (2016). *Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres 2015 - 2025*. Bogotá D.C: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. Recuperado de <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/756/PNGRD-2016.pdf?sequence=27&isAllowed=y>
- UPTC & CORPOBOYACÁ. (2016). Efecto de variabilidad climática de un ciclo anual sobre el flujo de nutrientes (C, N y P), fuentes y biocaptación en el lago de Tota (UDES-UPTC) (55 pp.). Tunja, Boyacá: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Valencia Leguizamon, Juliana, & Tobón Marín, Conrado. (2017). Influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de cuencas de humedales de alta montaña tropical. *Revista Ecosistemas*, 26(2), 10-17. doi: 10.7818/ECOS.2017.26-2.02
- Vásquez Cerón, Adriana, & Buitrago Castro, Andrea C. (2011). *El gran libro de los páramos*. Bogotá, D.C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humbolt: Proyecto Páramo Andino.
- Weiner, Eugene r. (2013). *Applications of Environmental Aquatic Chemistry* (3ª ed.). Florida, USA: CRC Press.
- Xu, Chong-yu. (1999). Climate change and hydrologic models: A review of existing gaps and recent research developments. *Water Resources Management*, 13(5), 369-382.
- Yates, David N. (1997). Climate change impacts on the hydrologic resources of South America: an annual, continental scale assessment. *Climate Research*, 09(1-2), 147-155.
- Zambrano Vázquez, Raúl Fernando. (2015). Modelación hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano. *Maskana*, 1(1), 79-90.
- Zuluaga Pulgarín, Diana Patricia (2018). *Evaluación de Metodologías de Interpolación de Radiación Solar en Colombia*. (Pregrado en Ingeniería Ambiental – Trabajo de Grado). Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado, Antioquia.

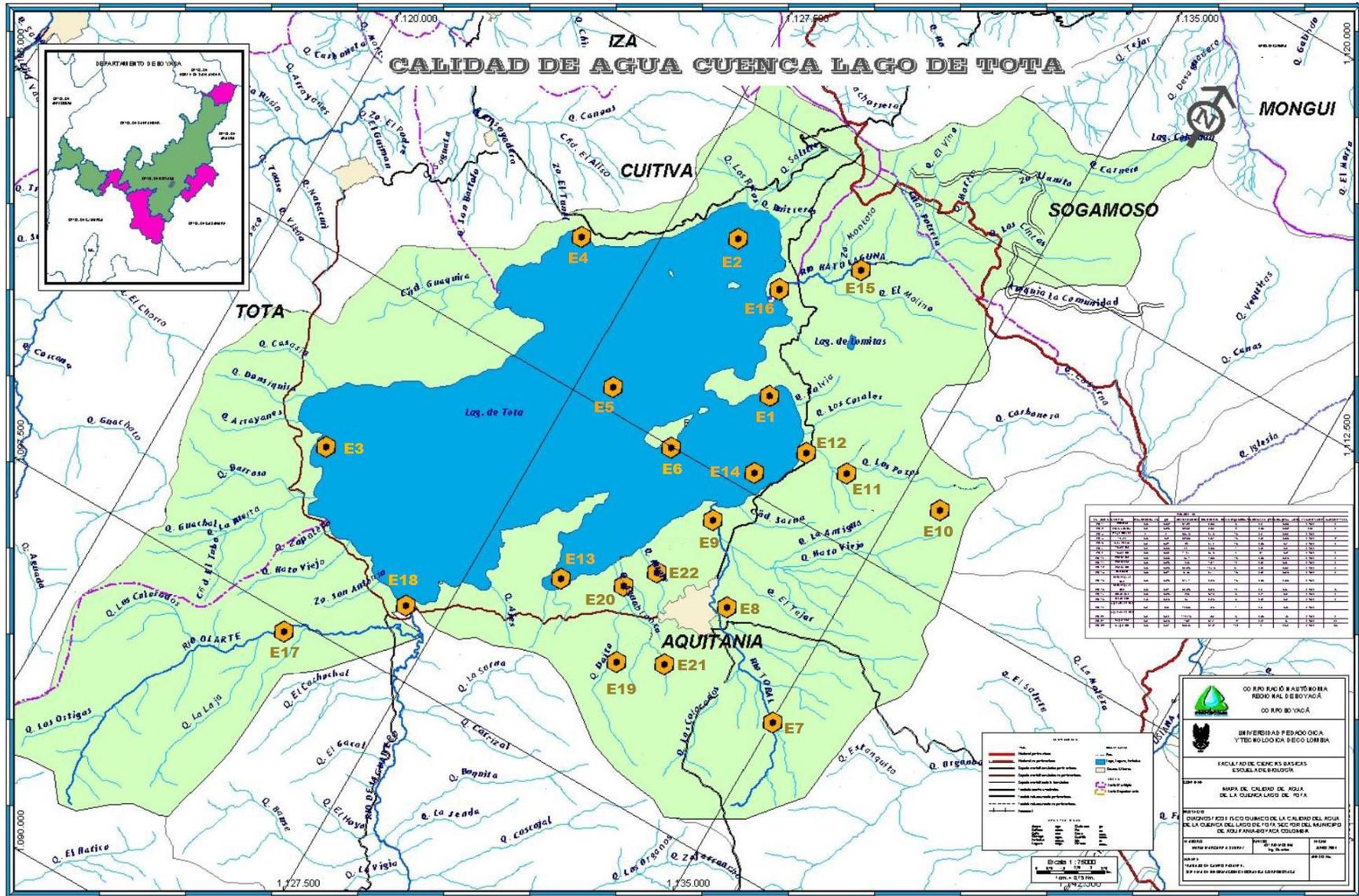
## Anexos

Anexo A. Estaciones red de monitoreo de calidad de agua cuenca del lago de Tota.

ESTACION	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD
E1	PISCICOL	N 5°33'56.5"	W 72°53'47.8"
E2	LLANO A	N 5°35'23.3"	W 72°55'3.4"
E3	PLAYA B	N 5°30'45.3"	W 72°58'5.7"
E4	TUNEL	N 5°34'28.5"	W 72°5'41.5"
E5	CENTRO	N 5°32'40.0"	W 72°55'39.0"
E6	SAN PEDRO	N 5°32'48.9"	W 72°54'30"
E7	TOBAL NACIMIENTO	N 5°9'26.8"	W 72°52'3.8"
E8	TOBAL PARTE MEDIA	N 5°30'44.4"	W 72°51'56.3"
E9	TOBAL DESEMBOCADURA	N 5°32'27.6"	W 72°53'41.1"
E10	POZOS NACIMIENTO	N 5°33'47"	W 72°51'20.3"
E11	POZOS PARTE MEDIA	N 5°33'35.9"	W 72°52'32"
E12	POZOS DESEMBOCADURA	N 5°33'34.6"	W 72°53'4.1"
E13	LA CUSTODIA	N 5°30'47.8"	W 72°54'51.7"
E14	SANTA INES	N 5°32'43"	W 72°53'02"
E15	HATO LAGUNA MEDIO	N 5°35'48"	W 72°53'35.4"
E16	HATO LAGUNA DESEMBOCADURA	N 5°35'6.7"	W 72°54'19.8"
E17	OLARTE PARTE MEDIA	N 5°28'35"	W 72°57'25.6"
E18	OLARTE DESEMBOCADURA	N 5°29'34.8"	W 72°56'18.6"
E19	AGUA BLANCA PARTE MEDIA	N 5°30'15.6"	W 72°53'47.4"
E20	AGUA BLANCA DESEMBOCADURA	N 5°31'5.8"	W 72°54'10.3"
E21	MUGRE PARTE MEDIA	N 5°30'56.4"	W 72°52'59.6"
E22	MUGRE DESEMBOCADURA	N 5°31'25.8"	W 72°53'54.3"

Fuente: Gómez Vianchá, 2014.

Anexo B. Mapa de ubicación estaciones de red de monitoreo de calidad de agua en la cuenca del Lago de Tota.



Fuente: Adaptado de Gómez Vianchá, 2014.

## Anexo C. Datos de precipitación Corregidos

### Estación Toquilla (mm)

AÑO/Mes	ene	feb	mar	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.	anual
1971				20,542	443,000	250,875	394,708	186,208	91,083	187,583	144,000	57,000	1718,000
1972	69,000	21,000	69,708	192,292	212,125	282,750	229,125	124,125	112,875	50,000	74,000	31,000	1277,292
1973	4,000	0,000	16,000	72,000	203,000	148,000	138,000	160,833	232,583	157,583	122,000	12,000	1234,000
1974	6,000	14,000	48,042	103,500	166,458	102,000	149,000	76,125	102,708	62,167	84,000	14,000	845,958
1975	11,000	37,833	44,167	28,500	116,000	139,000	179,125	146,292	89,292	55,708	49,000	87,583	802,917
1976	23,000	7,417	62,583	85,792	121,208	236,000	243,143	194,375	72,333	45,417	93,875	29,000	1092,143
1977	0,000	5,000	14,417	89,583	152,417	206,583	148,417	178,250	133,458	46,875	101,000	6,054	1056,583
1978	7,000	18,000	53,250	146,292	122,875	200,500	122,625	142,708	158,292	101,458	45,708	19,292	1040,458
1979	7,000	7,708	137,292	203,833	125,125	215,292	154,292	153,458	106,417	172,000	150,583	30,000	1281,000
1980	7,000	10,000	10,708	80,292	128,958	180,875	136,875	104,292	107,708	173,250	66,042	20,000	978,292
1981	6,000	21,708	63,292	81,000	174,708	152,250	207,458	127,500	121,583	76,000	46,000	2,000	986,500
1982	12,000	24,000	66,125	87,287	179,554	90,250	144,083	114,292	113,433	33,392	86,683	1,000	848,975
1983	0,000	15,900	55,000	121,296	171,537	120,692	258,679	255,221	158,408	135,692	17,175	12,500	1238,700
1984	13,183	35,829	34,288	62,567	95,342	244,592	247,917	291,917	325,267	86,200	122,700	9,600	1476,500
1985	0,000	7,700	44,121	44,862	192,442	251,267	120,025	130,958	136,583	14,042	64,100	15,200	954,279
1986	2,212	51,287	27,000	130,300	122,650	203,050	246,683	94,117	107,900	160,883	81,817	13,300	1147,400
1987	0,000	19,500	64,500	138,512	153,954	166,433	215,804	182,529	117,167	111,421	83,979	15,600	1169,800
1988	0,000	0,000	19,625	76,742	115,887	146,742	226,904	118,417	191,983	129,108	65,592	21,000	1071,375
1989	10,000	18,800	67,692	69,108	228,196	178,029	232,079	121,108	142,771	93,104	56,913	40,000	1121,308
1990	18,200	35,200	121,400	222,312	204,583	179,637	160,583	165,562	109,562	103,958	90,000	47,042	1236,200
1991	1,458	24,000	65,000	107,817	162,675	130,917	226,750	226,875	130,367	100,317	67,183	13,500	1152,900
1992	0,000	5,100	0,000	139,000	140,000	124,000	296,917	195,000	150,500	49,583	95,500	7,000	1190,500
1993	14,000	28,900	80,500	96,000	156,542	175,758	162,000	174,079	129,796	73,467	118,458	10,000	1086,100
1994	13,000	14,000	33,000	105,062	183,625	243,604	187,417	247,125	116,583	119,937	74,646	6,000	1278,000
1995	7,500	14,000	53,000	94,458	128,750	202,146	124,500	129,208	97,000	76,792	29,146	58,500	882,000
1996	26,500	39,500	112,023	81,800	96,493	124,222	194,457	146,873	100,338	51,734	81,000	33,500	1054,940
1997	40,500	41,500	46,833	64,521	152,833	138,646	297,625	174,854	49,242	70,000	14,146	11,000	961,867
1998	0,000	0,000	0,000	117,000	213,562	333,238	249,207	122,217	87,783	87,700	72,500	129,900	1283,207
1999	69,537	80,463	356,000	323,200	261,600	300,275	208,025	112,092	181,183	130,925	78,675	20,625	1595,975
2000	46,700	58,454	33,646	68,100	104,787	114,013	210,900	291,300	189,500	68,500	71,700	73,200	1118,800
2001	0,000	13,796	30,204	117,100	236,500	106,100	117,900	337,354	152,800	187,662	76,925	26,758	1332,342
2002	11,000	13,100	30,800	71,700	110,000	246,917	162,062	194,521	143,083	67,917	35,000	8,000	1031,200
2003	0,000	0,000	83,500	40,000	173,083	149,917	65,000	55,083	214,542	205,458	116,542	101,375	1019,625
2004	16,000	0,000	60,000	147,083	210,117	195,667	205,333	243,500	149,000	68,000	69,000	11,200	1287,700
2005	69,000	54,200	4,300	144,117	160,183	139,300	137,079	173,521	126,700	194,425	75,575	0,000	1150,900
2006	6,417	3,183	57,100	82,700	173,071	248,262	165,667	167,100	96,700	129,200	117,900	6,200	1180,600
2007	2,500	30,000	40,871	70,829	76,558	229,504	100,029	188,808	104,700	177,000	51,300	18,200	998,729
2008	31,300	14,000	27,400	51,300	125,654	89,946	173,125	222,508	187,867	120,850	90,550	0,000	1061,800
2009	4,600	7,000	30,325	63,675	70,800	166,300	249,100	109,700	44,600	40,800	42,500	0,000	787,475
2010	0,000	42,900	72,100	79,300	100,500	150,625	188,175	91,608	74,642	220,092	82,058	17,600	987,000
2011	5,200	65,042	55,358	132,700	209,787	150,637	161,075	115,137	145,263	124,500	37,800	0,000	1076,900
2012	4,100	28,000	117,271	436,937	210,375	213,187	382,229	194,033	129,467	116,000	64,000	26,800	1746,229
2013	0,000	34,400	38,200	84,008	136,125	161,383	225,850	193,733	145,900	111,500	97,679	50,521	1156,179
2014	14,500	38,358	34,142	98,500	80,912	303,650	289,079	169,158	90,679	118,121	99,000	25,300	1249,100
2015	11,571	16,329	43,000	119,000	175,654	401,129	251,433	232,167	110,650	75,058	73,033	59,975	1438,125
2016	0,000	1,000	42,696	187,408	214,371	193,679	236,625	172,762	151,625	110,150	166,508	37,075	1433,129
2017	79,300	24,700	99,800	99,083	191,017	253,767	235,542	111,854	113,733	87,954	66,250	18,979	1159,200
2018	7,021	17,208	87,533	198,675	88,825	183,037	236,983	219,938	126,525	83,875	40,000	3,000	1177,858

## Estación Potrerito (mm)

Año/Mes	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.	anual
1970	24,300	30,100	14,000	23,000	161,567	86,217	136,517	95,783	87,142	98,175	83,300	6,696	840,100
1971	27,137	28,767	79,150	42,750	167,500	66,550	106,908	84,487	62,683	72,700	46,371	31,100	785,004
1972	49,312	16,288	53,654	159,846	59,100	121,117	69,683	47,267	66,304	47,829	67,900	5,000	758,300
1973	7,800	3,400	38,600	41,600	78,300	41,346	84,771	135,083	111,700	66,000	77,183	32,217	685,783
1974	2,800	14,400	48,708	37,471	63,421	30,700	67,300	56,542	97,012	98,346	48,800	1,600	565,500
1975	2,200	52,729	34,254	70,317	58,771	92,537	75,125	124,633	50,233	117,400	69,450	57,550	747,650
1976	19,200	15,325	106,775	133,013	85,196	79,271	158,729	52,942	45,550	<b>73,996</b>	<b>80,505</b>	<b>29,539</b>	850,501
1977	<b>0,000</b>	<b>4,461</b>	<b>17,752</b>	<b>77,253</b>	<b>120,777</b>	<b>133,917</b>	<b>116,905</b>	<b>116,841</b>	<b>107,103</b>	<b>44,101</b>	<b>109,355</b>	<b>6,054</b>	848,463
1978	1,000	22,600	50,600	147,504	92,808	76,104	61,292	102,887	149,529	105,875	32,708	14,292	842,908
1979	<b>8,166</b>	<b>7,596</b>	<b>132,281</b>	<b>152,743</b>	<b>51,343</b>	<b>180,267</b>	<b>129,491</b>	<b>83,863</b>	<b>46,852</b>	<b>161,914</b>	<b>153,523</b>	<b>33,801</b>	1108,039
1980	12,000	23,000	9,000	93,000	108,958	165,167	180,958	178,708	95,458	119,750	36,000	22,000	1022,000
1981	2,900	25,137	14,463	189,204	168,767	111,729	107,662	73,033	81,704	91,217	32,483	8,596	898,300
1982	26,204	25,100	55,525	187,254	116,212	78,646	84,258	94,342	63,471	56,800	63,492	9,700	851,304
1983	0,000	36,900	40,500	144,412	91,417	41,567	114,475	114,646	75,992	58,000	18,992	15,800	736,900
1984	5,396	24,004	9,500	82,000	42,608	90,792	172,717	125,329	103,292	34,933	94,129	19,300	784,700
1985	8,200	8,900	17,900	85,508	121,992	128,400	91,200	109,200	81,400	64,700	60,600	16,500	778,000
1986	2,696	91,729	28,275	102,013	105,596	95,292	125,904	46,496	94,717	144,083	75,500	6,000	912,300
1987	1,700	11,100	34,300	99,800	133,354	82,346	124,775	70,408	92,162	85,079	50,454	28,321	785,479
1988	0,000	6,800	11,300	40,700	64,575	98,879	101,746	62,925	134,979	125,196	62,300	15,500	709,400
1989	1,900	8,312	75,908	30,179	121,400	109,625	58,458	63,875	67,521	48,562	40,358	51,400	626,100
1990	3,500	38,400	83,700	157,187	94,479	61,258	93,575	84,742	63,683	63,675	81,500	27,171	825,700
1991	8,629	6,500	88,800	75,254	124,167	91,725	113,254	132,604	77,612	93,183	64,800	25,900	876,529
1992	6,300	10,800	9,900	72,200	51,500	57,833	143,275	90,133	75,658	29,200	136,300	18,200	683,100
1993	17,500	35,000	46,100	105,517	158,496	102,700	145,729	73,212	76,725	48,121	74,600	10,000	883,700
1994	22,550	16,850	94,654	81,087	93,512	149,271	101,900	126,767	82,308	124,625	61,975	5,600	955,500
1995	7,371	19,129	53,100	79,183	94,417	124,300	97,679	68,717	55,817	84,296	26,492	73,600	710,500
1996	38,100	23,900	104,833	93,667	95,558	75,942	109,400	<b>108,613</b>	<b>65,755</b>	<b>79,249</b>	61,300	15,500	856,317
1997	44,800	9,700	37,550	71,550	72,800	78,192	129,308	90,362	32,496	29,542	15,225	1,375	611,525
1998	2,300	12,000	59,300	69,025	167,700	141,229	194,146	82,500	83,179	60,921	41,750	53,871	914,050
1999	27,779	72,200	51,100	131,000	93,867	114,017	114,196	58,912	132,508	65,929	63,954	26,617	925,462
2000	30,721	39,579	55,200	32,621	139,425	66,354	75,100	131,100	108,250	87,858	66,892	35,800	833,100
2001	3,200	51,500	24,900	44,025	101,275	73,000	29,033	82,425	106,342	72,842	47,958	60,300	636,500
2002	10,800	10,000	39,500	113,775	76,925	87,579	95,987	119,696	86,738	73,200	16,100	23,800	730,300
2003	<b>0,000</b>	<b>3,027</b>	148,5	<b>49,017</b>	<b>59,130</b>	109,554	137,054	33,208	111,583	104,500	73,483	33,217	829,058
2004	4,800	25,500	47,500	186,550	181,621	62,004	137,275	124,150	61,300	100,500	21,500	13,000	952,700
2005	24,800	44,900	7,500	95,642	97,158	82,800	53,800	<b>140,857</b>	<b>105,655</b>	<b>158,763</b>	<b>87,058</b>	5,700	898,932
2006	17,500	11,000	81,100	110,900	79,758	122,908	35,292	37,042	<b>50,710</b>	133,700	69,800	7,000	749,710
2007	0,000	0,000	23,142	44,958	86,208	144,292	95,600	185,200	89,600	53,700	45,100	5,200	767,800
2008	6,300	4,000	10,400	42,600	95,771	129,462	65,467	82,950	74,167	82,208	206,875	5,200	800,200
2009	12,700	7,000	74,450	44,958	94,292	143,629	67,471	80,500	37,200	5,400	20,200	0,500	587,800
2010	0,000	<b>31,089</b>	12,300	113,300	142,100	112,396	198,004	52,100	17,800	82,600	173,900	34,500	935,589
2011	1,000	59,021	83,479	193,100	270,600	48,700	<b>85,182</b>	37,008	121,092	88,600	52,537	49,163	1040,320
2012	20,600	7,000	44,600	225,250	23,450	82,300	63,200	67,775	57,408	110,088	60,229	15,600	761,900
2013	0,000	36,000	14,400	73,600	101,583	61,187	147,429	83,400	35,112	35,788	97,075	26,425	685,575
2014	27,900	39,212	40,629	50,258	60,267	118,833	99,662	83,438	49,412	87,988	53,300	22,500	710,900
2015	0,000	35,200	28,983	39,117	90,162	143,738	123,979	81,921	<b>91,462</b>	39,467	62,133	14,000	736,162
2016	0,000	0,000	32,671	143,525	75,067	143,738	94,400	68,800	103,937	73,175	108,333	22,954	843,646
2017	70,100	43,450	99,754	83,021	115,775	139,900	95,400	50,271	74,550	31,979	73,100	30,229	877,300
2018	9,571	32,900	43,912	164,042	80,854	111,492	141,587	82,313	54,162	118,138	50,000	0,200	888,971

## Estación Las Cintas (mm)

Año/mes	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.	anual
1971		9,000	127,667	101,333	199,000	87,667	184,333	141,542	99,458	83,083	47,917	40,000	1081,000
1972	100,708	12,792	81,000	251,333	105,667	173,667	120,333	55,083	109,333	36,583	65,125	6,875	1111,625
1973	11,000	4,000	40,000	39,000	52,708	41,292	86,542	118,792	121,667	137,000	107,000	48,000	759,000
1974	10,000	48,000	76,833	101,583	97,583	99,708	129,292	82,000	107,000	106,400	115,000	3,000	973,400
1975	2,000	71,000	11,000	37,000	111,000	147,708	117,417	111,625	90,375	139,875	103,333	124,667	942,333
1976	12,000	13,500	101,000	164,000	88,000	173,792	298,583	147,458	64,083	117,000	69,083	30,000	1248,500
1977	0,000	4,000	25,000	83,250	118,750	97,000	114,125	164,542	106,875	51,458	154,000	13,000	919,000
1978	2,400	27,775	73,042	194,767	123,725	108,317	115,375	133,500	170,058	141,742	51,004	31,296	1141,704
1979	11,500	7,500	128,000	109,100	72,304	253,862	135,733	118,100	65,979	189,021	216,200	47,600	1307,300
1980	4,900	29,700	22,300	109,800	133,837	205,063	228,225	178,275	125,250	20,104	52,146	23,300	1109,600
1981	3,500	40,967	36,533	205,350	189,612	133,138	150,800	109,358	148,142	141,800	37,225	33,300	1196,425
1982	39,975	34,800	87,012	209,437	148,200	120,258	155,254	150,438	95,200	84,950	77,550	46,300	1203,075
1983	11,800	77,800	63,000	145,400	129,929	78,125	208,433	164,662	73,379	68,762	31,721	27,888	1053,012
1984	16,167	31,133	19,400	64,517	64,412	118,771	166,404	189,204	139,104	110,625	102,763	12,700	1022,500
1985	21,800	25,900	72,575	100,625	120,883	101,633	78,283	101,579	116,921	127,567	97,050	35,183	964,817
1986	3,112	73,454	48,433	117,800	94,375	156,533	236,246	90,446	91,792	208,408	87,500	19,700	1208,100
1987	1,800	12,500	71,354	89,087	147,942	134,217	162,954	141,146	108,700	116,083	121,875	58,642	1107,658
1988	1,900	25,400	10,096	79,304	71,058	104,592	182,829	97,058	183,663	227,900	198,600	49,600	1182,400
1989	18,000	7,000	139,587	60,125	165,050	121,354	148,983	67,058	91,529	68,513	63,196	41,304	950,396
1990	6,500	62,854	78,946	204,958	140,350	143,625	190,737	149,750	77,887	119,062	118,529	50,254	1293,200
1991	4,846	17,300	88,500	123,500	110,992	122,567	134,846	236,283	67,913	84,100	140,867	39,533	1131,712
1992	12,800	28,883	14,504	108,213	90,300	89,500	240,158	176,342	115,200	35,100	165,125	23,675	1076,125
1993	36,562	28,238	57,642	120,675	198,612	184,679	230,625	98,783	89,458	98,808	93,200	7,517	1237,283
1994	41,462	42,238	78,279	82,379	119,804	140,571	263,717	194,246	124,604	128,150	85,450	7,600	1300,900
1995	6,700	16,500	92,300	69,733	99,950	139,817	171,242	107,254	36,137	43,067	25,300	64,500	808,000
1996	65,271	33,129	103,383	75,492	72,633	114,642	263,504	135,546	92,600	98,900	91,671	37,529	1146,771
1997	36,800	23,400	91,254	70,717	106,671	138,142	287,729	143,425	44,612	41,150	30,200	4,000	1014,100
1998	3,239	16,899	88,300	97,205	218,512	230,917	229,987	144,154	90,683	66,446	49,012	89,788	1118,012
1999	46,271	92,129	56,900	153,908	112,650	125,292	154,858	119,108	181,171	109,450	83,217	28,346	1234,954
2000	54,667	83,033	59,900	51,458	133,346	81,296	120,600	199,517	132,683	116,883	78,012	51,904	1111,396
2001	0,000	35,742	30,858	34,700	99,600	149,050	128,512	166,371	131,367	67,333	81,133	65,133	924,667
2002	7,900	29,200	30,371	113,542	107,637	283,354	169,850	176,287	70,558	67,800	41,500	28,400	1098,000
2003	0,000	5,612	100,888	69,029	83,271	89,312	268,708	56,804	116,029	170,212	75,667	33,567	1035,533
2004	2,900	35,583	44,417	179,862	164,696	171,204	170,796	223,296	122,325	122,833	82,488	33,000	1320,400
2005	37,300	37,600	20,371	136,429	204,400	123,100	100,100	142,400	110,000	128,300	122,600	27,000	1162,600
2006	42,800	15,400	82,454	185,692	138,617	173,737	164,183	154,917	71,412	143,762	94,425	39,100	1267,400
2007	4,000	14,400	32,821	78,021	141,329	206,333	104,967	239,079	89,225	169,617	77,608	42,000	1157,400
2008	42,400	45,100	46,108	74,446	184,492	134,779	128,412	112,421	94,617	111,712	163,413	23,200	1137,900
2009	55,200	13,912	60,308	55,550	109,529	189,487	106,454	163,358	48,000	74,621	52,479	14,100	928,900
2010	0,300	21,000	71,912	241,688	156,883	189,429	187,354	109,496	75,021	163,817	165,642	74,658	1382,542
2011	9,200	174,125	115,075	212,592	202,754	129,296	119,958	143,042	123,829	235,829	151,146	51,154	1616,846
2012	75,100	9,300	109,525	337,300	68,700	130,096	250,908	184,654	69,817	143,400	69,483	16,217	1448,283
2013	0,200	59,200	34,171	115,229	145,854	72,487	221,125	130,433	66,925	76,375	146,725	19,775	1068,725
2014	42,100	53,554	48,267	42,879	67,646	233,487	198,883	122,325	95,150	124,021	90,971	74,417	1119,283
2015	16,754	34,846	60,400	59,000	128,829	366,412	217,112	180,412	94,329	45,850	87,579	40,375	1291,525
2016	2,300	5,900	38,817	197,271	112,725	126,554	207,975	117,129	129,171	94,925	195,425	51,008	1228,192
2017	71,200	79,900	78,496	80,671	152,858	200,183	248,263	98,908	112,200	62,942	106,171	58,392	1291,792
2018	10,617	10,367	82,021	226,404	77,646	208,775	164,750	156,438	60,100	147,500	55,400	0,400	1200,017

## Estación Guamo de Sisbacá (mm)

Año/mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1984	17,576	10,000	11,000	108,542	98,583	261,875	308,267	308,537	196,550	52,467	98,479	11,500	1483,376
1985	7,500	12,904	72,187	82,008	175,171	367,379	231,346	304,342	152,512	60,750	90,208	14,746	1571,054
1986	15,000	102,800	38,500	196,746	213,792	287,708	299,850	142,550	186,383	182,917	94,400	40,300	1800,946
1987	9,300	48,200	84,200	167,096	244,804	242,200	286,858	258,658	225,167	209,362	112,700	57,254	1945,800
1988	0,000	5,400	26,165	102,314	154,504	195,640	302,514	157,876	255,957	172,130	87,448	27,998	1487,945
1989	15,262	27,854	148,350	43,533	221,500	174,842	168,112	205,204	145,721	144,321	82,825	22,775	1400,300
1990	19,117	51,083	120,642	210,737	256,204	177,117	251,954	187,312	178,600	140,267	115,467	39,433	1747,933
1991	3,167	18,654	83,346	121,250	194,533	197,092	256,304	278,304	175,742	169,475	122,000	10,200	1630,067
1992	12,896	20,512	10,392	104,400	167,733	214,467	479,525	190,171	185,446	98,958	64,400	4,900	1553,800
1993	34,154	14,646	65,700	142,912	273,196	229,733	292,850	212,708	273,850	119,629	110,971	11,450	1781,800
1994	23,300	28,400	69,758	144,325	220,525	301,329	295,779	304,671	160,621	130,400	84,992	26,200	1790,300
1995	16,200	1,500	96,400	116,792	160,833	210,612	177,071	166,667	137,942	68,525	45,858	60,600	1259,000
1996	33,312	73,367	71,637	120,187	166,679	264,983	312,292	212,867	183,475	120,650	80,200	30,000	1669,650
1997	20,100	32,900	90,525	91,717	188,667	139,992	321,517	239,358	92,267	65,158	38,254	10,946	1331,400
1998	3,342	15,858	72,517	165,633	311,183	313,192	368,092	135,767	180,583	115,733	74,517	49,308	1805,725
1999	35,517	67,942	62,929	216,004	180,142	203,721	316,187	148,533	233,567	169,383	121,217	46,833	1801,975
2000	38,958	46,925	83,017	68,775	222,100	157,042	213,783	263,142	176,792	199,192	84,092	90,483	1644,300
2001	7,200	48,408	50,033	65,017	202,875	202,292	203,354	208,587	180,217	177,742	116,075	26,000	1487,800
2002	7,000	8,400	69,583	135,525	164,417	280,317	139,746	237,921	158,492	47,200	31,200	23,742	1303,542
2003	1,200	7,058	55,446	183,950	154,337	218,292	158,354	199,987	132,733	57,000	4,200	2,900	1175,458
2004	0,000	0,100	1,012	24,562	311,000	122,742	131,800	323,583	157,167	94,542	81,092	9,900	1257,500
2005	18,762	59,438	7,779	170,483	220,146	217,792	166,725	233,525	161,575	189,658	93,617	5,400	1544,900
2006	22,296	8,587	67,442	114,575	168,246	107,817	79,558	144,708	65,833	128,196	32,029	54,667	993,955
2007	66,017	62,462	140,046	60,446	106,100	146,946	107,542	220,033	128,750	127,400	94,850	17,000	1277,592
2008	32,347	13,700	28,333	53,016	125,978	96,835	174,964	151,918	276,139	106,446	112,027	0,000	1171,702
2009	4,754	52,042	94,725	61,033	129,225	181,633	141,112	74,737	69,192	42,165	43,922	2,600	897,141
2010	6,600	19,525	61,500	101,800	166,875	197,575	271,642	209,942	173,000	167,942	55,717	21,983	1454,100
2011	5,374	32,850	109,875	207,042	109,796	126,396	111,858	106,000	89,133	147,667	116,700	79,317	1242,007
2012	44,833	20,675	106,308	203,667	158,900	131,000	156,150	235,533	140,425	94,475	33,300	0,000	1325,267
2013	3,000	0,142	11,658	37,775	132,092	175,417	129,758	126,975	162,600	72,750	76,017	55,842	984,025
2014	6,375	81,558	54,000	87,054	194,829	253,292	241,025	151,867	176,308	119,167	55,808	38,892	1460,175
2015	2,108	17,892	70,454	123,046	218,875	302,704	201,154	191,025	137,658	85,008	88,483	63,271	1501,679
2016	1,021	6,800	30,342	154,208	125,329	163,337	180,900	129,433	161,329	118,879	215,350	22,692	1309,621
2017	36,700	35,500	156,179	120,171	216,167	288,283	232,379	150,837	124,267	124,729	71,988	15,996	1573,196
2018	36,804	40,654	42,096	171,433	176,850	201,200	170,000	168,317	93,767	140,408	57,875	29,000	1328,404

## Anexo D. Datos de caudal Corregidos

### Estación Hato Laguna (caudal – m<sup>3</sup>/s)

Año/mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	medio anual
1971		0,44	0,504	0,328	1,47	1,205	1,176	0,964	0,897	0,512	0,382	0,207	0,735
1972	0,263	0,183	0,207	0,973	0,978	0,835	0,944	0,248	0,305	0,143	0,156	0,077	0,443
1973	0,068	0,120	0,094	0,112	0,153	0,116	0,163	0,179	0,670	0,465	0,535	0,328	0,250
1974	0,111	0,107	0,105	0,075	0,283	0,177	0,258	0,229	0,325	0,149	0,229	0,076	0,177
1975	0,052	0,080	0,079	0,066	0,126	0,426	0,434	0,542	0,464	0,554	0,832	1,014	0,389
1976	0,229	0,118	0,157	0,430	0,531	1,086	1,915	1,207	0,313	0,533	0,583	0,292	0,616
1977	0,130	0,109	0,110	0,128	0,186	0,258	0,315	0,568	0,404	0,255	0,640	0,110	0,268
1978	0,369	0,369	0,271	0,614	0,428	0,835	0,706	1,265	1,050	0,869	0,438	0,214	0,619
1979	0,063	0,083	0,255	0,468	0,317	1,201	0,866	0,790	0,349	1,069	1,912	0,587	0,663
1980	0,184	0,111	0,085	0,253	0,267	0,843	1,287	1,025	0,748	0,720	0,327	0,134	0,499
1981	0,189	0,194	0,183	0,556	1,033	0,886	0,941	0,638	1,161	1,023	0,380	0,068	0,604
1982	0,166	0,088	0,074	0,321	0,610	0,320	0,822	0,849	0,460	0,344	0,222	0,270	0,379
1983	0,101	0,112	0,097	0,215	0,908	0,544	1,064	1,224	0,470	0,485	0,444	0,071	0,478
1984	0,059	0,054	0,053	0,054	0,055	0,241	0,621	0,987	1,005	0,566	0,848	0,149	0,391
1985	0,211	0,130	0,226	0,208	0,339	0,362	0,244	0,202	0,257	0,319	0,188	0,154	0,237
1986	0,072	0,088	0,110	0,071	0,134	0,359	0,851	0,504	0,299	1,388	0,928	0,613	0,451
1987	0,067	0,063	0,071	0,100	0,593	0,757	1,203	1,009	0,660	0,606	0,315	0,218	0,472
1988	0,212	0,093	0,072	0,134	0,084	0,179	0,681	0,370	1,095	1,690	1,741	0,230	0,548
1989	0,169	0,126	0,179	0,166	0,230	0,326	0,382	0,182	0,175	0,167	0,138	0,132	0,198
1990	0,308	0,324	0,354	1,084	1,043	0,550	0,743	1,380	0,472	0,348	0,728	0,473	0,651
1991	0,129	0,104	0,173	0,227	0,305	0,395	0,846	1,740	0,622	0,403	0,544	0,301	0,482
1992	0,071	0,055	0,047	0,096	0,082	0,109	0,763	0,947	1,011	0,237	0,645	0,391	0,371
1993	0,055	0,057	0,037	0,147	1,010	1,155	0,845	0,841	0,670	0,411	0,689	0,209	0,511
1994	0,124	0,124	0,110	0,140	0,155	0,420	0,790	1,446	1,039	0,664	0,719	0,366	0,508
1995	0,134	0,093	0,136	0,180	0,247	0,472	0,551	0,563	0,340	0,173	0,136	0,126	0,263
1996	0,098	0,093	0,208	0,203	0,247	0,452	2,359	1,555	1,148	1,051	0,673	0,380	0,706
1997	0,148	0,147	0,124	0,239	0,225	0,359	2,108	1,860	0,309	0,194	0,159	0,101	0,498
1998	0,093	0,103	0,105	0,153	0,756	1,149	1,868	1,485	0,727	0,366	0,360	0,322	0,624
1999	0,252	0,244	0,200	0,600	0,400	0,477	0,578	0,908	1,569	0,700	0,595	0,322	0,570
2000	0,203	0,244	0,200	0,258	0,400	0,400	0,635	1,252	0,876	0,799	1,268	0,309	0,570
2001	0,220	0,200	0,200	0,131	0,183	0,439	0,600	1,260	0,876	0,400	0,500	0,269	0,440
2002	0,200	0,200	0,185	0,300	0,300	2,200	1,794	2,700	0,600	0,396	0,374	0,219	0,789
2003	0,163	0,172	0,318	0,234	0,179	0,201	1,145	0,926	0,351	0,948	0,791	0,326	0,480
2004	0,139	0,129	0,125	0,278	0,793	0,665	0,859	1,492	0,880	0,301	0,805	0,264	0,561
2005	0,195	0,161	0,140	0,187	0,586	0,436	0,330	0,377	0,516	1,012	0,519	0,245	0,392
2006	0,172	0,145	0,200	0,315	0,861	0,893	1,419	1,069	0,462	0,593	0,617	0,295	0,587
2007	0,418	0,407	0,410	0,350	0,376	0,601	0,668	0,912	0,676	0,635	0,816	0,356	0,552
2008	0,317	0,333	0,307	0,306	0,565	0,570	0,556	0,551	0,482	0,499	0,840	0,380	0,476
2009	0,382	0,220	0,168	0,166	0,222	0,258	0,331	0,329	0,237	0,197	0,260	0,192	0,247
2010	0,197	0,180	0,163	0,340	0,494	0,473	0,618	0,371	0,283	0,460	0,636	0,345	0,380
2011	0,416	0,679	0,877	1,546	1,565	1,054	0,779	0,766	1,017	2,293	1,566	1,138	1,141
2012	0,350	0,322	0,349	1,771	0,449	0,474	1,132	1,647	0,893	0,665	0,324	0,253	0,719
2013	0,224	0,241	0,236	0,257	0,520	0,253	0,635	0,416	0,318	0,274	0,281	0,233	0,324
2014	0,218	0,203	0,206	0,188	0,201	0,681	0,905	0,485	0,304	0,432	0,317	0,342	0,374
2015	0,184	0,225	0,214	0,170	0,217	2,023	1,542	1,332	0,639	0,177	0,288	0,178	0,599
2016	0,193	0,037	0,048	0,222	1,022	0,614	0,792	1,070	0,514	0,748	0,492	0,993	0,562
2017	0,281	0,134	0,221	0,253	1,036	2,724	3,212	1,347	1,012	0,469	0,584	0,288	0,963
2018	0,194	0,151	0,190	1,484	0,599	1,542	1,096	1,633	0,432	0,945	0,379	0,199	0,737

## Estación Criadero (Caudal m<sup>3</sup>/s)

año/mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Medio anual
1971				0,404	0,181	0,145	0,506	0,312	0,236	0,183	0,150	0,155	0,252
1972	0,150	0,140	0,140	0,220	0,280	0,320	0,360	0,290	0,280	0,190	0,210	0,130	0,226
1973	0,127	0,125	0,115	0,087	0,111	0,111	0,262	0,219	0,291	0,242	0,223	0,140	0,171
1974	0,139	0,129	0,145	0,098	0,170	0,164	0,249	0,191	0,262	0,158	0,210	0,165	0,173
1975	0,152	0,162	0,153	0,170	0,169	0,345	0,179	0,228	0,204	0,243	0,176	0,243	0,202
1976	0,132	0,119	0,169	0,296	0,371	0,434	0,920	1,178	0,325	0,277	0,675	0,048	0,412
1977	0,042	0,022	0,031	0,164	0,278	0,608	0,351	0,923	0,350	0,130	0,891	0,084	0,323
1978	0,181	0,159	0,247	0,744	0,791	0,428	0,415	1,335	0,814	0,644	0,070	0,039	0,489
1979	0,004	0,016	0,310	0,455	0,311	1,191	0,781	0,754	0,227	1,562	1,628	0,268	0,626
1980	0,059	0,102	0,111	0,996	0,799	1,811	1,359	1,213	0,466	0,831	0,187	0,047	0,665
1981	0,041	0,153	0,037	1,158	0,721	0,878	0,905	0,635	1,168	0,511	0,141	0,039	0,532
1982	0,136	0,055	0,100	0,767	1,160	0,635	1,619	1,449	0,279	0,164	0,085	0,054	0,542
1983	0,058	0,112	0,267	0,125	0,557	0,350	0,833	0,767	0,250	0,228	0,097	0,124	0,314
1984	0,018	0,012	0,029	0,043	0,033	0,199	0,567	1,300	0,714	0,282	0,216	0,054	0,289
1985	0,013	0,008	0,013	0,031	0,315	0,753	0,294	0,168	0,387	0,379	0,195	0,097	0,221
1986	0,092	0,103	0,126	0,067	0,087	0,658	0,881	0,353	0,380	0,399	0,273	0,096	0,293
1987	0,024	0,023	0,025	0,036	0,438	0,555	0,427	0,358	0,235	0,216	0,113	0,078	0,211
1988	0,081	0,090	0,072	0,071	0,072	0,178	0,433	0,118	0,112	0,429	0,260	0,122	0,170
1989	0,088	0,106	0,099	0,086	0,314	0,334	0,469	0,148	0,110	0,092	0,069	0,069	0,165
1990	0,059	0,079	0,146	0,259	0,364	0,214	0,293	0,296	0,130	0,157	0,132	0,125	0,188
1991	0,024	0,060	0,148	0,198	0,109	0,139	0,334	0,229	0,118	0,095	0,087	0,056	0,133
1992	0,047	0,044	0,049	0,059	0,044	0,040	0,163	0,154	0,120	0,068	0,089	0,062	0,078
1993	0,042	0,053	0,061	0,088	0,145	0,392	0,338	0,300	0,198	0,065	0,087	0,054	0,152
1994	0,087	0,101	0,091	0,065	0,232	0,359	0,628	0,578	0,287	0,292	0,185	0,075	0,248
1995	0,121	0,124	0,085	0,087	0,156	0,118	0,574	0,089	0,063	0,054	0,023	0,020	0,126
1996	0,022	0,021	0,060	0,040	0,027	0,297	0,634	0,147	0,145	0,177	0,223	0,093	0,157
1997	0,064	0,065	0,043	0,069	0,325	0,118	1,022	0,454	0,187	0,265	0,015	0,013	0,220
1998	0,015	0,011	0,022	0,022	0,051	0,772	0,456	0,020	0,019	0,099	0,094	0,077	0,138
1999	0,152	0,098	0,075	0,085	0,090	0,197	0,160	0,238	0,367	0,174	0,180	0,142	0,163
2000	0,148	0,139	0,143	0,138	0,214	0,173	0,543	1,249	1,042	0,261	0,990	0,146	0,432
2001	0,123	0,127	0,138	0,150	0,196	0,441	0,439	0,519	0,408	0,176	0,280	0,278	0,273
2002	0,161	0,228	0,108	0,340	0,196	1,172	0,500	1,353	0,254	0,186	0,205	0,288	0,416
2003	0,185	0,184	0,210	0,122	0,236	0,170	1,177	0,474	0,316	0,220	0,201	0,547	0,337
2004	0,159	0,185	0,255	0,180	0,267	0,479	0,478	0,657	0,371	0,223	0,179	0,116	0,296
2005	0,047	0,071	0,101	0,055	0,255	0,384	0,250	0,198	0,227	0,276	0,435	0,317	0,218
2006	0,091	0,062	0,067	0,139	0,344	0,271	0,543	0,423	0,209	0,239	0,242	0,067	0,225
2007	0,039	0,052	0,047	0,048	0,050	0,208	0,193	0,647	0,296	0,340	0,181	0,061	0,180
2008	0,053	0,042	0,052	0,038	0,073	0,212	0,321	0,162	0,231	0,109	0,388	0,196	0,156
2009	0,035	0,028	0,027	0,031	0,051	0,281	0,297	0,260	0,097	0,053	0,053	0,027	0,103
2010	0,021	0,026	0,078	0,067	0,031	0,211	0,379	0,134	0,061	0,220	0,534	0,452	0,185
2011	0,149	0,142	0,051	0,392	0,783	0,699	0,812	0,658	0,070	0,851	0,567	0,274	0,454
2012	0,252	0,056	0,021	0,232	0,245	0,240	0,427	0,508	0,500	0,378	0,297	0,237	0,283
2013	0,212	0,234	0,162	0,016	0,014	0,020	0,174	0,139	0,143	0,064	0,047	0,029	0,105
2014	0,032	0,031	0,038	0,037	0,038	0,177	0,244	0,143	0,135	0,108	0,071	0,042	0,091
2015	0,031	0,032	0,031	0,037	0,041	0,336	0,268	0,310	0,253	0,198	0,184	0,139	0,155
2016	0,069	0,027	0,038	0,063	0,413	0,327	0,390	0,227	0,166	0,184	0,132	0,211	0,187
2017	0,076	0,045	0,049	0,054	0,157	0,378	0,352	0,177	0,132	0,100	0,099	0,038	0,138
2018	0,033	0,038	0,065	0,111	0,104	0,194	0,196	0,200	0,078	0,094	0,049	0,036	0,100

## Estación Desaguadero (Caudal m<sup>3</sup>/s)

año/mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	medio anual
1970	0,176	0,198	0,092	0,129	0,733	1,012	1,965	1,270	0,960	0,765	0,560	0,250	0,676
1971	0,186	0,156	0,137	0,331	1,215	0,840	1,346	1,054	0,753	0,620	0,319	0,129	0,591
1972	0,485	0,153	0,197	1,508	1,204	2,231	2,167	0,808	1,537	0,354	0,329	0,086	0,922
1973	0,067	0,058	0,049	0,062	0,225	0,250	0,637	0,760	1,506	0,885	0,979	0,475	0,496
1974	0,111	0,097	0,095	0,092	0,488	0,363	0,818	1,016	1,183	0,701	0,677	0,162	0,484
1975	0,043	0,053	0,049	0,141	0,430	0,920	0,677	1,555	1,020	1,164	1,000	0,673	0,644
1976	0,172	0,140	0,170	0,379	0,975	0,144	1,944	0,808	0,138	0,159	0,563	0,313	0,492
1977	0,107	0,065	0,057	0,117	0,713	0,583	0,709	0,990	0,758	0,573	0,658	0,117	0,454
1978	0,073	0,044	0,031	0,408	0,487	0,820	0,510	1,156	1,165	1,104	0,516	0,203	0,543
1979	0,076	0,063	0,083	0,303	0,468	1,106	1,150	0,885	0,552	1,090	1,158	0,658	0,633
1980	0,325	0,194	0,127	0,233	0,708	1,371	1,353	1,404	1,274	1,359	0,670	0,327	0,779
1981	0,218	0,151	0,132	0,376	1,995	1,771	1,576	1,156	1,001	0,578	0,294	0,111	0,780
1982	0,105	0,057	0,065	0,240	0,670	0,861	1,062	0,934	0,597	0,353	0,259	0,110	0,443
1983	0,090	0,099	0,151	0,493	0,930	0,784	1,177	2,072	0,874	0,698	0,245	0,140	0,646
1984	0,307	0,209	0,053	0,085	0,175	0,879	1,552	1,476	1,177	0,358	0,637	0,217	0,594
1985	0,099	0,071	0,059	0,116	0,474	1,387	1,051	1,179	0,703	0,466	0,518	0,381	0,542
1986	0,122	0,126	0,217	0,549	0,677	1,699	2,775	1,818	0,752	1,960	0,719	0,219	0,969
1987	0,073	0,069	0,078	0,110	1,343	1,701	1,308	1,099	0,721	0,662	0,345	0,239	0,646
1988	0,169	0,081	0,120	0,189	0,114	0,712	1,349	0,793	1,717	0,951	0,816	0,283	0,608
1989	0,143	0,086	0,157	0,128	0,553	0,816	0,905	0,571	0,425	0,566	0,347	0,185	0,407
1990	0,100	0,089	0,162	0,516	1,285	0,949	0,933	1,211	0,638	0,378	0,516	0,290	0,589
1991	0,734	0,212	0,315	0,453	0,487	0,795	1,493	1,900	1,085	0,746	0,668	0,298	0,766
1992	0,120	0,094	0,077	0,137	0,275	0,824	0,989	1,511	0,915	0,575	0,546	0,528	0,549
1993	0,310	0,161	0,084	0,152	0,747	1,036	0,858	0,790	0,812	0,647	0,535	0,323	0,538
1994	0,174	0,155	0,162	0,218	0,892	1,650	3,170	2,459	0,715	0,583	0,294	0,102	0,881
1995	0,154	0,230	0,223	0,261	0,558	0,767	0,769	0,637	0,669	0,452	0,185	0,126	0,419
1996	0,058	0,045	0,180	0,282	0,568	0,504	1,601	1,516	1,455	1,175	0,654	0,494	0,711
1997	0,339	0,170	0,144	0,205	0,084	0,053	2,848	1,941	0,699	0,490	0,258	0,148	0,615
1998	0,090	0,050	0,060	0,180	1,300	1,940	4,870	2,240	1,400	0,220	0,160	0,070	1,048
1999	0,020	0,040	0,180	0,620	0,780	1,030	2,800	3,360	2,750	0,970	0,620	0,710	1,157
2000	0,130	0,102	0,073	0,073	0,657	0,870	1,207	1,856	1,887	1,242	1,541	0,229	0,822
2001	0,081	0,061	0,035	0,029	0,309	0,673	0,880	2,299	1,057	0,904	1,117	0,700	0,679
2002	0,463	0,108	0,100	0,235	0,481	2,016	0,895	1,995	1,280	0,568	0,200	0,351	0,724
2003	0,276	0,113	0,072	0,451	1,236	1,104	2,510	1,166	1,450	0,714	0,911	0,389	0,866
2004	0,201	0,171	0,124	0,459	1,537	1,624	1,458	3,946	1,511	0,565	0,624	0,215	1,036
2005	0,177	0,187	0,112	0,183	0,778	1,151	1,291	1,877	0,907	0,457	0,323	0,145	0,632
2006	0,100	0,094	0,112	0,224	0,343	1,139	2,050	1,483	0,474	0,710	0,756	0,287	0,648
2007	0,172	0,126	0,128	0,182	0,401	1,342	1,355	4,592	1,091	0,529	0,416	0,242	0,881
2008	0,219	0,189	0,086	0,059	0,838	0,350	0,232	0,187	0,185	0,142	0,193	0,092	0,231
2009	0,060	0,048	0,072	0,079	0,333	0,527	0,338	0,382	0,186	0,184	0,201	0,092	0,209
2010	0,078	0,074	0,078	0,163	0,301	0,330	0,840	0,195	0,214	0,192	0,706	0,272	0,287
2011	0,135	0,128	0,281	0,984	1,346	0,890	0,686	0,615	2,426	1,660	1,040	0,858	0,921
2012	0,392	0,248	0,296	0,380	1,943	1,308	0,920	1,540	1,233	0,936	0,664	0,260	0,844
2013	0,182	0,132	0,114	0,170	0,464	0,536	1,227	1,336	0,874	1,072	0,496	0,528	0,594
2014	0,231	0,188	0,182	0,167	0,237	0,357	1,217	0,841	0,730	0,408	0,541	0,578	0,473
2015	0,111	0,078	0,192	0,176	0,242	0,793	1,568	1,656	0,818	0,594	0,336	0,325	0,574
2016	0,173	0,079	0,038	0,110	0,926	0,633	1,607	1,626	0,768	0,663	0,494	0,914	0,669
2017	0,201	0,142	0,217	0,167	0,318	0,748	1,405	1,084	0,647	0,266	0,231	0,083	0,459
2018	0,042	0,036	0,023	0,341	0,301	0,699	0,763	0,870	0,535	0,628	0,436	0,133	0,401

## Anexo E. Temperaturas corregidas estaciones El túnel y Aquitania (°C)

Año/mes	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.	media anual
1979	11,4	11,9	11,6	11,9	11,9	11,2	10,3	10,5	11,1	11,0	11,4	11,5	11,3
1980	11,2	11,8	11,6	12,3	12,0	11,4	10,7	10,9	11,1	11,3	11,7	12,1	11,5
1981	11,7	11,9	11,4	12,0	12,0	11,0	10,5	10,5	10,8	11,0	11,4	11,3	11,3
1982	11,4	12,2	11,9	12,2	11,7	10,8	10,2	10,4	10,9	11,0	11,4	12,1	11,4
1983	12,6	12,6	13,1	12,4	12,1	11,7	11,0	10,8	10,9	11,1	11,9	10,9	11,8
1984	10,9	11,3	11,9	11,9	11,8	11,2	10,7	10,4	10,7	11,2	11,0	11,6	11,2
1985	11,6	10,8	11,6	11,4	11,5	10,7	10,1	10,6	10,8	11,2	11,3	11,5	11,1
1986	11,5	11,4	11,3	11,8	11,7	11,0	10,1	10,8	10,6	11,1	11,6	11,4	11,2
1987	12,1	12,1	12,3	12,4	12,1	11,5	11,5	11,5	11,6	11,9	12,2	12,1	12,0
1988	11,9	12,5	12,3	12,6	12,2	11,5	11,1	11,1	10,9	11,0	11,8	11,7	11,7
1989	11,3	11,4	11,1	11,8	11,1	11,2	10,9	10,9	11,1	11,2	12,0	11,9	11,3
1990	11,5	12,1	11,7	11,7	11,9	11,1	10,5	10,5	10,9	11,3	11,6	11,7	11,4
1991	11,8	12,1	11,5	11,6	12,2	11,9	11,2	10,4	10,7	10,2	11,6	11,8	11,4
1992	11,6	12,2	12,3	12,4	12,0	11,3	10,4	10,5	10,5	10,7	11,5	11,5	11,4
1993	11,3	11,4	11,3	11,7	11,8	11,3	10,7	10,5	10,9	11,1	12,0	11,7	11,3
1994	11,5	11,4	11,9	11,5	11,5	11,4	10,5	10,7	11,3	11,3	11,5	12,1	11,4
1995	11,9	12,0	12,0	12,5	12,0	11,8	11,2	10,6	11,2	11,6	11,6	11,8	11,7
1996	11,3	11,4	11,5	11,7	11,6	11,5	10,6	10,6	11,2	11,7	11,4	11,5	11,3
1997	11,2	11,5	12,0	11,9	11,8	11,6	10,7	10,9	11,8	12,0	12,7	12,0	11,7
1998	12,2	13,2	13,0	13,3	12,6	11,7	11,3	11,4	11,5	12,1	12,3	12,1	12,2
1999	11,9	11,6	11,5	11,8	11,2	11,4	10,7	10,5	10,8	11,3	12,5	12,1	11,4
2000	11,6	11,5	11,6	11,7	11,6	11,7	10,9	10,4	11,1	11,3	11,7	11,5	11,4
2001	10,8	11,5	11,5	12,1	11,9	11,6	11,0	11,1	11,5	11,7	11,6	11,4	11,5
2002	11,2	11,7	12,0	12,4	12,1	12,3	11,0	11,3	11,3	11,5	11,4	11,9	11,7
2003	11,4	12,0	11,8	12,3	11,9	11,8	11,6	11,4	11,2	12,1	12,2	11,8	11,8
2004	10,9	11,7	11,3	12,1	12,6	12,1	11,7	11,8	11,8	12,3	12,2	11,9	11,9
2005	11,9	11,9	12,0	13,2	12,3	12,1	11,0	11,0	11,5	11,6	12,1	11,2	11,8
2006	12,2	11,8	12,6	12,1	12,0	11,6	11,8	11,4	11,4	11,5	11,8	11,4	11,8
2007	12,3	10,7	12,4	12,2	12,0	11,9	10,7	10,6	11,3	11,5	11,7	11,7	11,6
2008	11,6	12,1	11,8	11,7	11,9	11,6	11,1	10,9	11,0	11,5	12,3	11,2	11,5
2009	11,8	12,0	12,6	12,1	11,9	11,5	11,8	11,1	11,5	11,6	12,5	11,5	11,8
2010	11,5	13,1	13,0	13,4	13,2	12,1	11,8	11,1	11,6	11,9	12,4	12,3	12,3
2011	11,4	12,1	12,6	12,4	12,8	12,1	11,8	10,9	11,3	11,4	11,8	12,2	11,9
2012	11,7	11,4	12,9	11,9	12,1	11,2	11,3	11,5	11,3	12,0	12,0	11,8	11,8
2013	11,3	12,5	12,8	12,4	12,5	11,6	10,9	11,2	11,4	11,6	12,1	12,3	11,9
2014	11,8	12,7	12,5	12,7	12,4	12,3	11,2	11,4	11,6	11,7	12,2	11,7	12,0
2015	11,7	12,1	12,3	12,9	12,2	11,9	11,2	11,7	11,4	11,9	12,2	12,6	12,0
2016	12,0	13,0	13,3	13,2	12,7	11,6	11,3	11,6	11,7	12,0	12,2	11,7	12,2
2017	12,3	12,2	12,9	12,6	12,4	12,3	11,7	11,4	11,6	12,0	12,5	11,7	12,1
2018	12,5	12,0	12,5	12,5	12,0	12,0	11,2	11,2	11,4	12,0	12,6	11,2	11,9

ANEXO F. Tablas de datos para cálculo de  $ET_0$

Tabla de radiación extraterrestre ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{día}$ ) fórmula de Angstrom.

Latitud Norte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
0	885	915	925	900	850	820	830	870	905	910	890	875
10	780	840	900	925	915	900	905	915	905	865	800	760
20	660	750	850	920	960	965	960	935	875	785	685	630
30	520	630	775	895	975	1000	990	925	820	685	560	490
40	380	505	675	845	965	1020	985	895	740	565	415	335
50	225	360	555	750	930	1010	970	830	640	435	265	190
60	90	215	425	670	890	1000	945	770	510	285	120	60
70	0	70	275	565	855	1025	945	685	385	145	15	0
80	0	0	125	480	890	1075	995	660	255	25	0	0
90	0	0	40	470	900	1085	1010	670	170	0	0	0

Tabla de número de horas de brillo Solar (N) fórmula de Angstrom.

Latitud Norte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
5	11.8	11.9	12	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.2	11.9	11.8
10	11.6	11.8	12	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
15	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
20	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
25	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	12.0	12.3	11.6	10.9	10.6
30	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
35	10.1	11.0	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8