

IMPACTO POTENCIAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA OFERTA HÍDRICA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA SOPETRANA, ANTIOQUIA

DANIELA VELÁSQUEZ MUÑOZ

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniera Ambiental**

Carlos Daniel Ruíz Carrascal

I.C., M.Sc., M.A., M.Phil., PhD



**UNIVERSIDAD EIA
INGENIERÍA AMBIENTAL
ENVIGADO
2018**

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1 PRELIMINARES.....	15
1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Objetivos del proyecto	17
1.2.1 Objetivo general	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 Marco de referencia.....	17
1.3.1 Antecedentes	17
1.3.2 Marco conceptual	20
2 METODOLOGÍA.....	26
2.1 Línea base de las características hidroclimáticas de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana	26
2.1.1 Caracterización geomorfológica de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana	27
2.1.2 Verificación y validación de la información generada a partir de datos existentes	31
2.1.3 Cálculo de los parámetros de precipitación, temperatura y evapotranspiración para el escenario histórico	31
2.1.4 Calibración del modelo SHIA y simulación hidrológica para el escenario histórico	34
2.2 Cambio potencial en la oferta hídrica en la cuenca estudiada, para un horizonte prospectivo de mediano plazo.....	36
2.2.1 Cálculo de los parámetros de precipitación, temperatura y evapotranspiración para el escenario prospectivo a mediano plazo	36

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.2.2	Simulación hidrológica para el escenario prospectivo.....	38
2.2.3	Determinación de los cambios en la oferta hídrica.....	39
2.3	Análisis del efecto del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana y posibles medidas de mitigación	40
2.3.1	Identificación de factores causales que inciden sobre la oferta hídrica	40
2.3.2	Establecimiento de la demanda hídrica superficial total (DHST) para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.....	40
2.3.3	Determinación de la presión antrópica sobre la oferta hídrica.....	40
2.3.4	Presentación de escenarios de conflicto por usos de agua en el mundo	40
2.3.5	Posibles medidas de adaptación para la aplicación de estas en el área de estudio	40
3	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	42
3.1	Línea base de las características hidroclimáticas de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana	42
3.1.1	Caracterización geomorfológica de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana	42
3.1.2	Verificación y validación de la información generada a partir de datos existentes	47
3.1.3	Cálculo de los parámetros de precipitación, temperatura y evapotranspiración para el escenario histórico	48
3.1.4	Calibración del modelo SHIA y simulación hidrológica para el escenario histórico.....	55
3.2	Cambio potencial en la oferta hídrica en la cuenca estudiada, para un horizonte prospectivo de mediano plazo.....	57
3.2.1	Cálculo de los parámetros de precipitación, temperatura y evapotranspiración para el escenario prospectivo a mediano plazo	57
3.2.2	Simulación hidrológica para el escenario prospectivo.....	63
3.2.3	Determinación de los cambios en la oferta hídrica.....	65

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.3	Análisis del efecto del Cambio Climático en la oferta hídrica de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana y posibles medidas de mitigación	69
3.3.1	Identificación de factores causales que inciden sobre la oferta hídrica	69
3.3.2	Establecimiento de la demanda hídrica superficial total (DHST) para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.....	70
3.3.3	Determinación de la presión antrópica sobre la oferta hídrica.....	71
3.3.4	Presentación de escenarios de conflicto por usos de agua en el mundo	72
3.3.5	Proposición de posibles medidas de adaptación para la aplicación de estas en el área de estudio	75
4	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	78
	REFERENCIAS	80

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1. <i>Esquema metodológico.</i>	26
Tabla 2-2. <i>Parámetros para el cálculo de la integral hipsométrica.</i>	31
Tabla 2-3. <i>Métodos indirectos empleados para cuantificar la evapotranspiración real.</i>	33
Tabla 2-4. <i>VARIABLES DE ENTRADA QUE REQUIERE EL MODELO HIDROLÓGICO SHIA</i>	34
Tabla 3-1. <i>Parámetros físicos para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana</i>	43
Tabla 3-2. <i>Formas de sistemas hidrológicos con base en el coeficiente de Gravelius, Nota: Adaptado de “Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica” por Ortiz-Vera, 2015, p.28.</i>	43
Tabla 3-3. <i>Tiempos de concentración para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana obtenidos mediante diferentes ecuaciones empíricas.</i>	44
Tabla 3-4. <i>Parámetros de relieve para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.</i>	45
Tabla 3-5. <i>Comparación entre los parámetros morfométricos calculados y los establecidos en el PORH de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.</i>	48
Tabla 3-6. <i>Valores óptimos encontrados mediante funciones objetivo.</i>	55
Tabla 3-7. <i>Errores obtenidos en la simulación hidrológica para el escenario histórico.</i>	55
Tabla 3-8. <i>Comparación de láminas de precipitación entre los tres modelos de circulación global empleados</i>	61
Tabla 3-9. <i>Comparación de la oferta hídrica superficial para los percentiles 50 y 97.5.</i> ...	65
Tabla 3-10. <i>Cambio de la ETP en un escenario de cambio climático para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.</i>	70
Tabla 3-11. <i>Demanda hídrica de La Sopetrana por naturaleza de usuario y total en [m³/año]. Nota: Adaptado de “Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico QuBERada La Sopetrana” por CTA & Corantioquia, 2016, p.114.</i>	71
Tabla 3-12. <i>Demanda hídrica superficial total para los escenarios histórico y prospectivo.</i>	71
Tabla 3-13. <i>Determinación de la presión antrópica ejercida sobre la cuenca de la Quebrada La Sopetrana para los escenarios histórico y prospectivo</i>	71

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 3-14. Rangos y categorías del índice de regulación hídrica (IUA) del IDEAM. Nota: Adaptado de “Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico Quebrada La Sopetrana” por CTA & Corantioquia, 2016, p.130. 72

Tabla 3-15. Áreas geográficas con conflictos por insuficiencia hídrica. Nota: Adaptado de “¡Alerta 2005! Informe sobre conflictos, derechos humanos y construcción de paz” por Cañadas et al., 2005, p.30. 74

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1-1. <i>Esquema conceptual del modelo hidrológico SHIA. Nota: Adaptado de “Modelación hidrológica distribuida para el proyecto “inferencia de cambios de condiciones climáticas y sus impactos en la dinámica de ecosistemas de alta montaña. Estudio caso: cuencas hidrográficas de los ríos Claro y Otún, Parque Nacional de los Nevados”” por Gotta, 2014, p. 94.....</i>	22
Figura 2-1. <i>Representación gráfica de la regla del trapecio. Nota: Adaptado de “Métodos Numéricos” por Sánchez & Maroto, s.f.</i>	30
Figura 2-2. <i>Localización del punto de cierre de la subcuenca de la Quebrada La Sopetrana Q3. Nota: Adaptado de “Informe Final. Fase I Declaratoria y Fase II Diagnóstico. Plan de ordenamiento del recurso hídrico-PORH- Quebrada La Sopetrana. Informe Técnico” por CTA & CORANTIOQUIA, 2016. p.86.</i>	35
Figura 2-3. <i>Concentración de CO₂ en la atmósfera. Nota: Adaptado de “La concentración de CO₂ en la atmósfera supera los 400 ppm” por Grupo Ecoindustria, 2017.</i>	37
Figura 2-4. <i>Histograma de frecuencia de anomalías del percentil 90° (T₉₀) de temperaturas medias diarias luego de la implementación de la técnica de reducción de escala kth Nearest Neighbor (kNN) a las salidas prospectivas de 4 modelos de circulación global. Nota: Adaptado de “Escenarios de cambio climático y variabilidad climática en la macrocuenca Magdalena-Cauca para el horizonte prospectivo 2015-2040” por Ruiz et al., en publicación, p.6.</i>	38
Figura 2-5. <i>Distribución de valores extremos tipo I (Gumbrel). Nota: Adoptado de “Probability in Hydroclimatology” por Ruiz, 2016.....</i>	39
Figura 3-1. <i>Tiempos de concentración en minutos para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana obtenidos mediante diferentes metodologías.....</i>	44
Figura 3-2. <i>Curvas hipsométricas. Nota: Adaptado de “¿Qué es una curva hipsométrica?” por Rojas, 2015.</i>	45
Figura 3-3. <i>Curva hipsométrica para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.</i>	46
Figura 3-4. <i>Histograma de frecuencias altimétricas para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.....</i>	47
Figura 3-5. <i>Perfil altitudinal para el cauce principal de la Quebrada La Sopetrana.....</i>	47

Figura 3-6. Comparación de la lámina de precipitación media anual real y la predicha mediante el método de interpolación de Kriging con Deriva Externa.....	49
Figura 3-7. Histograma de frecuencia del error porcentual para la estimación de la lámina de precipitación mediante el método de interpolación Kriging con Deriva Externa.....	50
Figura 3-8. Errores medios calculados para los datos de lámina de precipitación hallados a partir del método de interpolación Kriging con Deriva Externa.	51
Figura 3-9. Comparación entre a) mapa de precipitación (Hurtado & Mesa, 2015) y b) mapa de precipitación generado mediante la implementación del método de interpolación de Kriging con Deriva Externa.	52
Figura 3-10. Series de caudales observados y simuladas empleando el modelo SHIA. ..	56
Figura 3-11. Curvas de duración de caudales de las serie observada y simulada.	56
Figura 3-12. Delimitación por gridpoints del modelo GISS-E2-R del área de influencia y distribución de las estaciones utilizadas.	58
Figura 3-13. Delimitación por gridpoints del modelo MPI-ESM-MR del área de influencia y distribución de las estaciones utilizadas.	58
Figura 3-14. Delimitación por gridpoints del modelo MRI-CGCM3 del área de influencia y distribución de las estaciones utilizadas.	59
Figura 3-15. Distribuciones altitudinales de la temperatura media anual para los escenarios histórico y prospectivo (modelo de circulación MPI-ESM-LR).	62
Figura 3-16. Serie de caudales para el escenario prospectivo.	63
Figura 3-17. Curva de duración de caudales de la serie simulada para el horizonte prospectivo de corto a mediano plazo.	64
Figura 3-18. Comparación entre las curvas de duración de las series de caudal histórico y prospectivo	65
Figura 3-19. Ciclos anuales para las series de caudales históricos (panel superior) y prospectivos de mediano plazo (panel inferior).	66
Figura 3-20. Histograma de rachas de días secos consecutivos para el escenario histórico.	67
Figura 3-21. Histograma de rachas de días secos consecutivos para el escenario prospectivo de mediano plazo.	68

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

LISTA DE MAPAS

	pág.
Mapa 3-1. <i>Delimitación y ubicación de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.</i>	42
Mapa 3-2. <i>Orden de las corrientes según la jerarquización de Horton, dentro de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.</i>	43
Mapa 3-3. <i>Distribución de las 485 estaciones con registros de precipitación del IDEAM en la cuenca Magdalena-Cauca.</i>	48
Mapa 3-4. <i>Distribución de la lámina de precipitación histórica para el departamento de Antioquia, generado mediante el método de interpolación de Kriging con Deriva Externa.</i>	51
Mapa 3-5. <i>Distribución espacial de la precipitación media anual en la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.</i>	53
Mapa 3-6. <i>Distribución espacial de la temperatura para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.</i>	54
Mapa 3-7. <i>Mapas de distribución de precipitación generados mediante el método de interpolación de Kriging con Deriva Externa. De arriba hacia abajo: MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3.</i>	59
Mapa 3-8. <i>Distribución de precipitación generada mediante el método de interpolación de Kriging con Deriva Externa para el modelo GISS-E2-R.</i>	60
Mapa 3-9. <i>Precipitación media anual en la cuenca de la Quebrada La Sopetrana para el escenario prospectivo 2016-2040.</i>	61
Mapa 3-10. <i>Mapa de temperatura para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana para el escenario prospectivo a mediano plazo.</i>	63
Mapa 3-11. <i>Cambios porcentuales en la precipitación para la cuenca del Magdalena-Cauca con respecto al período base.</i>	69
Mapa 3-12. <i>Cambios en la precipitación para el departamento de Antioquia y su entorno cercano.</i>	69
Mapa 3-13. <i>Conflictos de agua a nivel global ocurridos desde 0 B.C hasta la fecha. Nota: Adaptado de “Water Conflict Chronology” por Pacific Institute, 2018.</i>	72

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Mapa 3-14. *Conflictos de agua a nivel global para el año 2010 hasta el presente. Nota: Adaptado de "Water Conflict Chronology" por Pacific Institute, 2018. 73*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

LISTA DE ANEXOS

	pág.
A. 1. MAPA DE LAS COBERTURAS DE SUELO PARA LA CUENCA DE LA QUBERADA LA SOPETRANA	86
A. 2. MAPA DE LOS PISOS TÉRMICOS PRESENTES EN LA CUENCA DE LA QUBERADA LA SOPETRANA	87
A. 3. MAPA DE LAS UNIDADES CRONOESTRATIGRÁFICAS PRESENTES EN LA CUENCA DE LA QUBERADA LA SOPETRANA	88
A. 4. MAPA DE LAS EDADES GEOLÓGICAS DE LAS UNIDADES CRONOESTRATIGRÁFICAS PRESENTES EN LA CUENCA DE LA QUBERADA LA SOPETRANA	89
A. 5. MAPA DE LA LITOLOGÍA DE LOS SUELOS PRESENTES EN LA CUENCA DE LA QUBERADA LA SOPETRANA	90

RESUMEN

Este trabajo de investigación surge a partir de la necesidad de proveer elementos para la gestión del agua en una zona del Departamento de Antioquia en la cual la presión antrópica sobre el recurso hídrico está alcanzando niveles altos a críticos. Se seleccionó como estudio de caso la cuenca de la Quebrada La Sopetrana, debido a que ésta ha venido experimentando una disminución en la disponibilidad del recurso hídrico, sobre todo en períodos de estiaje, por el deterioro de sus ecosistemas y por el incremento en la demanda de agua para el desarrollo de actividades agrícolas, pecuarias y recreativas. Se definió una línea base a partir de la recolección, verificación y validación de información secundaria, y se procedió a la evaluación de un posible escenario prospectivo de disponibilidad del recurso hídrico mediante la ejecución de un modelo simple de simulación hidrológica (modelo SHIA) forzado con series sintéticas de lámina de precipitación para un futuro de corto a mediano plazo. El incremento en la temperatura media anual proyectada, obtenido a través de la implementación de la técnica de reducción de escala de kNN (k^{th} Nearest Neighbor) a las simulaciones prospectivas del modelo de circulación global MPI-ESM-LR, alcanza $+1,6^{\circ}\text{C}$, equivalente a un aumento del 8%. La reducción en la precipitación media anual con respecto al escenario histórico, definida a partir de la implementación de la técnica de reducción de escala 'Q-Q Delta Method' a las simulaciones prospectivas de los modelos climáticos GISS-E2-R, MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3, alcanza un 1% aproximadamente. El incremento en la lámina de evapotranspiración potencial para toda la cuenca hidrográfica, estimado a partir de la implementación de tres métodos indirectos (ecuaciones de Turc, 1954; Coutagne, s.f.; y Cenicafé, 1998) para las condiciones futuras, alcanza un 4%. La disminución en la oferta hídrica proyectada es de casi el 17%, con respecto al escenario histórico. Para una tasa de aumento de la demanda hídrica en la cuenca de casi el 5%, el aumento potencial en la presión antrópica sobre el recurso agua sería del 25% para las próximas dos décadas. Estos resultados permitieron la conceptualización y el planteamiento de acciones de mitigación y adaptación que garanticen a futuro una oferta del agua en altos estándares de cantidad y calidad. Las actividades aquí desarrolladas facilitan el proceso de toma de decisiones para el uso eficiente del recurso hídrico en la región de interés y su perduración en el tiempo.

Palabras claves: oferta hídrica; cambio climático, La Sopetrana, presión antrópica.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ABSTRACT

There is an urgent need to provide new elements for improving water management in a region of the Department of Antioquia in which the anthropic pressure on water resources is reaching high to critical levels. The watershed of the Quebrada La Sopetrana was selected as a case study, since it has been experiencing a decline in the availability of water resources, particularly during dry periods, driven by the deterioration of its ecosystems and by the increase in water demand due to agricultural, livestock and recreational activities. A base line was defined through the collection, verification and validation of secondary information, in order to assess a prospective scenario of water availability through the implementation of a simple hydrological simulation model (SHIA model) forced with synthetic time series of short to medium term future rainfall amounts. The increase in the projected average annual temperature, obtained through the implementation of the downscaling technique kth Nearest Neighbor to prospective simulation outputs of the global circulation model MPI-ESM-LR, reaches $+1.6^{\circ}\text{C}$, equivalent to an increase of 8%. The decrease in mean annual precipitation with respect to historical conditions, defined through the implementation of the downscaling technique 'Q-Q Delta Method' to the prospective simulation outputs of the global climate models GISS-E2-R, MPI-ESM-MR and MRI-CGCM3, reaches approximately 1%. The increase in potential evapotranspiration, estimated through the implementation of three indirect methods (Turc's, Coutagne's and Cenicafe's equations) for future conditions, reaches 4%. The decline in projected water supply is almost 17%, with respect to historical conditions. For an increase in water demand of almost 5%, the potential increase in the anthropogenic pressure on water resources would be 25% over the next two decades. These results allowed us to conceptualize and suggest a set of mitigation actions to ensure future water supply with high quantity and quality standards. These activities facilitate decision-making processes for the efficient use of water resources in the region of interest and their endurance over time.

Keywords: water supply, climate change, La Sopetrana, anthropic pressure.

INTRODUCCIÓN

El agua que se requiere para satisfacer las necesidades humanas es un recurso limitado, distribuido heterogéneamente y afectado por factores que modifican su cantidad, calidad y distribución. En la región Andina colombiana la proporción de la oferta hídrica superficial neta disponible que se necesita para satisfacer la demanda hídrica superficial total, o índice de escasez, asciende en el presente al 18,1% bajo condiciones de año normal (Armenteras & Rodríguez, 2007), y se incrementa al 24,2% bajo condiciones de año seco. Un importante número de municipios de la región Andina exhibe un índice de escasez superior al 40% bajo ambos escenarios, algunos de ellos ubicados en la región del Medio Cauca.

La cuenca de la Quebrada La Sopetrana, la cual provee agua al Municipio de Sopetrán, está ubicada al interior de esta región que, como se mencionó, se reconoce en el contexto nacional como con alto índice de presión antrópica (CORANTIOQUIA, 2007). La disminución en la disponibilidad del recurso hídrico superficial, particularmente en períodos de estiaje, debido al deterioro de sus ecosistemas, el aumento en el número de parcelaciones de la zona y el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas genera una imperiosa necesidad de estudiar la presión antrópica presente y futura sobre el agua. La cuenca hidrográfica aquí analizada es una fuente vital de sustento para las comunidades asentadas en el municipio de Sopetrán y su entorno cercano. En el presente trabajo se pretende analizar como el cambio climático podría afectar la oferta hídrica superficial en la cuenca de la Quebrada La Sopetrana, con miras a brindar nuevos elementos para el planteamiento de acciones de mitigación y adaptación que garanticen a futuro agua en altos estándares de cantidad y calidad.

El presente proyecto constituye una investigación de tipo aplicada en donde se desea obtener información y conocimientos nuevos para dar solución a un problema práctico. Se determina una línea base mediante la recolección, verificación y validación de información secundaria, con el fin de hacer una simulación hidrológica tanto histórica como prospectiva (de corto a mediano plazo) con la implementación del modelo de Simulación Hidrológica Distribuida y Abierta (**SHIA**) adaptado por Vélez (2001), Francés et al. (2002 y 2007) y Restrepo (2007). Esta modelación permitirá en primera instancia la creación de información base sobre la oferta hídrica en el área de estudio, para luego analizar posibles escenarios futuros donde se explorará el cambio potencial en la oferta hídrica de la cuenca debido al cambio climático. Finalmente, con los datos obtenidos, se propondrán medidas de mitigación y adaptación con el fin de facilitar la toma de decisiones respecto al uso eficiente del recurso hídrico.

Esta investigación adquiere relevancia al ser un instrumento que permite a las autoridades competentes tomar medidas que lleven a un aprovechamiento sostenible del recurso hídrico. De igual manera, permite la perduración en el tiempo de un recurso vital para las comunidades de la zona.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1 PRELIMINARES

1.1 Planteamiento del problema

Nuestro planeta Tierra tiene la capacidad de albergar vida gracias al agua del que dispone. Desde un punto de vista global, este recurso tan vital es ilimitado y, como consecuencia, parece aceptable asumir que hay una oferta constante de éste, donde los escenarios de escasez no deben existir y la demanda de toda la población mundial puede ser suplida. Además, en una situación ideal, el recurso hídrico no se ve afectado por factores externos ya que se comporta como un elemento independiente dentro de un sistema. El problema radica en que el recurso hídrico, en términos de agua disponible para uso humano y en específico el agua potable, depende de los procesos de potabilización, los recursos económicos y tecnológicos del que dispone un determinado lugar y la disponibilidad de agua dulce que hay allí; por consiguiente, el agua no se puede tratar como un recurso ilimitado e independiente y como consecuencia, el escenario ideal no existe.

En el caso de Colombia, a pesar de ubicarse entre los países con mayor riqueza hídrica, la distribución de agua es heterogénea, por lo que la relación demanda-oferta es menos favorable en las zonas donde la distribución hídrica es menor, pero donde se encuentra la mayor concentración de demanda (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Adicionándole a esto, diversos factores que modifican la cantidad, calidad y distribución del agua, y la limitada oferta de ésta, hacen que no se atienda adecuadamente la demanda de la creciente población y del desarrollo económico.

Uno de estos factores es el aumento de la población. Según el DANE (2011), la población colombiana creció en un 39.24% entre los años 1985 y 2005; pasó de 30'802.221 habitantes a 42'888.592 colombianos. Ahora bien, las proyecciones para el año 2020 apuntan a que la población habrá aumentado en un 65.30% con respecto al año 1985, llegando a alcanzar los 50'911.747 habitantes. Este aumento en la población conlleva al aumento en la demanda de agua para actividades agropecuarias, industriales y domésticas, que finalmente se traduce en un gran estrés hídrico a nivel nacional.

Otro factor importante que limita la disponibilidad de agua en Colombia es el deterioro de la cantidad y calidad de ésta como resultado de sistemas productivos insostenibles y la contaminación del recurso. En términos de cantidad, los sistemas productivos poco sostenibles generan afectaciones en el régimen hídrico y por ende en su regulación natural. Se obtienen picos muy altos en épocas invernales con resultados catastróficos como las inundaciones, y caudales cada vez menores en épocas de estiaje, que implica una muy baja o incluso nula oferta hídrica. Ahora bien, en cuanto a la calidad, la contaminación por materia orgánica, sustancias químicas y de naturaleza tóxica, entre otros, modifican el potencial de aprovechamiento del recurso hídrico (Ojeda & Arias, 2000).

Y a pesar de que Colombia, según un informe de la revista The Economist, está entre las nueve naciones que albergan el 60% del agua dulce del planeta, convirtiéndonos en una reserva de agua importante a nivel global (Semana, 2016), el país no está eximido de vivir

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

escenarios de conflicto por escasez de este recurso. A pesar de ser un país privilegiado hídricamente, gran parte de la población no tiene acceso al agua, a pesar de que la ONU-DAES (2010) a través de la Resolución 64/292 “reconoció explícitamente el derecho humano al agua [...], reafirmando que un agua potable y limpia son esenciales para la realización de todos los derechos humanos”.

¿Cómo es entonces que un país con gran abundancia hídrica vive problemas de disponibilidad, desabastecimiento y racionamiento de agua, y posee además comunidades sin acceso a ésta? Parte de la respuesta se introdujo cuando se hablaron de factores que limitan la disponibilidad, cantidad y calidad del recurso. Dentro de este conjunto de factores se encuentra el cambio climático que está experimentando el planeta. Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), el cambio climático se entiende como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (Naciones Unidas, 1992).

Los cambios en condiciones climáticas históricas generan impactos tales como: disminución del escurrimiento superficial y la recarga de acuíferos, aumento de la evapotranspiración (que conlleva a que los cultivos estén sometidos a un mayor estrés térmico (Martínez & Patiño, 2012)), la desaparición de masas glaciares y el desecamiento de reservorios de agua dulce, entre otros. Estos efectos generan finalmente una importante modificación en la disponibilidad del recurso hídrico, que puede llevar a este recurso hasta un punto de escasez, creando condiciones para el inicio de conflictos sociales, económicos y ambientales en las comunidades más vulnerables.

Un ejemplo de lo mencionado anteriormente es el caso de la quebrada La Sopetrana, en el municipio de Sopetrán, Antioquia. La cuenca hidrográfica de esta corriente superficial está ubicada en una zona de bosque seco tropical, del cual sólo queda el 8% en todo el país, haciendo de este ecosistema uno de los más vulnerables en todo el territorio colombiano (Instituto Humboldt Colombia, 2017). En este particular contexto ambiental se llevan a cabo múltiples actividades agrícolas y ganadería extensiva, las cuales conllevan a un deterioro de este ecosistema que de por sí está amenazado. El cambio en la cobertura vegetal cambia las condiciones de la cuenca hidrográfica y la hace más susceptible a los efectos del cambio climático. Si la oferta hídrica de la quebrada disminuye, esto conllevaría a posibles conflictos de agua. Esto resultaría particularmente crítico para una cuenca hidrográfica que abastece de agua potable al acueducto municipal y varias veredas del municipio de Sopetrán (Espinosa, 2012).

Por ello este trabajo plantea: ¿cómo el cambio climático podría afectar la oferta de agua en la cuenca de la Quebrada La Sopetrana, Antioquia?

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1.2 Objetivos del proyecto

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el impacto potencial del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana, Antioquia.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar una línea base de las características hidroclimáticas de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.
- Analizar el cambio potencial en la oferta hídrica en la cuenca estudiada, para un horizonte prospectivo a mediano plazo.
- Analizar el efecto del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana y las posibles medidas de adaptación para la zona en estudio.

1.3 Marco de referencia

1.3.1 Antecedentes

En el año 2014, la Unidad de Cambio Climático de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) redactó un documento acerca de los procesos de adaptación al cambio climático en la región de América Latina. Según este informe, “América Latina y el Caribe (...) enfrentan diversos riesgos, que deben ser administrados de forma apropiada para alcanzar un desarrollo sostenible durante la primera parte de este siglo” (Galindo et al., 2014). Algunos de los riesgos que deberán ser administrados según este informe son: el crecimiento económico a partir de la exportación de materias primas que amenaza la disponibilidad de recursos naturales a largo plazo, el incremento en el consumo de bienes y servicios, energía y alimentos, la alta proporción de la población que apenas se encuentra por encima de los límites de la pobreza y el continuo aumento en la temperatura del planeta.

Esto implica el desarrollo de una estrategia que permita hacer “sostenible al crecimiento económico [y lo que esto conlleva], conformar una red de protección social que disminuya la vulnerabilidad y avanzar en los procesos de adaptación al cambio climático” (Galindo et al., 2014). Si se tienen procesos eficientes de adaptación, los costos económicos esperados de éstos serán menores a los costos esperados de los impactos generados por el cambio climático. De allí la importancia de implementar medidas eficientes que permitan reducir los efectos negativos del mismo.

A nivel nacional, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) publicó en el año 2014 *“El Estudio Nacional del Agua”*. Allí se da cuenta del estado y

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

dinámica de los recursos hídricos en Colombia, se alerta sobre el potencial desabastecimiento de agua en el país, se plantean retos y nuevas fronteras de investigación que deben atenderse bajo políticas eficaces y efectivas y se hace un llamado a la comunidad, al sector productivo y a las organizaciones sociales al cuidar del agua como componente esencial del desarrollo sostenible (IDEAM, 2015).

Por otro lado, a nivel regional la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia - CORANTIOQUIA formuló en el año 2007 el Plan de Gestión Ambiental Regional para su jurisdicción, incluyendo por tanto el municipio de Sopetrán. Dicho plan está orientado a “contribuir al logro del desarrollo sostenible, mediante el conocimiento y mejoramiento de la oferta ambiental y la administración del uso de los recursos para responder a su demanda” (CORANTIOQUIA, 2007) y define un escenario de actuación a largo plazo.

Sin embargo, no se encontró un proyecto de estudio para el Occidente Antioqueño que se encargue de analizar los efectos que el cambio climático pueda generar a corto y mediano plazo. A nivel regional se han realizado inventarios hídricos (Mejía, 1999), evaluaciones del potencial acuífero (Arismendy & Salazar, 2003) y (Ortiz & Restrepo, 2004), estimativos de la oferta ambiental del recurso hídrico (Otaya & Bustamante, 2004) y (Otaya et al, 2008), estudios hidrodinámicos (Posada et al, 2006), identificación de reservorios de aguas subterráneas (Vélez & Rhenals, 2008), estudios paleoecológicos (Osorio, 2016), Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (CTA & CORANTIOQUIA, 2016) y Estrategias Regionales de Agua que pueden servir como información complementaria a este trabajo de investigación.

Con el fin de realizar un inventario hídrico de las corrientes de agua que abastecían los acueductos de las cabeceras municipales y corregimientos de la región de los Hevéxicos (Occidente Antioqueño) de la jurisdicción de CORANTIOQUIA, la Corporación Ambiental de la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA realizaron un reporte en conjunto en el año 1999. En dicho informe se presentan fichas básicas de datos para 42 microcuencas analizadas y se propone un instrumento para establecer prioridades de intervención en las cuencas y microcuencas de la región estudiada (Mejía, 1999).

Adicionalmente, debido a la creciente demanda de agua se realizaron estudios (Arismendy & Salazar, 2003) y (Ortiz & Restrepo, 2004) que evaluaban el potencial acuífero en los municipios de Puerto Berrío, Puerto Nare, Santa Fe de Antioquia, San Jerónimo, Sopetrán, Olaya y Liborina. Dichas evaluaciones tenían como objeto construir un modelo hidrogeológico que permitiera a las autoridades y comunidad en general, realizar un manejo adecuado de las aguas subterráneas para que, mediante la explotación de éstas, se pudiera satisfacer parcialmente la creciente demanda de agua en estos municipios.

Por otra parte, y teniendo en cuenta que Antioquia cuenta con el Área de Manejo Especial (AME) “Sistema de Páramos y Bosques Altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño”, siendo ésta estratégica para la preservación del ciclo hidrológico, se adelantó en el año 2004 una metodología para “estimar la oferta hídrica en un ecosistema estratégico cuando se cuenta con información escasa” (Otaya & Bustamante, 2004), que se complementó con un estudio realizado por Otaya et al (2008). Dicho estudio es importante ya que de esta

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

área protegida se originan varias fuentes de agua que abastecen no sólo las necesidades básicas de las poblaciones cercanas, sino que también se benefician municipalidades como Medellín, que reciben beneficios indirectos de dicha oferta hídrica. Por lo tanto, conocer la oferta hídrica derivada de allí permite elaborar planes de manejo y valoraciones económicas respecto a ésta.

Respecto al área de interés, en el estudio de Posada et al (2006) se llevó a cabo un análisis hidrodinámico del abanico de Sopetrán con el fin de entender los procesos que estaban activos para entonces y proponer una solución apropiada. Este análisis se llevó a cabo debido a los problemas de inestabilidad registrados principalmente como consecuencia de un evento extremo de precipitación que ocurrió en noviembre del año 2000 en la cuenca de la Quebrada La Sopetrana, y que ocasionó un flujo torrencial. En dicho estudio se encontró que “el problema de inestabilidad corresponde a procesos antiguos de migración del cauce, debido al control del nivel base ejercido por el depósito de grandes dimensiones en la desembocadura de la quebrada” (Posada et al., 2006).

Por otro lado, y teniendo en cuenta que ya se mencionaron estudios que evaluaban el potencial acuífero para el abastecimiento de agua debido a la alta demanda de ésta en el Occidente y Oriente Antioqueño, y en los que se proponían modelos hidrogeológicos, Vélez y Rhenals (2008) llevaron a cabo la utilización de isótopos ambientales con el fin de identificar las zonas de recarga de los acuíferos del Occidente Antioqueño. La identificación de dichas zonas de recarga hace parte esencial en la construcción de un modelo hidrogeológico por lo que sirve como complemento a los estudios previamente realizados.

Teniendo en cuenta por otro lado eventos como el calentamiento global actual que acarrea retroceso de masas glaciares, pérdidas de tierra en zonas bajas, y disminución de caudales tropicales, se realizan estudios paleoecológicos; que facilitan el entendimiento de fenómenos climáticos en el largo plazo. Sin embargo, debido al desconocimiento de ambientes sedimentarios, hay pocos estudios en esta área. Como respuesta a esta falta de información, Osorio (2016) realizó una reconstrucción paleoecológica del Holoceno con el fin de reconstruir a escala quinquenal las variaciones climáticas y los cambios en vegetación del humedal La Bramadora localizada en el municipio de Sopetrán.

En el año 2016 el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia-CTA-, presentó a CORANTIOQUIA el informe final con el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico para la Quebrada La Sopetrana (PORH). Dicho informe tuvo la finalidad de facilitar la gestión integral de esta cuenca y “alcanzar un equilibrio entre el uso del recurso hídrico para las diferentes actividades humanas y para la preservación de la fauna y la flora que también dependen de este recurso” (CTA & CORANTIOQUIA, 2016)

Por último, CORANTIOQUIA en colaboración con la empresa consultora GOTTA INGENIERIA S.A.S, realizó la “Evaluación Regional del Agua” para la jurisdicción de dicha autoridad ambiental. Dicho informe comprende “el análisis integrado de la oferta, demanda, calidad y análisis de los riesgos asociados al recurso hídrico (...) teniendo como base las subzonas hidrográficas” (CORANTIOQUIA & GOTTA INGENIERIA S.A.S., 2017)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Para finalizar, a pesar de que los estudios arriba mencionados no evalúan directamente el efecto que el cambio climático puede tener a futuro sobre las fuentes hídricas, la información presentada por los mismos puede ser de gran utilidad. A partir de estos estudios se evalúan, por ejemplo, cambios en la precipitación o en las características geomorfológicas en el área de la cuenca, lo que puede servir de referencia para llevar a cabo este proyecto de investigación.

1.3.2 Marco conceptual

Para la comprensión de este proyecto de investigación, es necesario tener claros algunos conceptos que se tratarán repetitivamente en el presente estudio. Es por ello que, a continuación, se precisan dichos conceptos con el fin de evitar diferentes interpretaciones.

1.3.2.1 Cuenca hidrográfica

Una cuenca permite hacer una delimitación geográfica donde se establece un área de estudio. Según Schreier et al. (2005 citado en Caicedo, 2009), una “cuenca hidrográfica es un área limitada por características topográficas que hacen drenar el agua a un destino común como un lago, una corriente, un estuario o un océano. Esta área captura la precipitación, la filtra, la almacena y determina su liberación” (Caicedo, 2009).

Otra definición similar a la anterior es la establecida en el artículo 312 del Decreto-Ley 2811 de 1974, en donde una cuenca es definida como:

“El área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor, que a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar. (Decreto-Ley 2811, 1974)

Las dos definiciones presentadas aquí son congruentes entre sí y ejemplifican lo que en este trabajo se entiende como cuenca.

1.3.2.2 Cambio climático

Según la NASA (2017), el cambio climático hace referencia a una serie de fenómenos globales producidos en su mayoría por la actividad antrópica, que aumentan la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Estos fenómenos globales incluyen el incremento en la temperatura, que se reconoce en la comunidad internacional con el nombre de calentamiento global. Pero de igual manera abarca cambios como el aumento en el nivel del mar, cambios en patrones climáticos como la precipitación y pérdida de masas glaciares.

Como se mencionó, estos cambios se deben a actividades antrópicas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, que incrementan los niveles de dióxido de carbono y otros gases en la atmósfera. Conocidos como gases de efecto invernadero (GEI), éstos

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

“retienen parte de la energía que el suelo emite por haber sido calentado por la radiación solar” (CIIFEN, 2017). Cabe destacar, que aunque el efecto invernadero evita que la energía que llega a la Tierra retorne en su totalidad al espacio y podamos gozar de una temperatura agradable, un aumento significativo en los GEI implica que haya un cambio en el flujo de energía, lo que conlleva a que el planeta Tierra busque ajustarse a través del sistema climático (CIIFEN, 2017).

1.3.2.3 Oferta hídrica

Cuando se habla de oferta hídrica, ésta puede ser la total o la disponible. Para fines de esta investigación, el concepto al que nos referimos como oferta hace referencia a la oferta hídrica total. Sin embargo, se presentarán a continuación ambos conceptos.

1.3.2.3.1 Oferta hídrica total

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua del 2014, realizado por el IDEAM, la oferta hídrica total hace referencia a la escorrentía superficial. Es por eso que es conocida también como *oferta hídrica total superficial (OHTS)*, “siendo el volumen de agua que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficiales” (IDEAM, 2015). Esto quiere decir, que la OHTS es el agua que no se evapora ni se infiltra y fluye por la superficie del suelo.

1.3.2.3.2 Oferta hídrica disponible

La oferta hídrica disponible u *oferta hídrica total disponible (OHTD)*, se refiere al volumen de agua que queda luego de sustraer de la OHTS, un volumen de agua destinado a mantener y conservar los ecosistemas. En otras palabras, es:

“El volumen de agua promedio que resulta de sustraer a la oferta hídrica total superficial (OHTS) el volumen de agua que garantizaría el uso para el funcionamiento de los ecosistemas y de los sistemas fluviales, y en alguna medida un caudal mínimo para usuarios que dependen de las fuentes hídricas asociadas a estos ecosistemas (caudal ambiental).” (IDEAM, 2015)

1.3.2.4 Demanda hídrica

Según el Estudio Nacional del Agua, realizado por el IDEAM en el año 2014, la demanda hídrica total “comprende la sustracción de agua del sistema natural destinada a suplir las necesidades y los requerimientos de consumo humano, producción sectorial y demandas esenciales de los ecosistemas existentes sean intervenidos o no” (IDEAM, 2015). La demanda hídrica es, por ende, una presión de los diferentes sectores usuarios sobre el recurso hídrico.

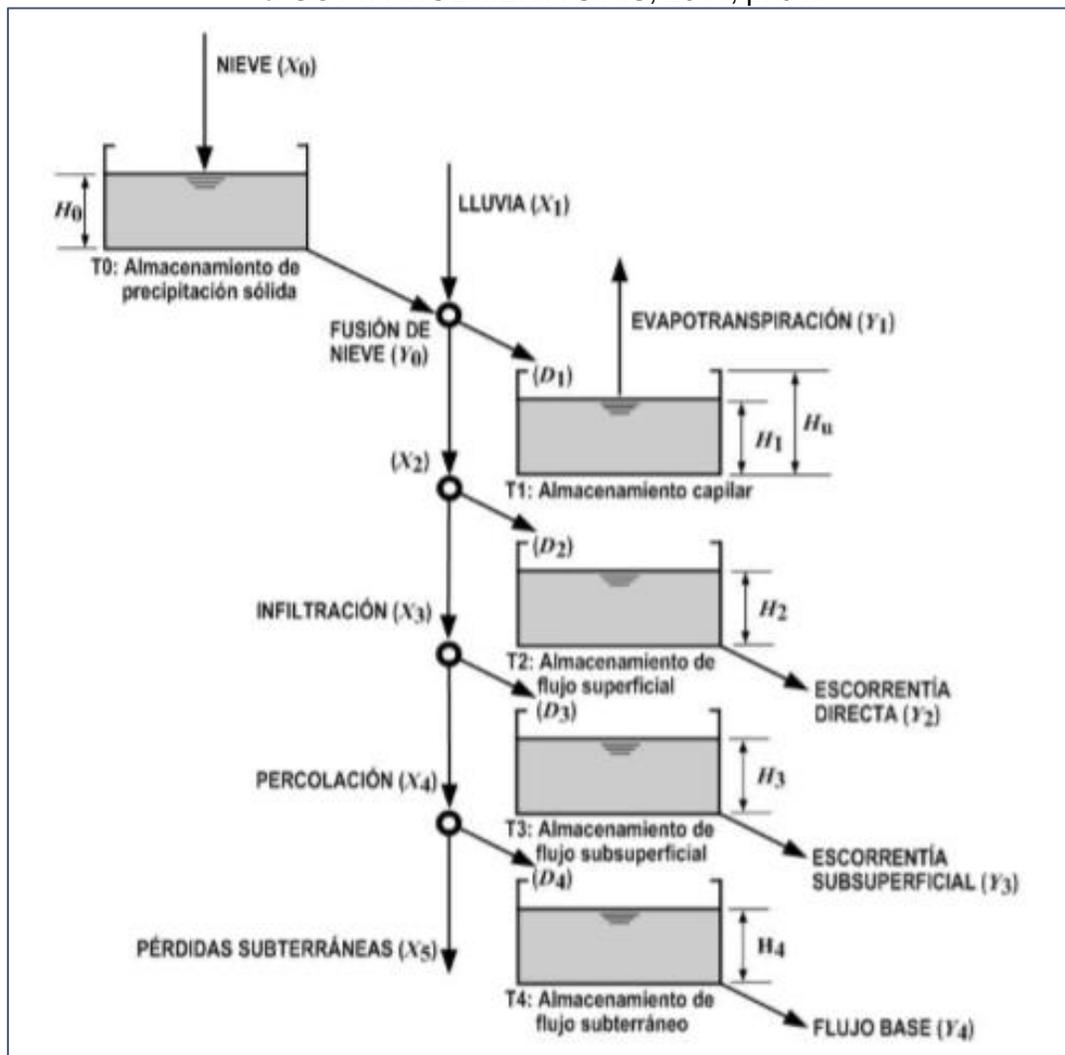
1.3.2.5 Modelo de simulación hidrológica SHIA

Este modelo hidrológico permite calcular la producción de escorrentía mediante cinco tanques interconectados que representan los diferentes niveles de almacenamiento hídrico

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

en una columna extendida de suelo (Francés et al., 2007). Estos tanques incluyen: los almacenamientos de precipitación sólida, capilar (agua almacenada en la vegetación), flujo superficial, sub-superficial y flujo subterráneo. Las interconexiones entre los tanques representan los procesos preponderantes del ciclo hidrológico en su fase terrestre, siendo éstos: la precipitación (en forma de lluvia o nieve), la fusión de nieve, la evapotranspiración, la infiltración y la percolación. Este modelo identifica además los componentes principales de salida: la escorrentía superficial directa, la escorrentía sub-superficial y el flujo base (ver Figura 1-1).

Figura 1-1. Esquema conceptual del modelo hidrológico SHIA. Nota: Adaptado de "Modelación hidrológica distribuida para el proyecto "inferencia de cambios de condiciones climáticas y sus impactos en la dinámica de ecosistemas de alta montaña. Estudio caso: cuencas hidrográficas de los ríos Claro y Otún, Parque Nacional de los Nevados" por EIA & GOTTA INGENIERÍA S.A.S, 2014, p. 94.



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Se presenta una explicación general del modelo con las ecuaciones que se emplean en los diferentes tanques de almacenamiento. Dicha información ha sido detallada en diferentes estudios, entre ellos (Francés et al., 2002), (EIA & GOTTA INGENIERÍA S.A.S., 2014), (Zapata, 2016) y (Ruiz, 2017).

I. Tanque de almacenamiento de flujo estático (T1):

El tanque $T1$ representa la detención del agua en superficie, la intercepción por parte de la vegetación y el agua retenida por fuerzas capilares en la zona de enraizamiento (rooting zone en inglés). Existe una capacidad máxima de almacenamiento capilar o gravitacional H_u . El agua solo puede salir en forma de evapotranspiración (Y_1), por lo que no hay contribución a la escorrentía. La cantidad de agua que es almacenada está dada por:

$$D_1 = \text{Min} \{ \varphi X_1, H_u - H_1 \} \quad (1)$$

donde H_1 representa la cantidad de agua almacenada en el tanque $T1$, X_1 la precipitación líquida y el coeficiente φ se halla de la siguiente manera:

$$\varphi = 1 - \left(\frac{H_1}{H_u} \right)^\alpha \quad (2)$$

siendo α valores entre 1 y 3. La evapotranspiración va a estar condicionada por la cantidad de agua presente en el tanque, por lo que se puede definir esta salida de la siguiente forma:

$$Y_1 = \text{Min} \left\{ ETP \left(\frac{H_1}{H_u} \right)^\beta, H_1 \right\} \quad (3)$$

El agua que sobrepasa el almacenamiento capilar X_2 (excedente) y se convierte en escorrentía superficial está dada por:

$$X_2 = (Y_0 + X_1) - D_1 \quad (4)$$

siendo Y_0 el agua derivada del derretimiento de la nieve.

II. Tanque de almacenamiento de flujo superficial (T2):

El segundo tanque representa el agua superficial del terreno, que puede fluir como escorrentía directa o infiltrarse. Aquí se tiene en cuenta el tiempo de concentración y la pendiente de la cuenca. El flujo superficial almacenado D_2 se halla considerando el flujo excedente X_2 y la conductividad de la capa superior del suelo K_S :

$$D_2 = \text{Max} \{ 0, X_2 - K_S \} \quad (5)$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El flujo superficial en cada píxel puede representarse como un grupo de canales pequeños para los cuales se asume una velocidad constante y se aplica la ecuación de continuidad, considerando entonces la escorrentía directa Y_2 como un embalse lineal:

$$Y_2 = \left(\frac{H_2 v_2 dt}{v_2 dt + dx} \right) \quad (6)$$

donde v_2 es la velocidad del agua al desplazarse por la ladera, dx es la distancia recorrida por esta en cada píxel dependiendo de la dirección a la que drena cada celda y dt es el tiempo de simulación. El agua que no entra al almacenamiento de flujo superficial, se infiltra a estratos inferiores del suelo, siendo esta:

$$X_3 = X_2 - D_2 \quad (7)$$

III. Tanque de almacenamiento de flujo subsuperficial T3:

El tanque $T3$ hace referencia al almacenamiento gravitacional en la parte superior del subsuelo entre la capacidad de campo y el punto de saturación de este. El almacenamiento de flujo subsuperficial depende entonces del excedente del flujo superficial X_3 y la conductividad hidráulica de la capa inferior del suelo en condiciones de saturación K_p :

$$D_3 = \text{Max} \{0, X_3 - K_p\} \quad (8)$$

El flujo de salida de este tanque representa la escorrentía subsuperficial Y_3 y sigue una conceptualización similar a la empleada en el tanque $T2$ para el flujo superficial, donde v_3 es la velocidad que adquiere el agua al desplazarse por la capa superior de la ladera:

$$Y_3 = \left(\frac{H_3 v_3 dt}{v_3 dt + dx} \right) \quad (9)$$

El agua que no entra al tanque de almacenamiento de flujo subsuperficial, se percola hacia la capa inferior del suelo, y se determina así:

$$X_4 = X_3 - D_3 \quad (10)$$

IV. Tanque de almacenamiento de flujo subterráneo T4:

El tanque $T4$ considera el almacenamiento de saturación o flujo subterráneo, que representa el agua presente en el acuífero. El agua almacenada como flujo subterráneo D_4 depende entonces del exceso de agua subsuperficial X_4 y las pérdidas subterráneas X_5 :

$$D_4 = \text{Max} \{0, X_4 - X_5\} \quad (11)$$

El flujo de salida o flujo base del tanque T4 sigue la conceptualización de embalse lineal, contemplada anteriormente, donde v_4 representa la velocidad en el acuífero:

$$Y_4 = \left(\frac{H_4 v_4 dt}{v_4 dt + dx} \right) \quad (12)$$

V. Tanque de almacenamiento de precipitación sólida T0:

Este tanque se considera en caso de que haya precipitación sólida que será almacenada como nieve. La fusión de la nieve es entonces adicionada a la precipitación, que serán las entradas de agua X_1 que recibe el tanque de almacenamiento de flujo estático.

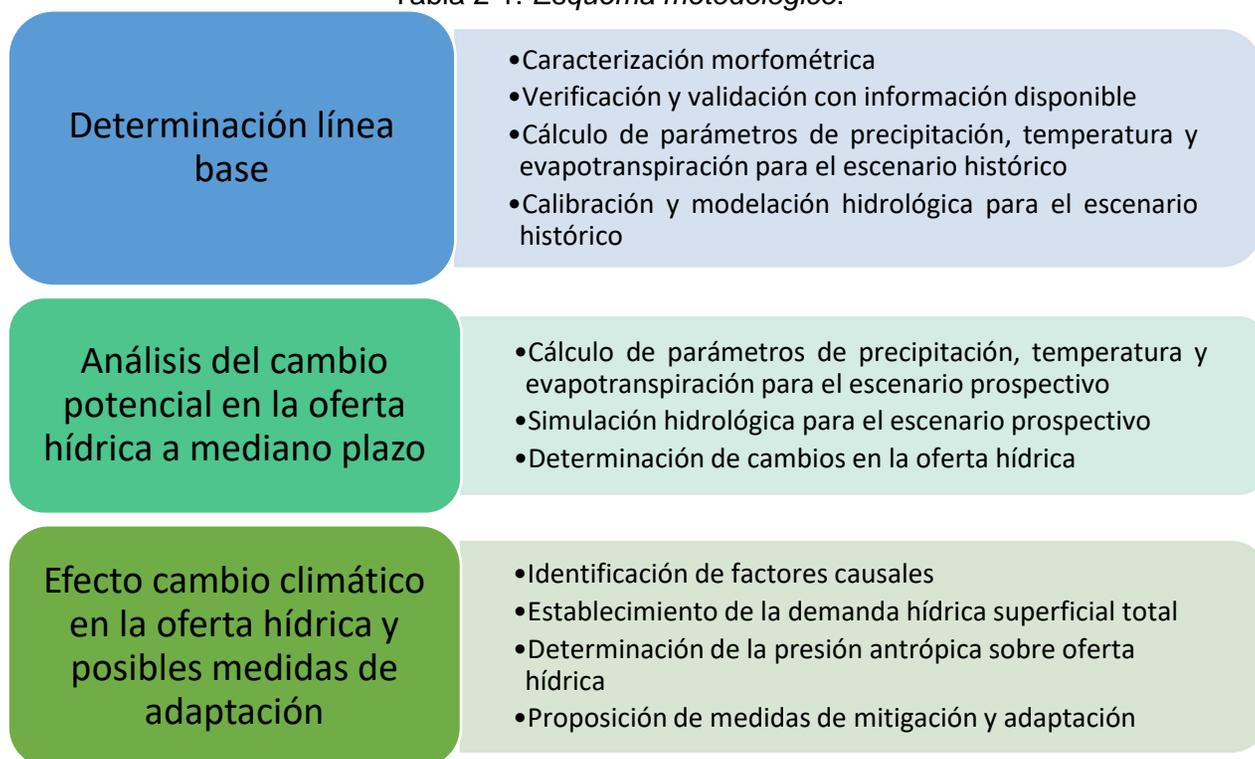
A partir de este modelo se simula el caudal de una cuenca hidrográfica donde este será la suma de todos los flujos de salida de los diferentes tanques de almacenamiento (Y_2 , Y_3 y Y_4), teniendo en cuenta el área de drenaje de la cuenca:

$$Q = (Y_2 + Y_3 + Y_4) \cdot A \quad (13)$$

2 METODOLOGÍA

Este proyecto es de tipo investigación aplicada, donde se orienta la misma a obtener conocimientos nuevos para dar solución a problemas prácticos, con enfoque cuantitativo tanto descriptivo como experimental. Es descriptivo debido a que parte de la investigación se fundamenta en el conocimiento de la realidad en un espacio temporal; y es experimental dado que se pretenden identificar factores causales que afectan la ocurrencia de un fenómeno (Pinillos, 2012). En la Tabla 2-1 se especifican las actividades que se llevaron a cabo para dar cumplimiento a cada objetivo específico.

Tabla 2-1. *Esquema metodológico.*



2.1 Línea base de las características hidroclimáticas de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana

Se realizó la caracterización morfométrica del área de estudio a partir de la herramienta de información georreferenciada ArcGIS 10.3. Los parámetros generales de la cuenca obtenidos se compararon con la información disponible en el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH) de la Quebrada La Sopetrana, realizado por CORANTIOQUIA, para validar la información obtenida. Una vez se verificó y validó la información calculada, se procedió a determinar los factores climáticos precipitación, temperatura y

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

evapotranspiración de la zona para el escenario histórico. Estos factores se calcularon mediante el uso de series históricas de precipitación provenientes de estaciones operadas por el IDEAM, la implementación de la ecuación lineal de temperatura media para la zona andina y métodos indirectos para inferir la evapotranspiración.

2.1.1 Caracterización geomorfológica de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana

Para realizar la caracterización geomorfológica de la cuenca, se procedió a delimitar el área de estudio mediante la herramienta de información georreferenciada ArcGIS 10.3, utilizando como sistema de referencia WGS_1984_UTM_ZONE_18N. Para ello se descargó un modelo de elevación digital (MED) con una resolución de 90 metros, generado por The Conservation Science Program of World Wildlife Fund (WWF) a partir del proyecto internacional Misión Topográfica Radar Shuttle (SRTM, por sus siglas en inglés), al cual se le corrigieron las imperfecciones (Lehner, Verdin, & Jarvis, 2006). Posteriormente se determinó la dirección y acumulación de flujo, y se halló la red y área de drenaje de la cuenca. Se determinaron los parámetros morfométricos de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana, ya que a partir de éstos se establece el comportamiento hidrológico de la misma. Dichos parámetros se clasifican en físicos, de forma y de relieve.

2.1.1.1 Parámetros morfométricos físicos

Estas características permiten dar una idea general acerca de la naturaleza y el comportamiento de una cuenca (Villegas, 2013), y permiten definir posteriormente la forma del hidrograma de descarga. El orden de las corrientes permite ver el grado de bifurcación que tiene la red de drenaje de la cuenca estudiada (Rojo Hernández, s.f.).

2.1.1.2 Parámetros morfométricos de forma

La forma que adopte una cuenca es determinante en su comportamiento hidrológico (Villegas, 2013). Es por ello que se calculó el coeficiente de Gravelius o de compacidad y el parámetro de forma de Horton. El primero relaciona el perímetro (P) en km y área de drenaje (A) en km² de una cuenca e indica que entre más se aproxime a la unidad el coeficiente, la forma de la cuenca se aproxima más a un círculo y por lo tanto está tiende a concentrar mayor cantidad de agua por escurrimiento (Ver ecuación 1).

$$K_c = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (14)$$

El segundo parámetro, el de forma de Horton, indica que tan alargada es la cuenca y que tan propensa es a experimentar grandes crecientes. Si dos cuencas tienen áreas similares pero una de ellas tiene un menor factor de forma, esto indica que dicha cuenca esta menos sujeta a crecientes que la otra (Rojo Hernández, s.f.). El parámetro de forma de Horton tiene en cuenta el área de la cuenca (A) en km² y la longitud del cauce principal (L) en km, y se expresa según la siguiente ecuación:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (15)$$

Se considero además el tiempo de concentración T_c definido como “el tiempo en el cual la escorrentía superficial del punto más alejado de la cuenca alcanza el punto de desagüe o salida” (Vélez & Botero, 2011). El tiempo de concentración se puede entender también como el tiempo de respuesta o de equilibrio que exhibe una cuenca hidrográfica, y se calcula mediante diferentes ecuaciones que lo relacionan con otros parámetros morfométricos.

- **Bransby-Williams (1991)**

$$t_c = 14.6 * L * A^{-0.1} * S^{-0.2} \quad (16)$$

donde t_c es el tiempo de concentración (minutos), L corresponde a la longitud del cauce principal (km), A hace referencia al área de drenaje de la cuenca (km²) y S es la pendiente media del cauce principal (m/m).

- **Clark**

$$T_c = 0.335 * \left(\frac{A}{S^{0.5}}\right)^{0.593} \quad (17)$$

en donde T_c corresponde al tiempo de concentración (horas), A es el área de drenaje (km²) y S representa la pendiente media del cauce principal (m/m).

- **Giandotti (1997)**

$$T_c = \frac{4*\sqrt{A}+1.5*L}{25.3*\sqrt{S*L}} \quad (18)$$

donde T_c es el tiempo de concentración (horas), A es el área de drenaje (km²) y L representa la longitud del cauce principal (km).

- **Kirpich (1942)**

$$T_c = 0.066 * \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0.77} \quad (19)$$

en donde T_c corresponde al tiempo de concentración (horas) y S representa la pendiente media del cauce principal (m/m).

- **Passini**

$$t_c = \frac{\alpha \cdot (A \cdot L)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{S}} \quad (20)$$

donde t_c es el tiempo de concentración (minutos), L corresponde a la longitud del cauce principal (km), A hace referencia al área de drenaje de la cuenca (km^2), S es la pendiente media del cauce principal (m/m) y α representa el alejamiento medio que está dado por la relación entre la longitud del cauce principal y la raíz cuadrada del área de drenaje.

- **Pérez Monteagudo**

$$T_c = \frac{L}{72 \cdot \left(\frac{H}{L}\right)^{0.6}} \quad (21)$$

en donde T_c corresponde al tiempo de concentración (horas), L representa la longitud del cauce principal (km) y H es la diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida (km).

- **Pilgum y McDermott**

$$T_c = 0.76 * A^{0.38} \quad (22)$$

donde T_c es el tiempo de concentración (horas) y A corresponde al área de drenaje de la cuenca (km^2).

- **Témez (1991)**

$$T_c = 0.3 * \left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.75} \quad (23)$$

en donde T_c corresponde al tiempo de concentración (horas) y S representa la pendiente media del cauce principal (m/m).

- **Valencia y Zuluaga**

$$T_c = 1.77 * L^{-0.096} * A^{0.325} * S^{-0.290} \quad (24)$$

donde t_c es el tiempo de concentración (minutos), L corresponde a la longitud del cauce principal (km), A hace referencia al área de drenaje de la cuenca (km^2) y S es la pendiente media del cauce principal (m/m).

- **Ventura-Heras**

$$T_c = \alpha * \frac{\sqrt{A}}{S} \quad (25)$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

donde T_c corresponde al tiempo de concentración (horas), A hace referencia al área de drenaje de la cuenca (km^2), S es la pendiente media del cauce principal (m/m) y α representa el alejamiento medio que está dado por la relación entre la longitud del cauce principal (km) y la raíz cuadrada del área de drenaje.

Para la estimación del tiempo de concentración se recomienda emplear el valor medio obtenido de diferentes ecuaciones empíricas, considerando al menos cinco estimaciones diferentes (Vélez & Botero, 2011). Por ello se calculó el tiempo de concentración mediante las ecuaciones descritas anteriormente y se consideraron solo los resultados que se encontraban dentro de unas bandas de confianza definidas como el promedio de los tiempos de concentración más o menos (+/-) la desviación estándar.

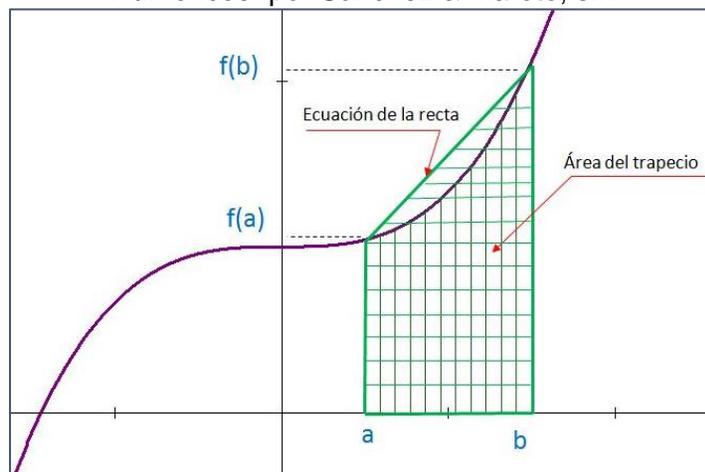
2.1.1.3 Parámetros morfométricos de relieve

Los parámetros de relieve definen la velocidad de escorrentía y el poder de transporte y erosión de una cuenca. Se determinó la curva hipsométrica ya que esta permite observar la variación altitudinal en la cuenca, y por tanto el área drenada (Rojo Hernández, s.f.; Villegas, 2013).

Se calculó igualmente la integral hipsométrica, la cual es indicativo del estado de desarrollo de la cuenca (García, 2014). Esta área se halló a partir de los datos presentados en la Tabla 2-2, donde h es la diferencia entre el nivel base y la altura considerada en cada intervalo, H es la diferencia entre la cota del nivel base y la altura máxima, A es el área total de la cuenca y a es el área perteneciente a la cuenca para cada caso. El área del trapecio se encontró mediante el método de integración de la regla del trapecio donde el área de una integral definida se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\int = (b - a) * \left(\frac{f(a) + f(b)}{2} \right) \quad (26)$$

Figura 2-1. Representación gráfica de la regla del trapecio. Nota: Adaptado de “Métodos Numéricos” por Sánchez & Maroto, s.f.



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 2-2. *Parámetros para el cálculo de la integral hipsométrica.*

h (m)	h/H	a/A	Área trapecio (%)
130	0.0498	1.0000	0.0057
260	0.0997	0.9242	0.0073
391	0.1499	0.8657	0.0082
521	0.1998	0.8190	0.0077
652	0.2500	0.7846	0.0100
782	0.2998	0.7483	0.0129
912	0.3497	0.7084	0.0186
1,043	0.3999	0.6588	0.0255
1,173	0.4498	0.5987	0.0313
1,304	0.5000	0.5328	0.0392
1,434	0.5498	0.4582	0.0429
1,564	0.5997	0.3835	0.0457
1,695	0.6499	0.3104	0.0459
1,825	0.6998	0.2424	0.0400
1,956	0.7500	0.1873	0.0352
2,086	0.7998	0.1419	0.0354
2,216	0.8497	0.0989	0.0372
2,347	0.8999	0.0564	0.0323
2,477	0.9498	0.0214	0.0160
2,608	1.0000	0.0049	0.0000

2.1.2 Verificación y validación de la información generada a partir de datos existentes

Las características morfométricas obtenidas se compararon con la descripción general de la cuenca que se presentó en el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico de esta quebrada, realizado por CORANTIOQUIA en el año 2016. Se calculó el error porcentual que existe entre los diferentes datos morfométricos, con el fin de validar los datos obtenidos para el área de estudio.

2.1.3 Cálculo de los parámetros de precipitación, temperatura y evapotranspiración para el escenario histórico

Para el cálculo de la lámina de precipitación, se emplearon los datos medios anuales multianuales de 485 estaciones pluviométricas y pluviográficas instaladas en la macrocuenca Magdalena-Cauca por el IDEAM (esta información puede consultarse en las memorias del trabajo), interpolados en ArcGIS mediante el método de interpolación de *Kriging con Deriva Externa* empleando el MED como segundo conjunto de datos de entrada. El mapa de distribución espacial producto de este análisis permitió determinar la precipitación media anual para el área de estudio. Se validó la información de tres maneras: (1) comparando la lámina de precipitación medida con la predicha por el método de interpolación, (2) confrontando el mapa obtenido con el mapa de precipitación media anual

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

para toda Colombia, presentado en Hurtado & Mesa (2015); y (3) comparando los valores puntuales obtenidos por la interpolación con los datos medios de precipitación de las dos estaciones más cercanas al área en estudio, con códigos 2701511 (Aragón) y 2701087 (Belmira).

Para la validación de los valores de precipitación real y los predichos, se evaluó el error porcentual (BE), el error estandarizado medio (MSE) y el error medio cuadrático estandarizado (RMSS). Dichos errores reflejan la exactitud que existe entre los valores observados y las aproximaciones realizadas mediante el método de interpolación.

El error porcentual (BE) refleja la discrepancia que existe entre los valores de precipitación media anual reales, es decir los datos obtenidos de las estaciones de la macrocuenca Magdalena-Cauca facilitadas por el IDEAM, y los datos obtenidos de la interpolación de estas.

$$BE (\%) = \left| \frac{X_{real} - X_{medido}}{X_{real}} \right| * 100 \quad (27)$$

El error estandarizado medio (MSE) y el error medio cuadrático estandarizado (RMSS), permiten evaluar de manera general que tan acertado es el modelo a la hora de hacer predicciones y reflejar la variabilidad de los datos empleados (Interstate Technology Regulatory Council, 2016).

La ecuación para hallar el MSE se presenta a continuación, donde σ es el error estándar de la predicción, que equivale a la desviación estándar de kriging (dato de salida de una de las ecuaciones que emplea el modelo). El valor obtenido debe acercarse a cero.

$$MSE = \frac{\sum_{i=0}^n (X_{real i} - X_{medido i}) / \sigma_i}{n} \quad (28)$$

El error medio cuadrático estandarizado (RMSS) debería aproximarse a uno, si los errores estándares de predicción son válidos. Si el RMSS es mayor a 1, se estaría subestimando la variabilidad en las predicciones. Por el contrario, si el error se encuentra por debajo de 1, existe una sobrevaloración en la variabilidad de los datos predichos.

$$RMSS = \sqrt{\frac{(\sum_{i=0}^n (X_{real i} - X_{medido i}) / \sigma_i)^2}{n}} \quad (29)$$

Una vez se validaron los datos de precipitación, se procedió a calcular la temperatura media anual de la zona. Para ello se emplearon los datos de altura del MED y se utilizó la ecuación de regresión de temperatura media anual para la zona andina (Vélez, Poveda, & Mesa, 2000), donde se asume que ésta es una función lineal que depende de la altitud:

$$\bar{T}_{Anual} = \bar{T}_{Anual (z=0)} + ELR * z \quad (30)$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

donde z es la altura sobre el nivel del mar para un punto específico de la cuenca (expresada en km), ELR es la tasa de cambio de la temperatura con la altura (igual a -5.6517 K/km) y $T_{Anual (z=0)}$ es la temperatura media anual a nivel del mar (igual a $+28.3079^{\circ}\text{C}$).

Por último, se calculó la lámina de evapotranspiración (real y potencial) de la cuenca mediante el uso de métodos indirectos. Las ecuaciones de Turc (1954), Coutagne y Cenicafé (1989-1997), permitieron calcular la lámina de evapotranspiración real - ETR. Luego se cuantificó la lámina de evapotranspiración potencial - ETP teniendo en cuenta la relación propuesta para tanque evaporímetro: i.e. la ETR calculada equivale al 70% de la ETP. Los métodos indirectos empleados son los siguientes:

Tabla 2-3. *Métodos indirectos empleados para cuantificar la evapotranspiración real.*

<p>Turc (1954)</p>	$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}} ; \text{ si } \left(\frac{P}{L}\right) > 0.316$ $\text{Si } \left(\frac{P}{L}\right) \leq 0.316 \rightarrow ETR = P$ $L = 300 + 25 * \bar{T} + 0.05 * \bar{T}^3$	<p>ETR: evapotranspiración real (mm/año) P: lámina de precipitación media anual (mm/año) T: temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$)</p>
<p>Coutagne</p>	$ETR = P - \gamma * P^2 ;$ $\text{si } \frac{1}{8\gamma} < P < \frac{1}{2\gamma}$ $\text{Si } P < \frac{1}{8\gamma} \rightarrow ETR = P$ $\text{Si } P > \frac{1}{2\gamma} \rightarrow ETR = 0.20 + 0.035 * \bar{T}$ $\gamma = \frac{1}{0.8 + 0.14 * \bar{T}}$	<p>ETR: evapotranspiración real (m/año) P: lámina de precipitación media anual (m/año) T: temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$)</p>
<p>Cenicafé (1989-1997)</p>	$ETR = 4.658 * e^{(-0.0002 * z)}$	<p>ETR: evapotranspiración real (mm/día) z: altura sobre el nivel del mar (m.s.n.m)</p>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.1.4 Calibración del modelo SHIA y simulación hidrológica para el escenario histórico

Para la calibración del modelo de simulación hidrológica SHIA se emplearon funciones objetivo para las variables de las que depende el mismo. Dichas funciones objetivo se ajustan mediante tres criterios de bondad de ajuste para evaluar la proximidad de los datos de caudal simulados que arroja el modelo hidrológico y los datos de caudal observado con los que se compara.

Se cuantificaron los valores de 14 parámetros del modelo de simulación hidrológica (Ver Tabla 2-4) como óptimos dentro de intervalos propuestos en la literatura, ya que no existen datos medidos de los mismos para el área en estudio.

Tabla 2-4. Variables de entrada que requiere el modelo hidrológico SHIA.

Información general	
Área total de drenaje de cuenca hidrográfica [km ²]	
Parámetros	
Capacidad máxima de almacenamiento capilar, H_u [mm]	(0,600)
Permeabilidad del estrato <i>superior</i> del suelo, K_s [mm/día]	(1,100)
Permeabilidad del estrato <i>inferior</i> del suelo, K_p [mm/día]	(0,40)
Pérdidas subterráneas, X_5 [mm/día]	(0,10)
Tiempo de residencia - flujo superficial, Tr_2 [días]	(1,10)
Tiempo de residencia - flujo subsuperficial, Tr_3 [días]	(1,10)
Tiempo de residencia - flujo base, Tr_4 [días]	(50,200)
Condiciones iniciales, t=0 [mm]	
Almacenamiento capilar, H_1 (t=0)	(0,20)
Almacenamiento del flujo superficial, H_2 (t=0)	(0,10)
Almacenamiento gravitacional z sup o almacenamiento del flujo subsuperficial, H_3 (t=0)	(0,30)
Almacenamiento gravitacional z inf (acuífero) o almacenamiento del flujo subterráneo, H_4 (t=0)	(0,2000)
Ponderación de estaciones meteorológicas	
BELMIRA	(0,1)
ARAGON	(0,1)
Otros parámetros	
Exponente de infiltración, α	(0,5)
Exponente de evapotranspiración, β	(0,5)

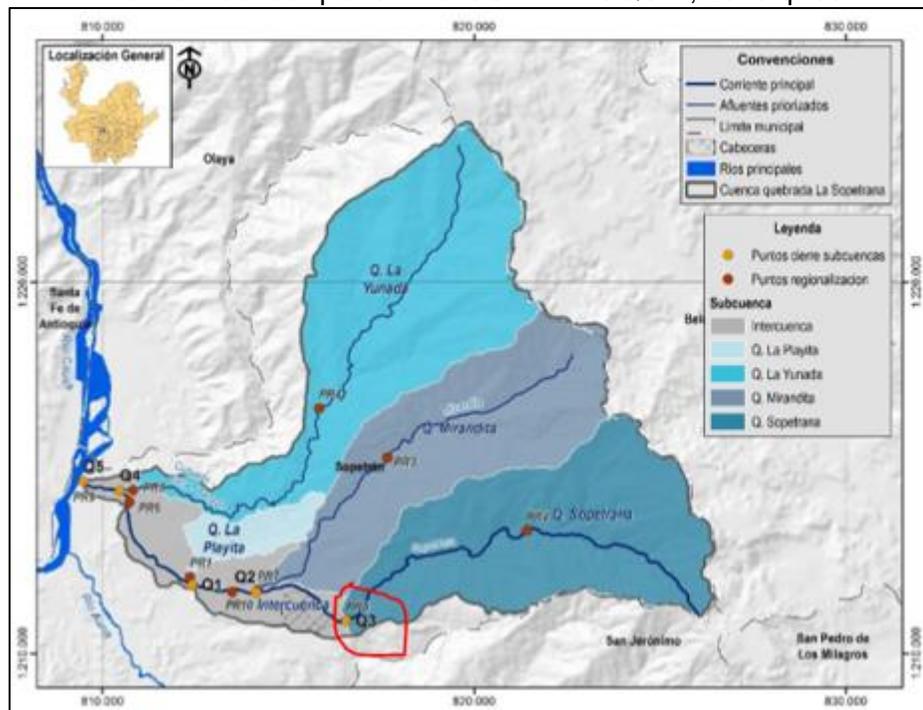
El modelo hidrológico fue ejecutado con registros diarios de precipitación y evapotranspiración. Para la precipitación se utilizó la información disponible de las

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

estaciones más cercanas al área de estudio (Aragón y Belmira) para un período de tiempo comprendido entre los años 1987 y 1996. Se eligió este período de tiempo para establecer la línea base histórica, ya que la serie de caudales medios diarios observados que se emplearon para ajustar el modelo SHIA era para dicho período.

Cabe destacar que la serie de caudales medios diarios observados, soportados por la autoridad ambiental con jurisdicción en el municipio (CORANTIOQUIA), correspondían al punto Q3 aguas arriba de la cabecera municipal de Sopetrán omitiendo la parte baja de la cuenca (Ver **Error! Reference source not found.**). Sin embargo, la simulación hidrológica se realizó teniendo en cuenta toda la cuenca aquí delimitada (116 km²), lo que implica una subestimación en los caudales medios diarios simulados. Se consideraron estos datos, ya que no se cuenta con estaciones limnimétricas dentro del área de estudio.

Figura 2-2. Localización del punto de cierre de la subcuenca de la Quebrada La Sopetrana Q3. Nota: Adaptado de "Informe Final. Fase I Declaratoria y Fase II Diagnóstico. Plan de ordenamiento del recurso hídrico-PORH- Quebrada La Sopetrana. Informe Técnico" por CTA & CORANTIOQUIA, 2016. p.86.



El ajuste del modelo de simulación hidrológica SHIA fue definido a partir de la cuantificación de tres errores: el error porcentual (BE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE).

El error porcentual permite observar la discrepancia relativa que existe entre el caudal medio observado (Q_{obs}) y el caudal medio simulado (Q_{sim}). Para este error se considera un

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

umbral de aceptación de 80% de bondad de ajuste según Molnar. P (2011 citado en Ruiz, 2016). Ver ecuación 27, descrita anteriormente.

La raíz del error cuadrático medio refleja la magnitud de la desviación que existe entre las series de caudal observado y caudal simulado. El RMSE puede tomar valores entre 0 e infinito, pero entre más cercano a cero sea el valor más exactitud existirá entre ambas series. Según Singh et al. (2004 citado en (EIA & GOTTA INGENIERÍA S.A.S., 2014)), el valor de RMSE (cuya ecuación se presenta a continuación) será aceptable si éste es menor a la desviación estándar de los datos de referencia.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{N}} \quad (31)$$

El coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE) “determina la magnitud relativa de la varianza de los residuales comparada con la varianza de la muestra de referencia” (EIA & GOTTA INGENIERÍA S.A.S., 2014). En otras palabras, indica que tanto se ajustan las series de caudal observado y simulado a una línea unitaria 1:1. Este índice varía entre infinito y 1, siendo éste el valor óptimo.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=0}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (32)$$

Esta calibración se realiza con dos fines: el primero es ajustar los parámetros de entrada del modelo hidrológico al área de estudio, y el segundo es ajustar los datos simulados a los datos observados y obtener el comportamiento hidrológico de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana para un escenario histórico que sirve como línea base. Una vez se calibró el modelo SHIA y se obtuvo la simulación base de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana, se llevó a cabo la simulación hidrológica para un escenario prospectivo. Esta aproximación permitió analizar el cambio potencial que ejerce el cambio climático sobre la oferta hídrica.

2.2 Cambio potencial en la oferta hídrica en la cuenca estudiada, para un horizonte prospectivo de mediano plazo

Se recalcularon la precipitación, temperatura y evapotranspiración para el escenario prospectivo de interés y se realimentó el modelo hidrológico SHIA para analizar el comportamiento hidrológico a futuro.

2.2.1 Cálculo de los parámetros de precipitación, temperatura y evapotranspiración para el escenario prospectivo a mediano plazo

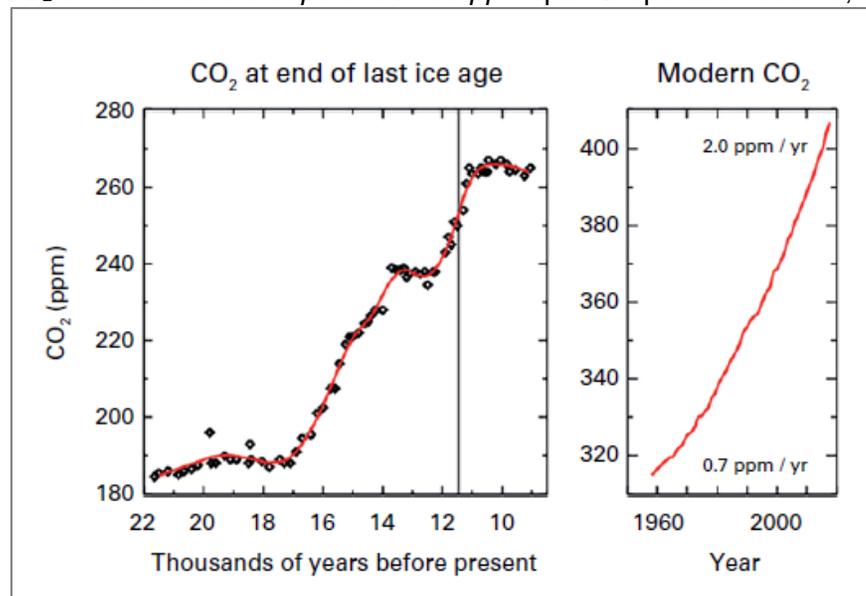
La determinación de la precipitación, temperatura y evapotranspiración de la zona para el escenario prospectivo se llevó a cabo siguiendo el mismo esquema empleado para el escenario histórico. Para el caso de la precipitación, se emplearon los resultados de la implementación de la técnica de reducción de escala Método Delta basado en Cuartiles (Q-

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Q Delta Method) a los resultados de simulaciones prospectivas de tres modelos de circulación global que han sido priorizados para el contexto colombiano (Ruiz et al., en publicación). Se seleccionó el horizonte prospectivo de corto a mediano plazo 2016-2040, así como la Trayectoria de Concentraciones Representativas 8.5 (RCP 8.5) del más reciente informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático – IPCC.

Las Trayectorias de Concentraciones Representativas se emplean para realizar proyecciones, basándose en la relación que existe entre emisiones antropogénicas de GEI, crecimiento poblacional, desarrollo económico, estilos de vida, consumo energético, patrones de uso del suelo, tecnología y política climática (IPCC, 2014). Se seleccionó la trayectoria RCP 8.5 ya que a pesar de ser el escenario de mayor forzamiento radiactivo, se observa un aumento acelerado en las concentraciones de GEI, específicamente de CO₂ (ver Figura 2-3) y una falta concreta de implementación en las políticas orientadas a limitar el cambio climático, lo que lo convierte en un escenario cada vez más plausible.

Figura 2-3. Concentración de CO₂ en la atmósfera. Nota: Adaptado de “La concentración de CO₂ en la atmósfera supera los 400 ppm” por Grupo Ecoindustria, 2017.



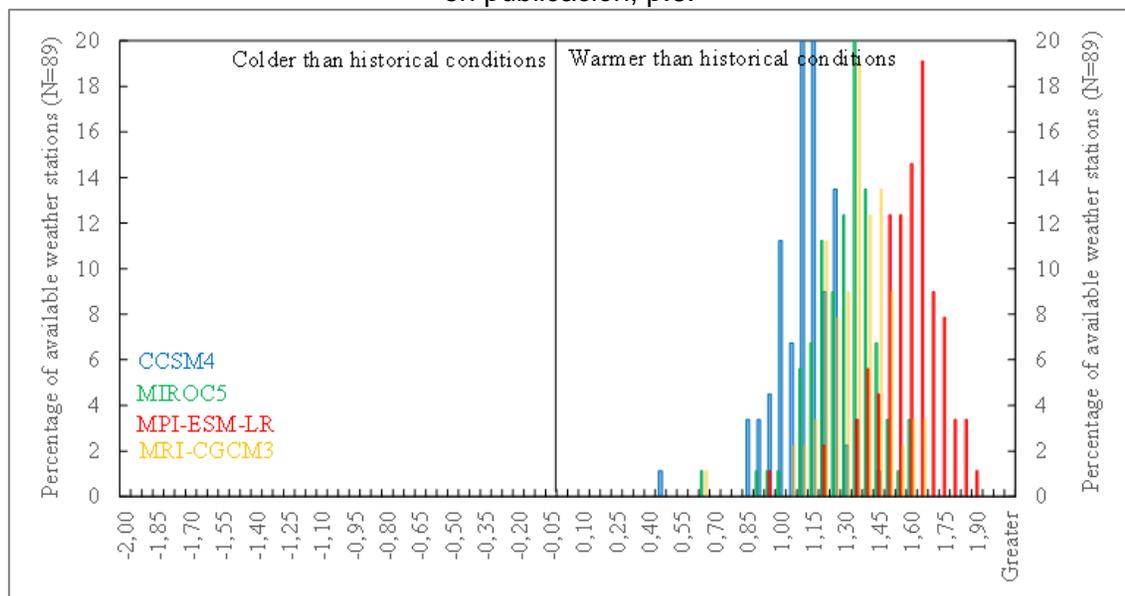
Los modelos de circulación seleccionados son: el *GISS-E2-R*, propuesto por el Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA; el *MPI-ESM-MR*, desarrollado por el Instituto Meteorológico de Max Planck; y el modelo *MRI-CGCM3*, planteado por el Instituto Meteorológico de Investigación de la Agencia Meteorológica de Japón. La información de simulaciones prospectivas, a escala de estación, fue interpolada nuevamente en la plataforma SIG de este trabajo de grado mediante el método de interpolación de *Kriging con Deriva Externa* usando nuevamente el MED como segundo conjunto de datos de entrada.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Se calculó la nueva distribución altitudinal de la temperatura media del aire considerando la ecuación para la zona andina descrita anteriormente y teniendo en cuenta un incremento proyectado de +1.6°C según los resultados de implementación de la técnica de reducción de escala de k^{th} Nearest Neighbor (kNN) a las salidas prospectivas del modelo MPI-ESM-LR bajo el escenario RCP 8.5, teniendo en cuenta las medianas de las anomalías del percentil 90° de temperaturas promedio diarias (Ruiz et al., en publicación).

Figura 2-4. Histograma de frecuencia de anomalías del percentil 90° (T_{90}) de temperaturas medias diarias luego de la implementación de la técnica de reducción de escala k^{th} Nearest Neighbor (kNN) a las salidas prospectivas de 4 modelos de circulación global.

Nota: Adaptado de “Escenarios de cambio climático y variabilidad climática en la macrocuenca Magdalena-Cauca para el horizonte prospectivo 2015-2040” por Ruiz et al., en publicación, p.6.



Las láminas de evapotranspiración se calcularon de la misma manera que se propuso para el escenario histórico, pero considerando las magnitudes de precipitación y temperatura proyectadas.

2.2.2 Simulación hidrológica para el escenario prospectivo

Se ejecutó nuevamente la versión calibrada del modelo de simulación hidrológica SHIA para las láminas de precipitación y evapotranspiración proyectadas, así como para las condiciones de temperatura media sugeridas para el horizonte prospectivo de corto a mediano plazo 2016-2040. Los resultados de simulación permitieron observar como podría ser el comportamiento hidrológico de la cuenca hidrográfica de interés para un escenario futuro, lo cual permite evaluar el cambio potencial que se genera sobre la oferta hídrica, teniendo en cuenta la línea base establecida.

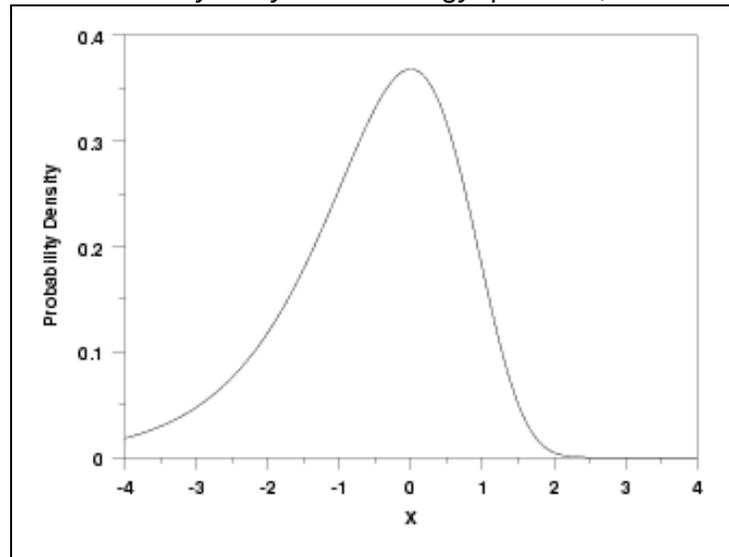
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.2.3 Determinación de los cambios en la oferta hídrica

Se analizaron los datos obtenidos (históricos y prospectivos) mediante (I) la comparación de los percentiles P_{50} y $P_{97.5}$ de ambas simulaciones a partir de sus curvas de duración de caudal, (II) la comparación de la oferta hídrica superficial histórica y prospectiva con el caudal mínimo para un período de retorno de 10 años, (III) los respectivos ciclos anuales y (IV) las resultantes rachas de días secos consecutivos.

Para hallar el caudal mínimo para un período de retorno de 10 años, se consideraron los caudales mínimos anuales de la serie de caudales medios diarios observados (período 1987-1996) y se asumió que estos se ajustaban a la función de distribución de probabilidad de valores extremos tipo I (Gumbel), que se muestra en la Figura 2-5.

Figura 2-5. Distribución de valores extremos tipo I (Gumbrel). Nota: Adoptado de "Probability in Hydroclimatology" por Ruiz, 2016.



Para calcular el caudal mínimo para el período de retorno de 10 años, se empleó la función de distribución acumulada de Gumbel $F(x)$, dada por:

$$F(x) = 1 - e^{-e^{\left(\frac{x-\xi}{\alpha}\right)}} \quad (33)$$

donde $F(x)$ se expresa en términos del período de retorno $F(x) = 1 - (1/T_r)$, x representa el caudal mínimo para un tiempo de retorno determinado y ξ y α son estimativos de la función Gumbel que dependen de la desviación estándar (SD) y la media (\bar{X}).

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot SD \quad \text{y} \quad SD = \bar{X} - (0.5772 \cdot \alpha) \quad (34)$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.3 Análisis del efecto del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana y posibles medidas de mitigación

Se identificaron en primera instancia los factores que inciden en mayor medida sobre la oferta hídrica. Al mismo tiempo se estableció la demanda hídrica superficial total (DHST) dentro del área de estudio, para luego determinar la presión antrópica potencial que se ejerce sobre la cuenca de La Sopetrana. Finalmente, se presentaron escenarios de conflicto por usos de agua alrededor del mundo para luego proponer posibles medidas de mitigación que podrían aplicarse en la zona analizada.

2.3.1 Identificación de factores causales que inciden sobre la oferta hídrica

Se evaluaron las variables climáticas determinadas tanto para el escenario histórico como para el prospectivo de corto a mediano plazo. Esta evaluación permitió observar como el cambio climático podría afectar estas variables, las cuales inciden en la respuesta hidrológica de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.

2.3.2 Establecimiento de la demanda hídrica superficial total (DHST) para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana

Se emplearon los datos disponibles en el PORH de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana de las concesiones de agua existentes hasta el año 2016, tanto de usuarios naturales como jurídicos legalizados. Se utilizó además la información secundaria disponible de usuarios no legalizados, a partir de los reportes del proyecto 'Temas Inherentes a la Aplicación de los Decretos 3100 de 2003 y 3440 de 2004' de CORANTIOQUIA (Ruiz, 2005) .

2.3.3 Determinación de la presión antrópica sobre la oferta hídrica

Se cuantificó la presión antrópica sobre la oferta hídrica como el cociente entre la demanda hídrica superficial total y la oferta hídrica superficial total.

2.3.4 Presentación de escenarios de conflicto por usos de agua en el mundo

Se consultaron casos globales de conflictos por usos de agua, para identificar diferentes escenarios que podrían ocurrir para la zona aquí estudiada, debido a que esta es un área crítica por el déficit que existe en el recurso hídrico. El análisis de estos casos permitió dar una idea de lo que puede llegar a ocurrir a nivel social, cuando hay conflictos por la escasez hídrica en un área poblada; y de esta manera resaltar la importancia que existe en generar políticas y programas que promuevan la protección de las cuencas hidrográficas para así garantizar en un futuro agua a la población.

2.3.5 Posibles medidas de adaptación para la aplicación de estas en el área

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

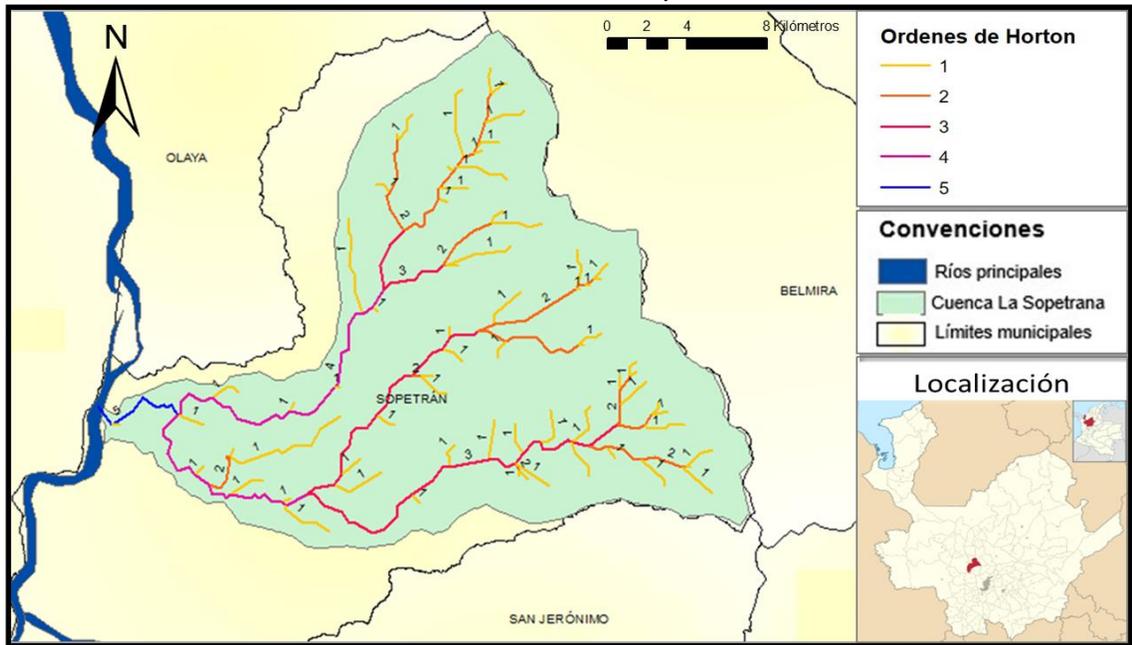
de estudio

Se propuso un conjunto de medidas de adaptación al cambio climático para la zona de estudio, con el fin de orientar a las autoridades correspondientes y a la comunidad en general a tomar medidas que disminuyan la posibilidad de enfrentar escenarios de escasez en el futuro. Con respecto a las autoridades ambientales, es de particular interés incorporar riesgos asociados al cambio climático en las políticas de ordenamiento del recurso hídrico.

Tabla 3-1. *Parámetros físicos para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.*

Cuenca de estudio	Área (km ²)	Perímetro (km)	Longitud cauce principal (km)	Longitud red hídrica (km)	Ancho medio (km)	Densidad de drenaje (km/km ²)
La Sopetrana	116.37	55.32	22.13	111.80	5.26	0.96

Mapa 3-2. *Orden de las corrientes según la jerarquización de Horton, dentro de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.*



3.1.1.2 Parámetros morfométricos de forma

Para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana, el coeficiente de Gravelius es de 1.45, lo que significa que la cuenca tiene una forma oval oblonga como se muestra en la Tabla 3-2 (Henaos (1988 citado en Ortiz-Vera, 2015)). Adicionalmente, el índice infiere que no se da una concentración acelerada de los flujos superficiales dentro del área de estudio (Ortiz-Vera, 2015).

Tabla 3-2. *Formas de sistemas hidrológicos con base en el coeficiente de Gravelius, Nota: Adaptado de "Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica" por Ortiz-Vera, 2015, p.28.*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Formas de sistemas hidrológicos con base en el coeficiente de Gravelius		
Clase de geometría	Rango de clase	Forma de cuenca
K_{ca}	$1 < K_{ca} \leq 1.25$	Oval redonda
K_{ca}	$1.25 < K_{ca} \leq 1.50$	Oval oblonga
K_{ca}	$1.50 < K_{ca} \leq 1.75$	Oblonga alargada

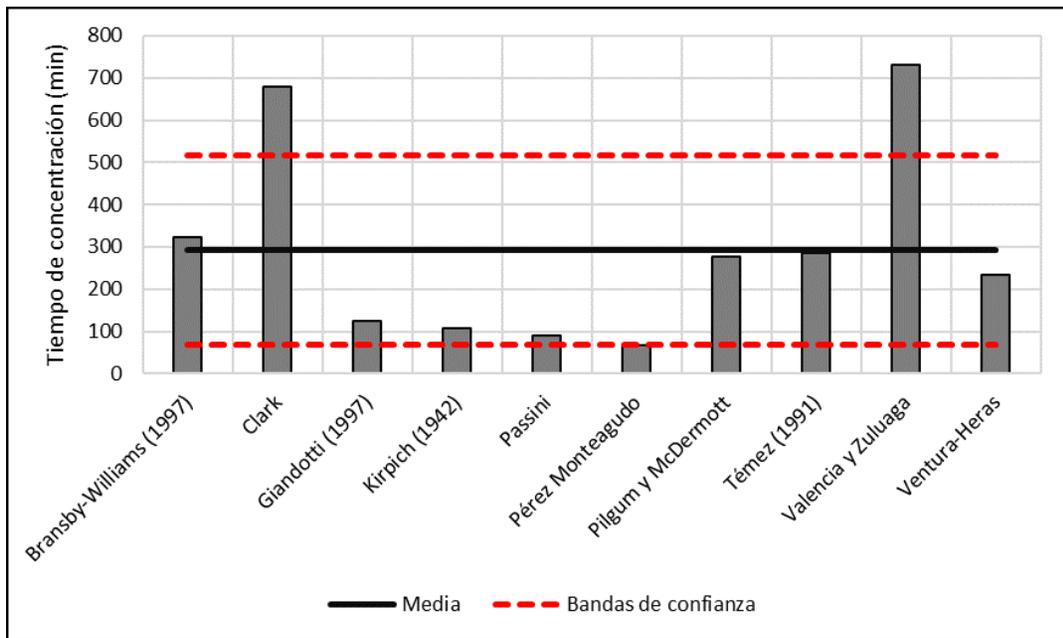
El factor de Horton es de 0.24 para el área de estudio, lo que significa que la cuenca de La Sopetrana es menos propensa a crecientes. Esto es congruente con la información inferida mediante el coeficiente de Gravelius.

El tiempo de concentración se calculó a partir de 7 ecuaciones empíricas, las cuales arrojaron valores que se encontraban dentro del intervalo definido por las bandas de confianza. El tiempo de concentración exhibido por la cuenca aquí analizada es de aproximadamente 300 minutos (5 horas), siendo este alto debido a que el flujo superficial no se concentra tan rápidamente. En la Tabla 3-3 y Figura 3-1, se presentan los resultados obtenidos, en donde se descartaron las ecuaciones de Clark, Pérez Monteagudo y Valencia y Zuluaga por no cumplir con el criterio establecido.

Tabla 3-3. *Tiempos de concentración para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana obtenidos mediante diferentes ecuaciones empíricas.*

Método	tc (minutos)	Tc (horas)
Bransby-Williams (1997)	321.44	5.36
Clark	677.93	11.30
Giandotti (1997)	124.79	2.08
Kirpich (1942)	106.34	1.77
Passini	91.17	1.52
Pérez Monteagudo	66.62	1.11
Pilgum y McDermott	277.96	4.63
Témez (1991)	285.48	4.76
Valencia y Zuluaga	732.08	12.20
Ventura-Heras	232.70	3.88

Figura 3-1. *Tiempos de concentración en minutos para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana obtenidos mediante diferentes metodologías.*



3.1.1.3 Parámetros morfométricos de relieve

A continuación, se presentan los valores obtenidos para la cuenca.

Tabla 3-4. *Parámetros de relieve para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.*

Cuenca de estudio	Cota máxima de la cuenca (m.s.n.m)	Cota mínima de la cuenca (m.s.n.m)	Pendiente media de la cuenca (%)	Pendiente media del cauce principal (%)
La Sopetrana	3,039	437	40.63	9.51

Se presenta también la curva hipsométrica (Figura 3-3), a partir de la cual se puede inferir la maduración o edad de una cuenca, como se muestra en la Figura 3-2. Se observa que más del 50% del área se encuentra por encima de la altura media de la cuenca, que es de 1,617 m.s.n.m. Adicionalmente, la curva encontrada se asemeja a la curva B de la Figura 3-2, lo que quiere decir que la cuenca de la Quebrada La Sopetrana se encuentra en una fase de madurez, y por tanto el potencial erosivo no es tan alto.

Figura 3-2. *Curvas hipsométricas.* Nota: Adaptado de “¿Qué es una curva hipsométrica?” por Rojas, 2015.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

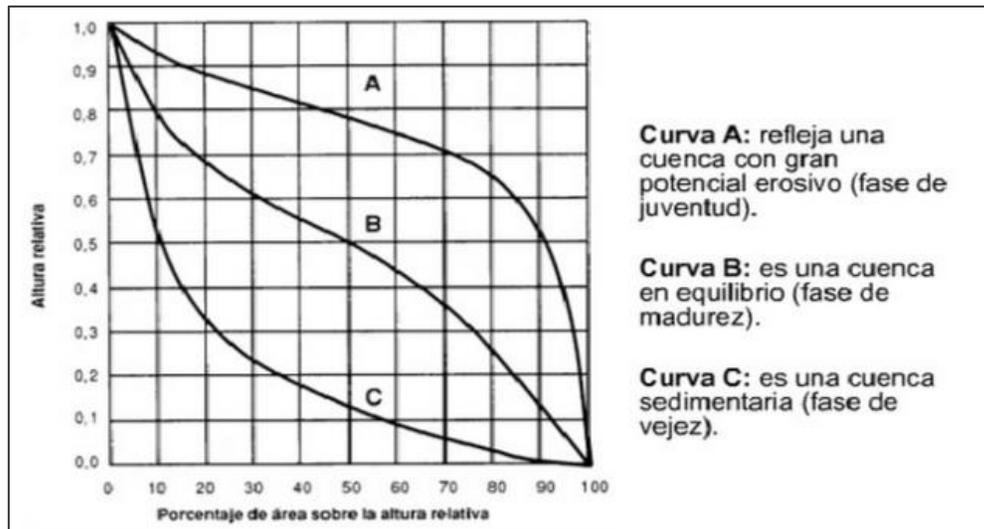
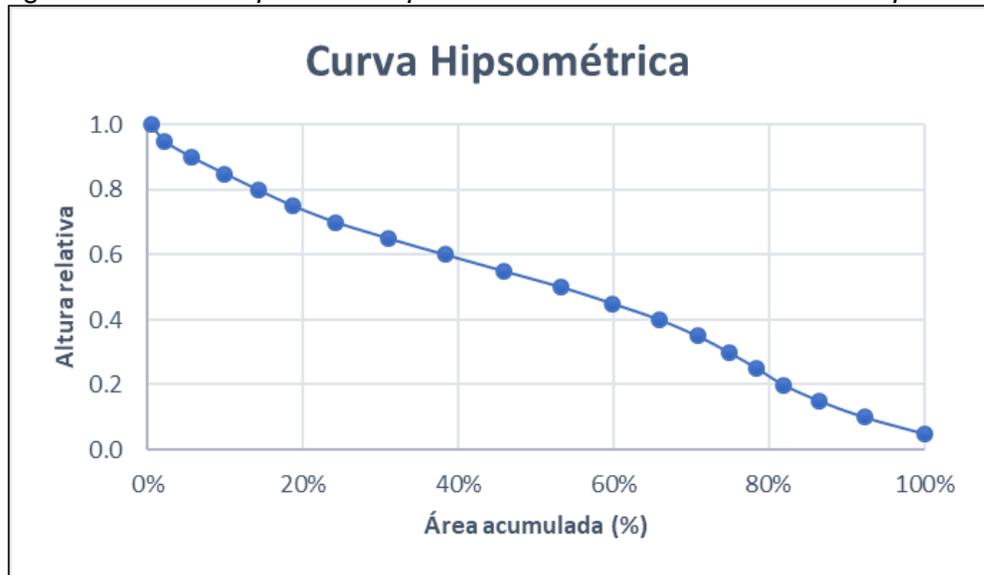


Figura 3-3. Curva hipsométrica para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.



Lo anterior se valida mediante el valor del área bajo la curva calculada. Para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana se obtuvo una integral hipsométrica de 49.7% lo cual, según la clasificación de Strahler (1952 citado en García González, 2014), representa una cuenca en equilibrio (estado de madurez).

Adicionalmente, se presenta el histograma de frecuencias altimétricas (ver Figura 3-4), donde se puede observar la variación probabilística de la altura en la cuenca de la Quebrada La Sopetrana. En la Figura 3-5 se presenta el perfil altitudinal del cauce principal en el cual se especifican las zonas de aporte, transporte y depósito.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Figura 3-4. Histograma de frecuencias altimétricas para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.

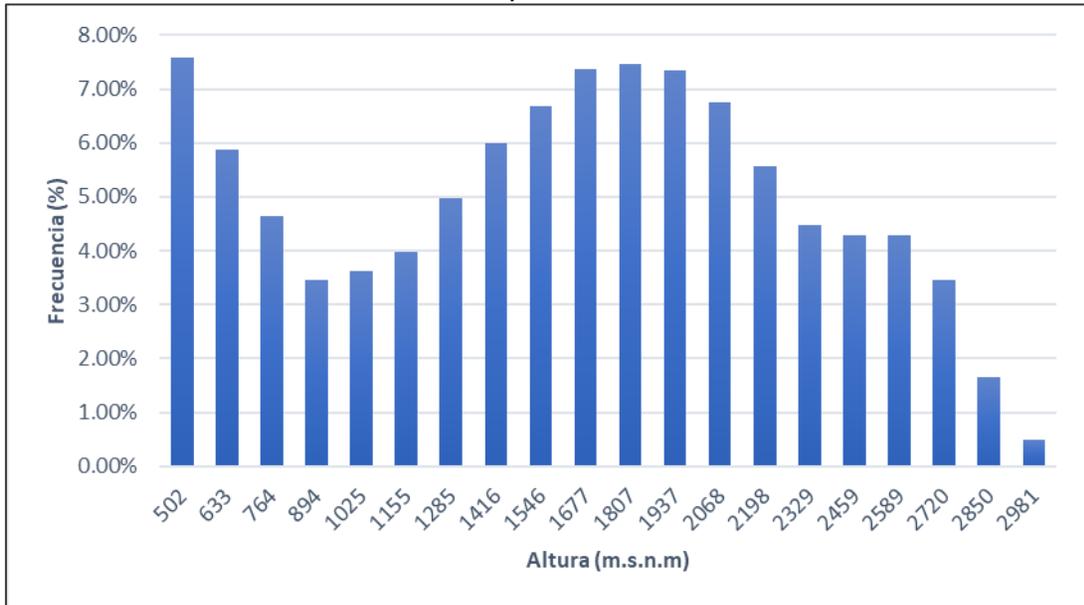
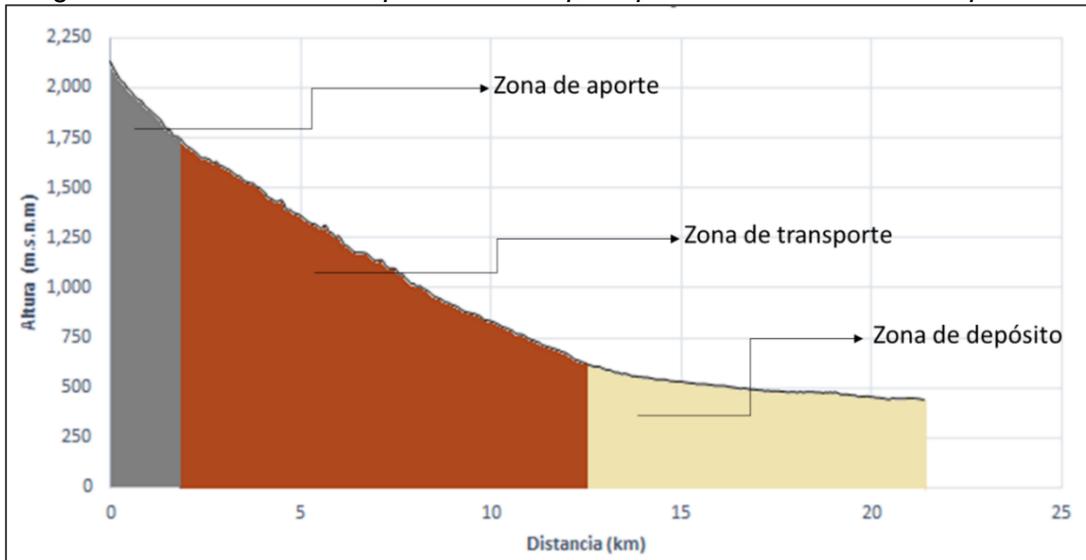


Figura 3-5. Perfil altitudinal para el cauce principal de la Quebrada La Sopetrana



3.1.2 Verificación y validación de la información generada a partir de datos existentes

La verificación y validación se llevó a cabo mediante la comparación de los datos obtenidos y la información disponible en el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH) para la Quebrada La Sopetrana. Se calculó el error porcentual que existe entre los diferentes

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

datos morfométricos (Ver Tabla 3-5). Obsérvese que el mayor error porcentual está por debajo del 10% y corresponde a la pendiente media de la cuenca hidrográfica. Esto se debe fundamentalmente a la diferencia en la resolución espacial utilizada para el desarrollo de los análisis.

Tabla 3-5. Comparación entre los parámetros morfométricos calculados y los establecidos en el PORH de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.

PARÁMETROS FÍSICOS			
Datos	Calculados	PORH	Error porcentual (%)
Área (km ²)	116.37	115.5	0.75
Perímetro (km)	55.32	58	-4.62
Longitud cauce principal (km)	22.13	21.8	1.51
PARÁMETROS DE FORMA			
Índice de compacidad o de Gravelius	1.45	1.5	-3.33
Factor de forma de Horton	0.24	0.24	0.00
PARÁMETROS DE RELIEVE			
Cota máxima de la cuenca (m.s.n.m)	3,039	3,048	-0.30
Cota mínima de la cuenca (m.s.n.m)	437	439	-0.46
Pendiente media de la cuenca (%)	40.63	44.3	-8.28

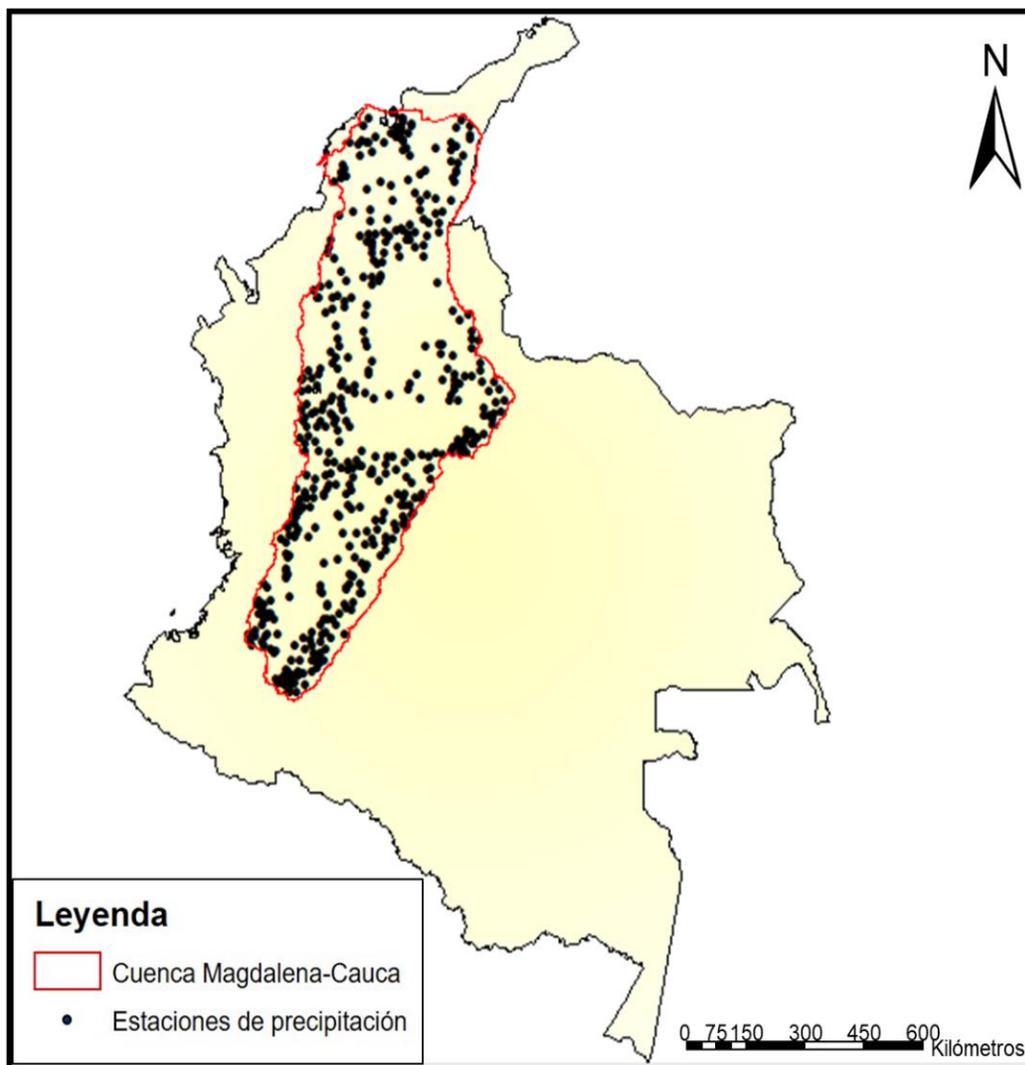
3.1.3 Cálculo de los parámetros de precipitación, temperatura y evapotranspiración para el escenario histórico

3.1.3.1 Precipitación

En el Mapa 3-3 se muestra la distribución de las 485 estaciones con registros de precipitación utilizadas para determinar la distribución espacial de la lámina de lluvia media anual para el área en estudio.

Mapa 3-3. Distribución de las 485 estaciones con registros de precipitación del IDEAM en la cuenca Magdalena-Cauca.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Se validaron los datos de la interpolación mediante la comparación entre la lámina de precipitación media anual real y la predicha para cada una de las 485 estaciones empleadas. En la Figura 3-6 se observan las estaciones donde hay sobreestimaciones y subestimaciones de los datos. Se evaluó también el histograma de frecuencia de errores con el fin de determinar en qué intervalo de error se concentra la mayoría de los datos predichos por el método geoestadístico, encontrándose un intervalo entre el -10% y el 10%, lo que implica una estimación confiable de la lámina de precipitación media anual (Ver Figura 3-7).

Figura 3-6. *Comparación de la lámina de precipitación media anual real y la predicha mediante el método de interpolación de Kriging con Deriva Externa.*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

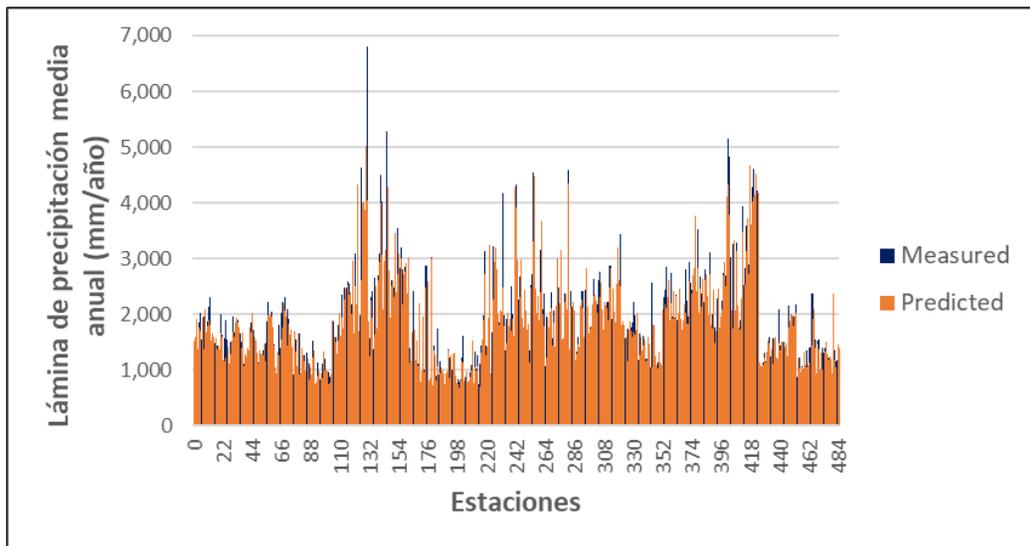
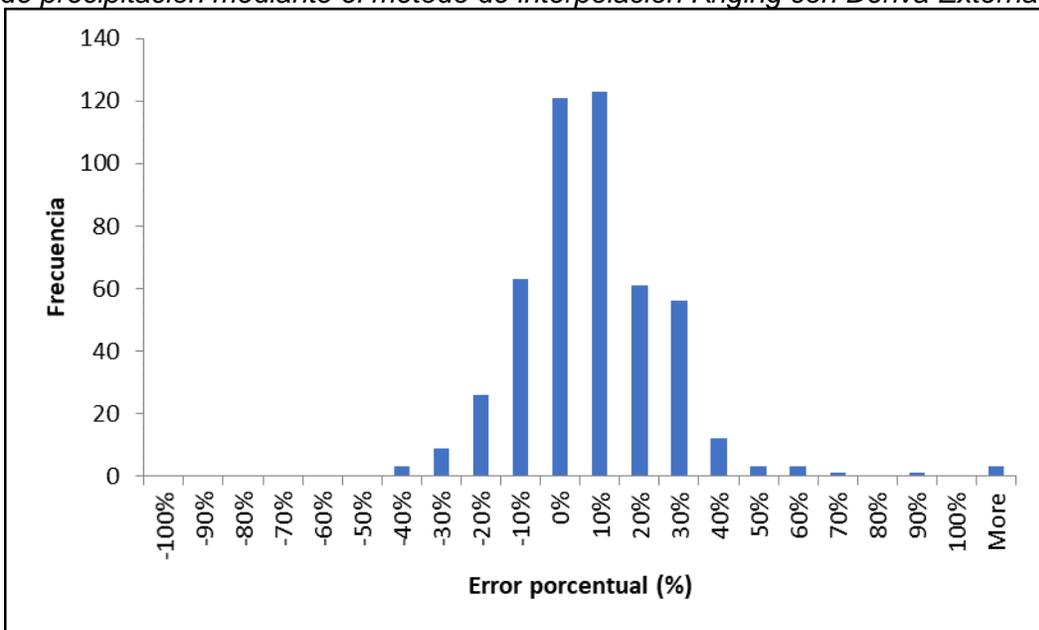


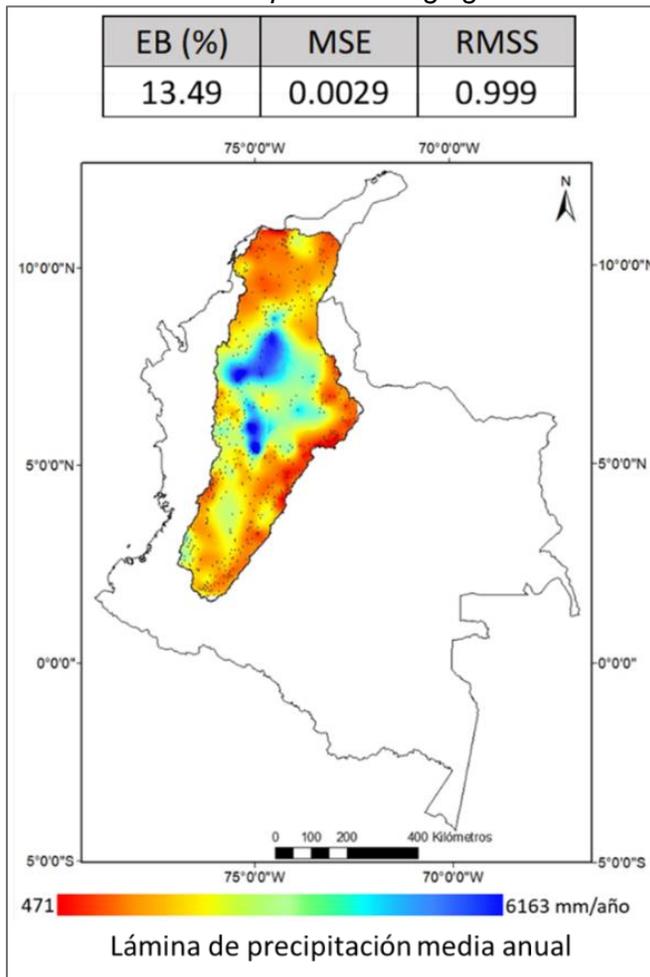
Figura 3-7. Histograma de frecuencia del error porcentual para la estimación de la lámina de precipitación mediante el método de interpolación Kriging con Deriva Externa.



Se presentan además los errores medios calculados (BE, MSE y RMSS), donde se encontró que en términos generales el método geoestadístico *Kriging con Deriva Externa* representa acertadamente la variabilidad de los datos de entrada y presenta una alta certidumbre respecto a los valores reales (Ver Figura 3-8).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

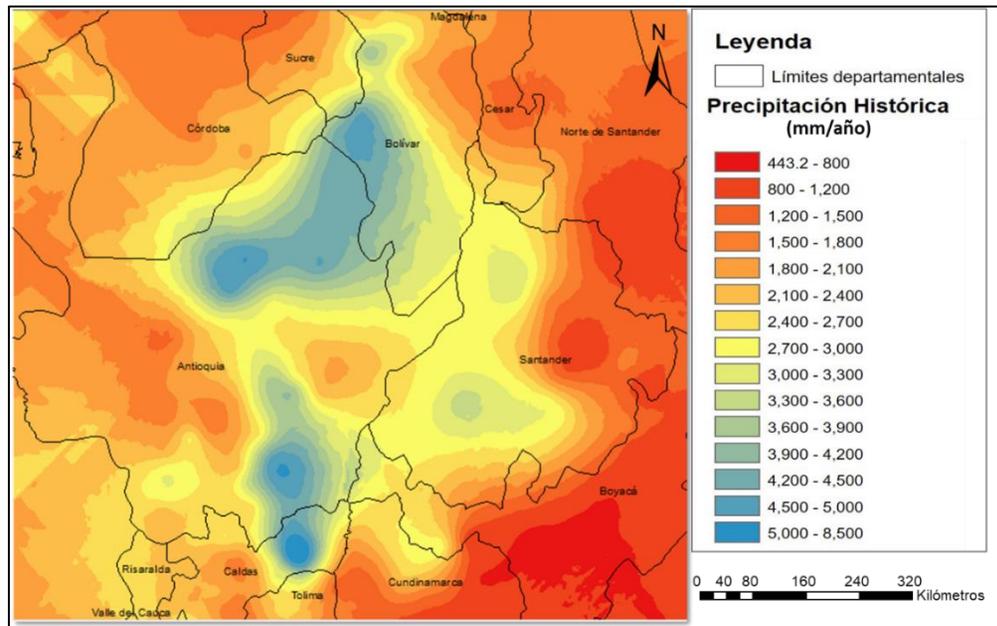
Figura 3-8. Errores medios calculados para los datos de lámina de precipitación hallados a partir del método de interpolación Kriging con Deriva Externa.



En el Mapa 3-4 se muestra el resultado de la interpolación, específicamente para el departamento de Antioquia. Dicho mapa se comparó con el mapa de precipitaciones de Hurtado & Mesa (2015), con el fin de verificar los datos obtenidos y validarlos.

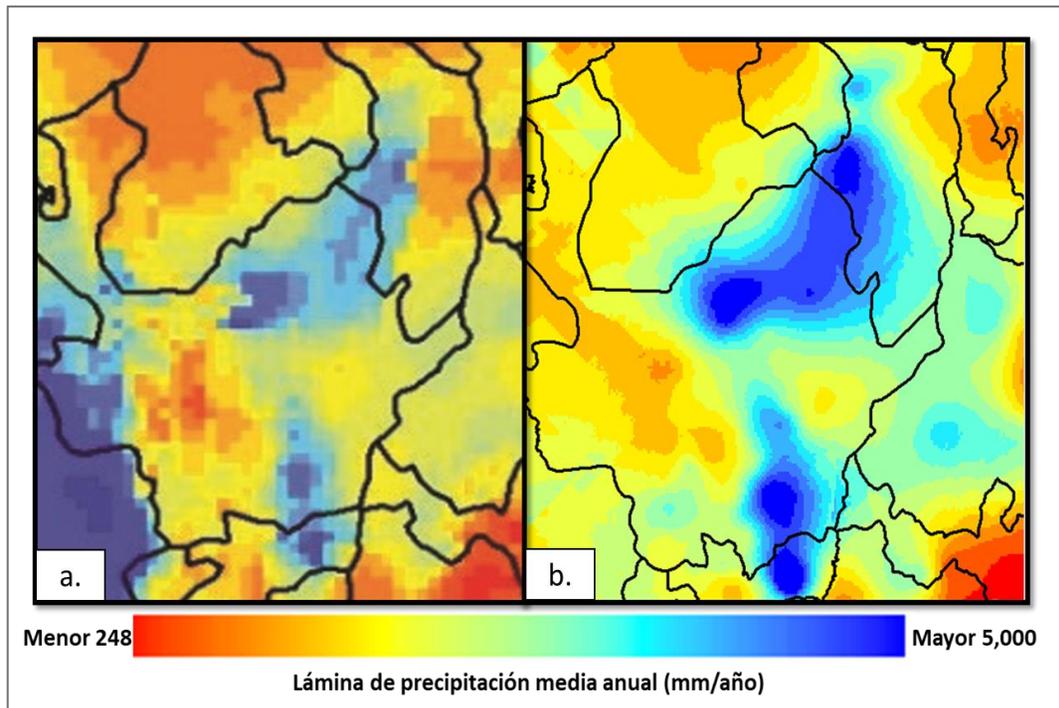
Mapa 3-4. Distribución de la lámina de precipitación histórica para el departamento de Antioquia, generado mediante el método de interpolación de Kriging con Deriva Externa.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



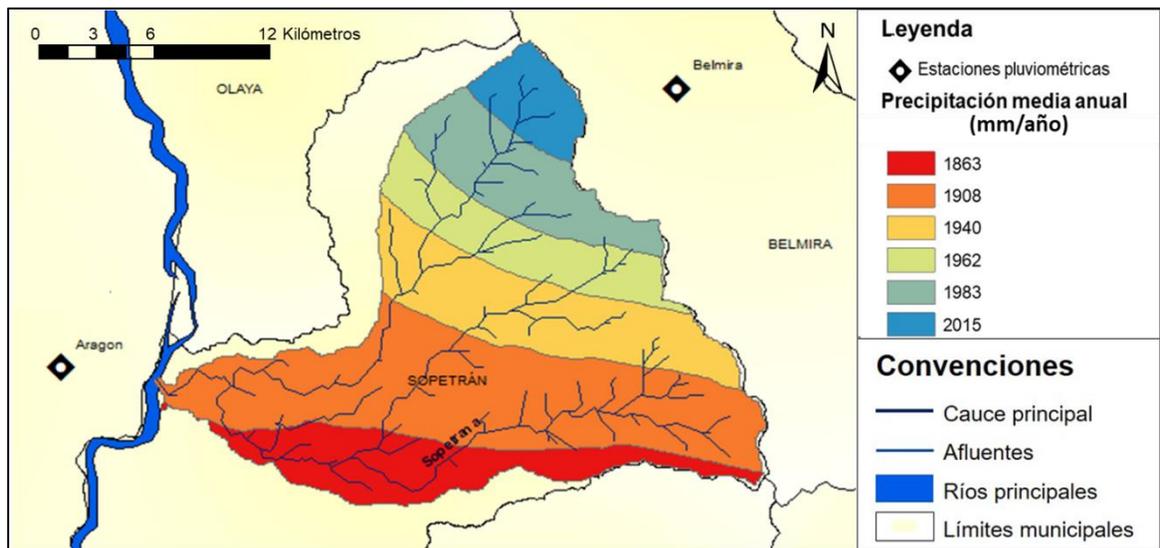
Como se muestra en la Figura 3-9, existen discrepancias entre ambos mapas, en particular en las zonas de Urabá y el Pacífico. Estas zonas se encuentran por fuera de la macrocuenca Magdalena-Cauca, donde están distribuidas las estaciones pluviométricas utilizadas en la interpolación. Por consiguiente, la interpolación presentada en este trabajo no es confiable para estas áreas. Sin embargo, el mapa obtenido muestra coherencia con lo obtenido por Hurtado & Mesa (2015) para el resto de las zonas, por lo que los datos de precipitación obtenidos si se pueden aplicar al área de estudio de esta investigación.

Figura 3-9. Comparación entre a) mapa de precipitación (Hurtado & Mesa, 2015) y b) mapa de precipitación generado mediante la implementación del método de interpolación de Kriging con Deriva Externa.



Las dos estaciones cercanas al área de estudio, Aragón y Belmira, se encuentran en la parte baja y en la parte alta de la cuenca, respectivamente. El error de estimación de la interpolación con respecto a los valores observados asciende al 2.04% para Aragón y al 1.05% para la estación Belmira. Estos errores sugieren que los datos obtenidos mediante la interpolación son confiables. La precipitación media anual promedio para toda la cuenca hidrográfica de la Quebrada La Sopetrana alcanza los 1,929 mm/año (Ver Mapa 3-5).

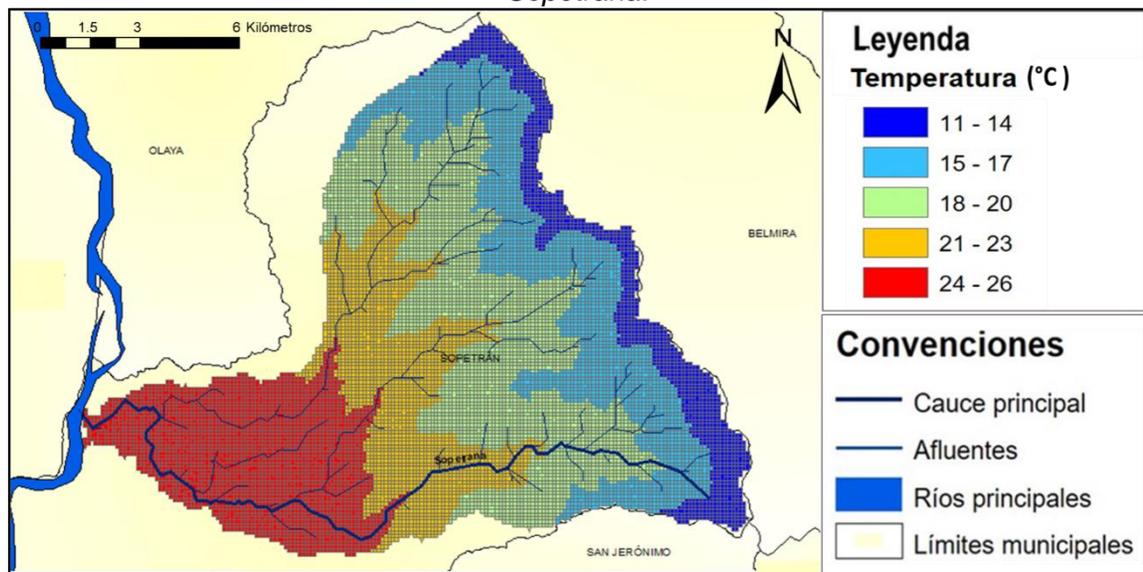
Mapa 3-5. *Distribución espacial de la precipitación media anual en la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.*



3.1.3.2 Temperatura

La distribución espacial de la temperatura media anual en la cuenca hidrográfica de la Quebrada La Sopetrana se muestra en el Mapa 3-6. Se determina además que la temperatura media del área de estudio es de 19.05°C.

Mapa 3-6. *Distribución espacial de la temperatura para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.*



3.1.3.3 Evapotranspiración

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Las láminas de ETP estimadas alcanzan 1,404 mm/año mediante *Turc*, 1,238 mm/año según la ecuación de *Coutagne* 1,766 mm/año según la ecuación de *Cenicafé*. La evapotranspiración potencial promedio asciende a 1,469 mm/año. Teniendo en cuenta que la precipitación media del área de estudio es de 1,929 mm/año, se puede decir que el agua que se pierde por evapotranspiración corresponde al 76% de la precipitación media anual.

3.1.4 Calibración del modelo SHIA y simulación hidrológica para el escenario histórico

En la Tabla 3-6 se presentan los valores hallados para las 14 variables evaluadas a partir de las funciones objetivo (se pueden consultar en las memorias del trabajo), que presentan los menores errores y la mejor representación frente a los datos observados de caudal. Se presentan los errores obtenidos entre la serie de caudal observado y el simulado luego de encontrar los valores óptimos para dichas variables, teniendo en cuenta los rangos óptimos para cada error mencionado (Tabla 3-7).

Tabla 3-6. Valores óptimos encontrados mediante funciones objetivo.

Parámetros	
Capacidad máxima de almacenamiento capilar, H_u [mm]	16.5
Permeabilidad del estrato <i>superior</i> del suelo, K_s [mm/día]	60
Permeabilidad del estrato <i>inferior</i> del suelo, K_p [mm/día]	9
Pérdidas subterráneas, X_5 [mm/día]	0
Tiempo de residencia - flujo superficial, Tr_2 [días]	5
Tiempo de residencia - flujo subsuperficial, Tr_3 [días]	8
Tiempo de residencia - flujo base, Tr_4 [días]	100
Condiciones iniciales, t=0 [mm]	
Almacenamiento capilar, H_1 (t=0)	5
Almacenamiento del flujo superficial, H_2 (t=0)	5
Almacenamiento gravitacional z sup o almacenamiento del flujo subsuperficial, H_3 (t=0)	6
Almacenamiento gravitacional z inf (acuífero) o almacenamiento del flujo subterráneo, H_4 (t=0)	100
Ponderación de estaciones meteorológicas	
BELMIRA	0.5
ARAGON	0.5
Otros parámetros	
Exponente de infiltración, α	(0,5)
Exponente de evapotranspiración, β	(0,5)

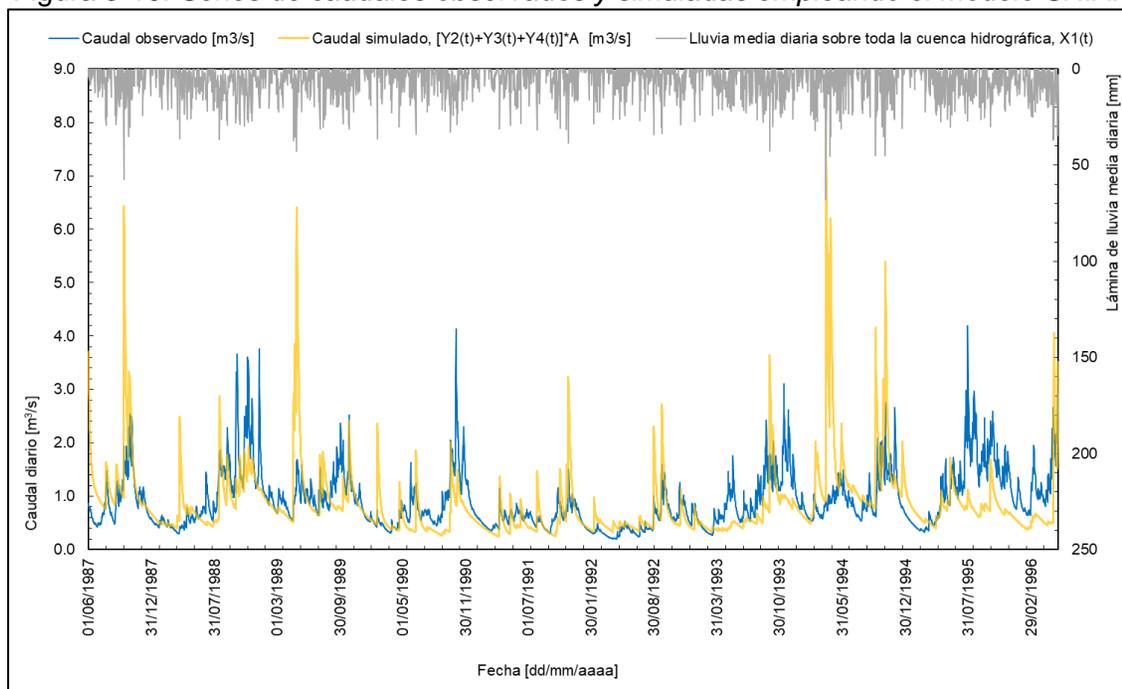
Tabla 3-7. Errores obtenidos en la simulación hidrológica para el escenario histórico.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Q medio simulado [m³/s]	08746	BE [%]	RMSE	NSE
Q medio observado [m³/s]	0.9143	4.343	0.676	-0.674

Adicionalmente, se evalúan las series de caudales observados y simulados obtenidas a partir de la implementación del modelo SHIA. En estas se observa una sobrestimación de caudales en particular para los caudales máximos; sin embargo, para efectos prácticos de este trabajo se desea evaluar la oferta hídrica promedio y mínima que brinda la cuenca y no los picos de caudales máximos (Figura 3-10).

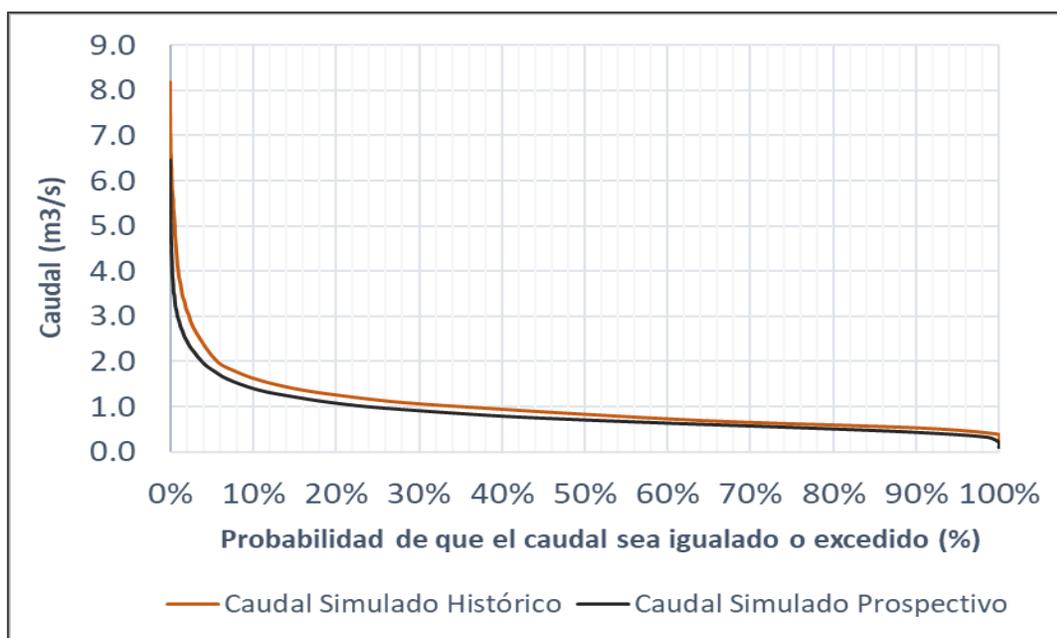
Figura 3-10. Series de caudales observados y simuladas empleando el modelo SHIA.



A partir de la curva de duración real y simulada, se observa que, aunque si se sobrestiman los caudales máximos en la simulación, el comportamiento del caudal es similar para ambas curvas. Ver Figura 3-11.

Figura 3-11. Curvas de duración de caudales de las serie observada y simulada.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



3.2 Cambio potencial en la oferta hídrica en la cuenca estudiada, para un horizonte prospectivo de mediano plazo

3.2.1 Cálculo de los parámetros de precipitación, temperatura y evapotranspiración para el escenario prospectivo a mediano plazo

En este trabajo de investigación se optó por utilizar el escenario más crítico sugerido por los modelos climáticos globales, el cual corresponde al RCP 8.5 sugerido por el IPCC. Esta trayectoria hace referencia al escenario donde no existe una política climática y, por consiguiente, hay un mayor forzamiento por emisiones de gases de efecto invernadero (Armenta et al., 2014; Enríquez-Alonso, 2016).

3.2.1.1 Precipitación

El análisis de la lámina de precipitación media anual proyectada a futuro incluyó dos aproximaciones: (i) los datos prospectivos de precipitación, a escala de la macrocuenca Magdalena-Cauca, obtenidos luego de la implementación de la técnica de reducción de escala 'Método Delta basado en Cuantiles' a la simulación prospectiva de un modelo de circulación global; y (ii) los datos prospectivos de precipitación obtenidos luego de la implementación de la misma técnica de reducción de escala pero para un conjunto de estaciones representativas de un modelo de circulación global específico. En la primera aproximación se seleccionó el modelo GISS-E2-R, y se interpoló la información de 260 estaciones distribuidas a lo largo de la macrocuenca Magdalena-Cauca. Ver Figura 3-12. Para la segunda aproximación se seleccionaron las herramientas MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3. Los gridpoints denotados F3C1 y F3C2 del modelo MPI-ESM-MR contaban con

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

60 estaciones, distribuidas en los departamentos de Antioquia y Santander. Ver Figura 3-13. Los gridpoints F5C3, F6C2 y F6C3 del modelo MRI-CGCM3 proveen 58 estaciones localizadas en los departamentos de Antioquia y Córdoba. Ver Figura 3-14.

Figura 3-12. Delimitación por gridpoints del modelo GISS-E2-R del área de influencia y distribución de las estaciones utilizadas.

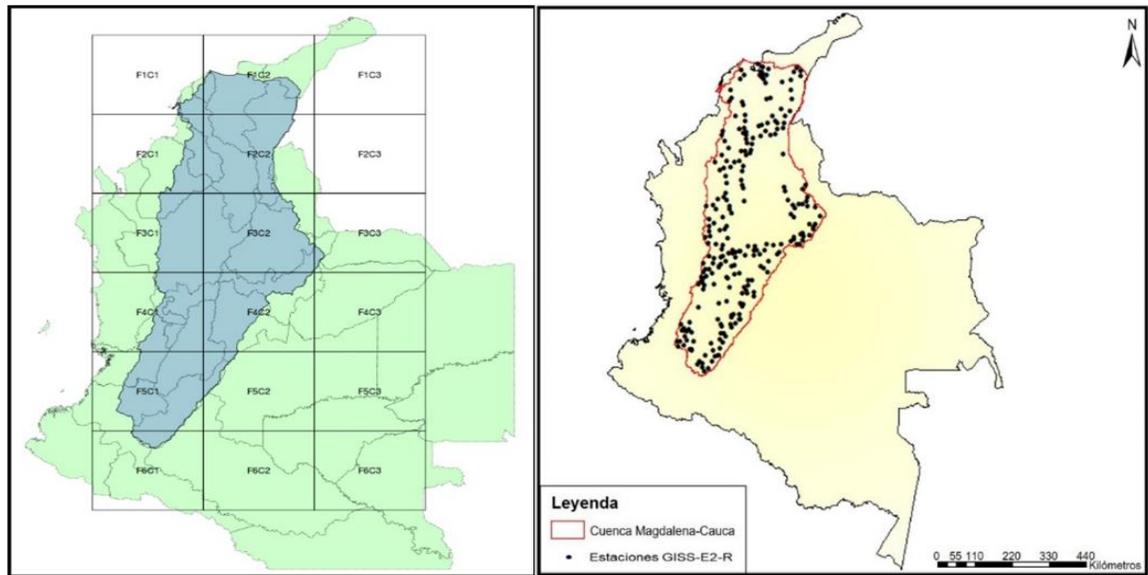
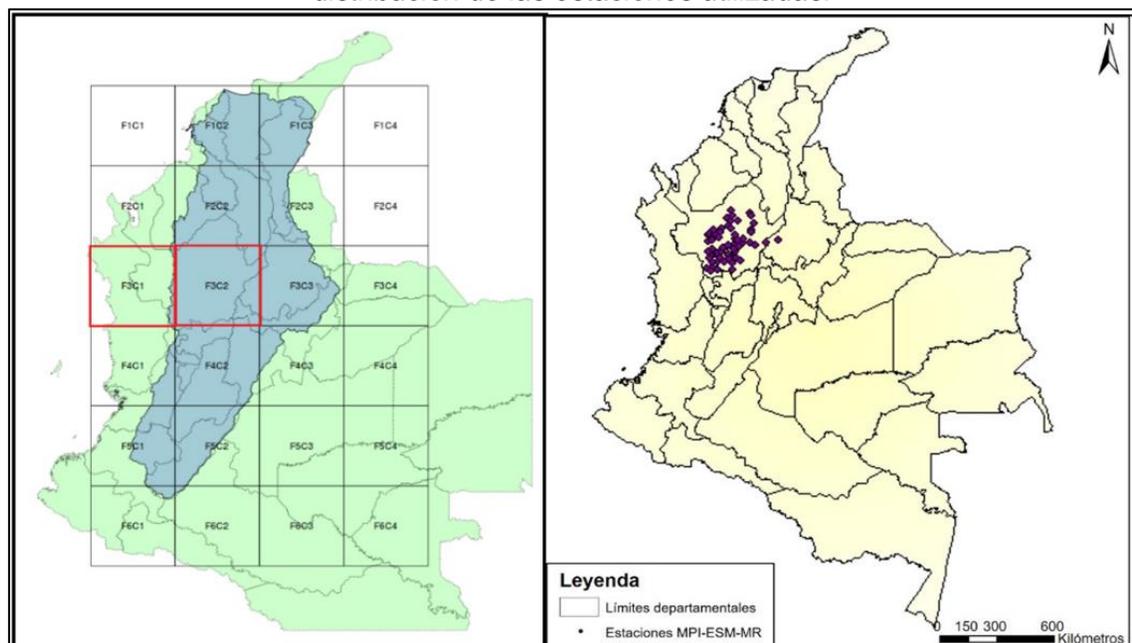
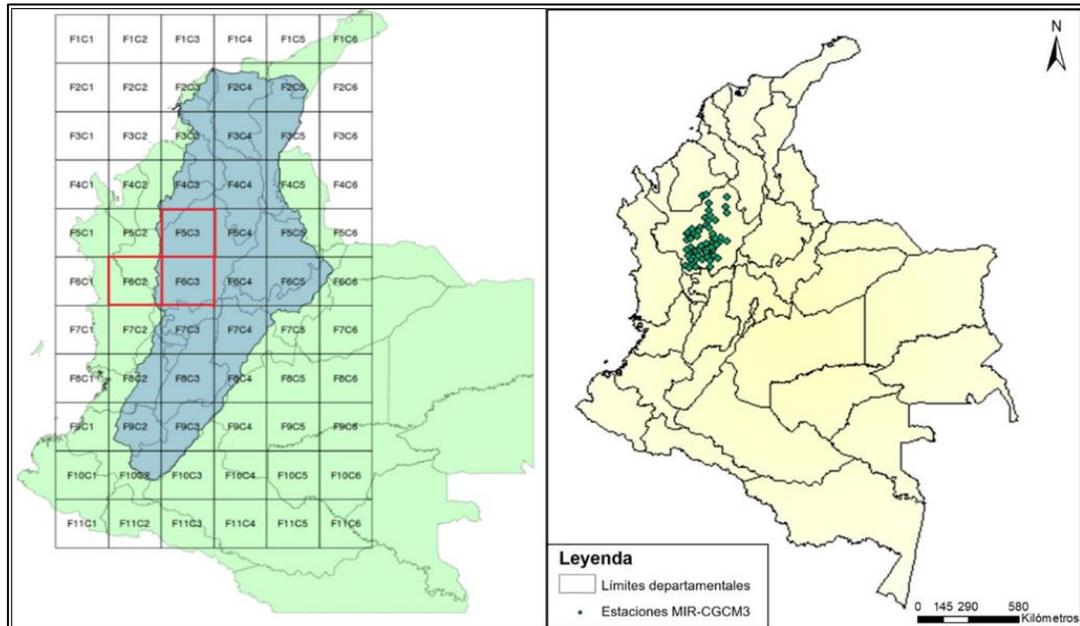


Figura 3-13. Delimitación por gridpoints del modelo MPI-ESM-MR del área de influencia y distribución de las estaciones utilizadas.



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

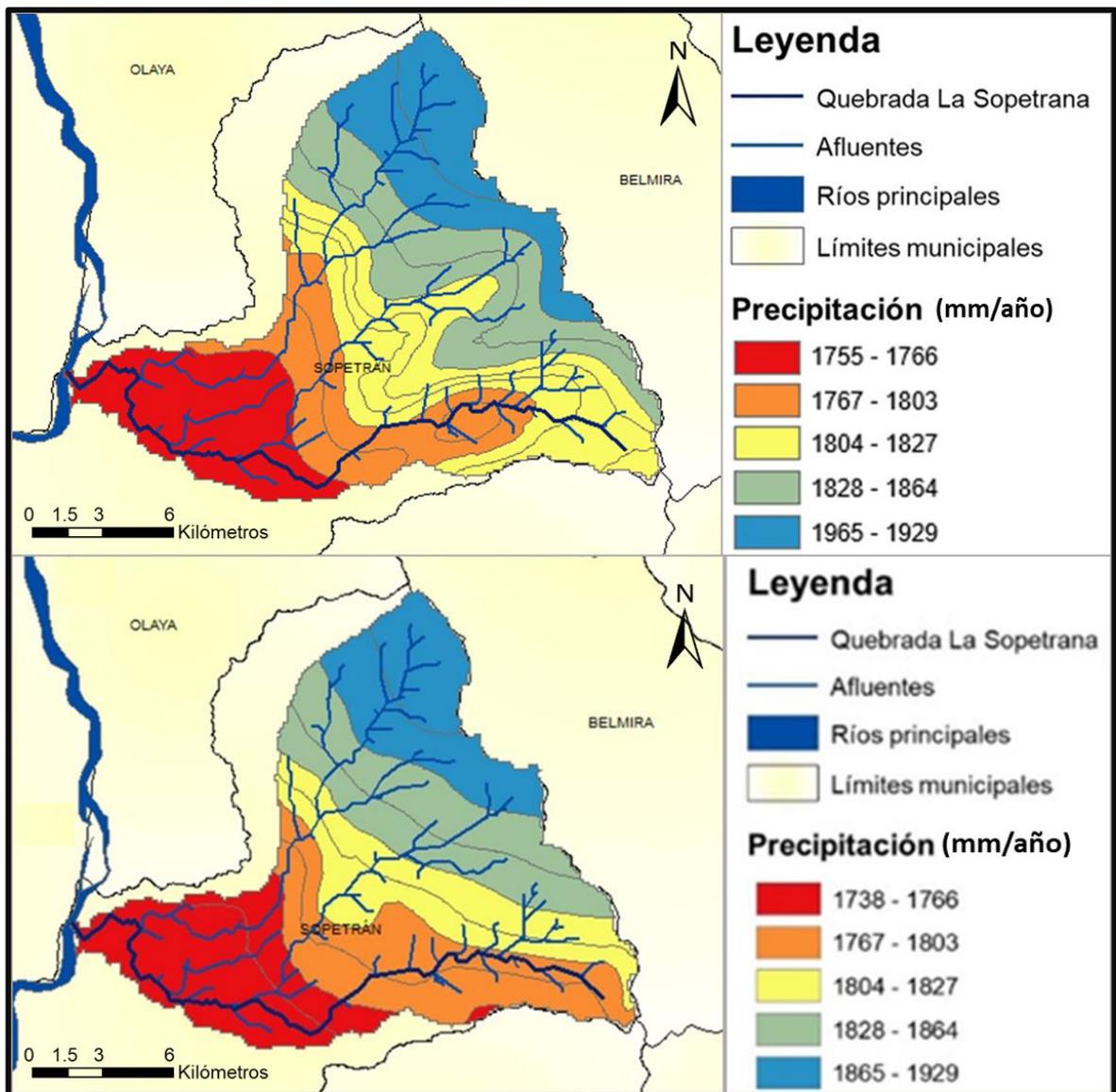
Figura 3-14. Delimitación por gridpoints del modelo MRI-CGCM3 del área de influencia y distribución de las estaciones utilizadas.



Los resultados obtenidos luego de la interpolación por el método geoestadístico de *Kriging con Deriva Externa* de las series sintéticas sugeridas por los tres modelos climáticos empleados se presentan en el Mapa 3-7, Mapa 3-8 y la Tabla 3-8. Los mapas de distribución para el modelo MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3, se presentan de forma comparativa, ya que la lámina de precipitación es similar en ambos. El mapa de distribución de precipitación a partir del modelo GISS-E2-R debe analizarse por separado. Los modelos MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3 estiman valores más extremos de precipitación que el modelo GISS-E2-R, siendo el MRI-CGCM3 el modelo que estima la reducción más alta en la distribución de la lámina de precipitación media anual.

Mapa 3-7. Mapas de distribución de precipitación generados mediante el método de interpolación de *Kriging con Deriva Externa*. De arriba hacia abajo: MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Mapa 3-8. Distribución de precipitación generada mediante el método de interpolación de Kriging con Deriva Externa para el modelo GISS-E2-R.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

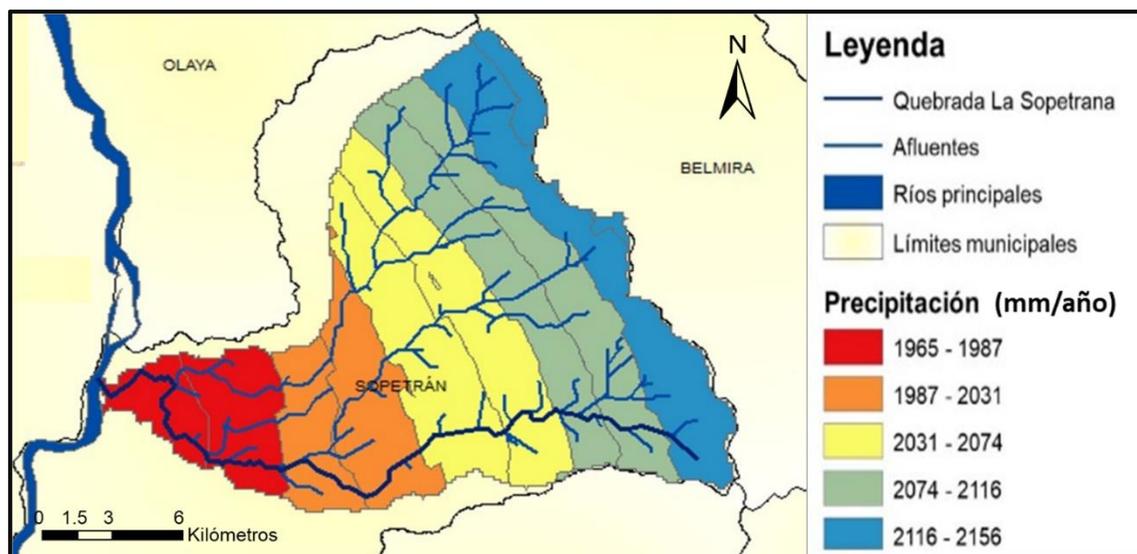
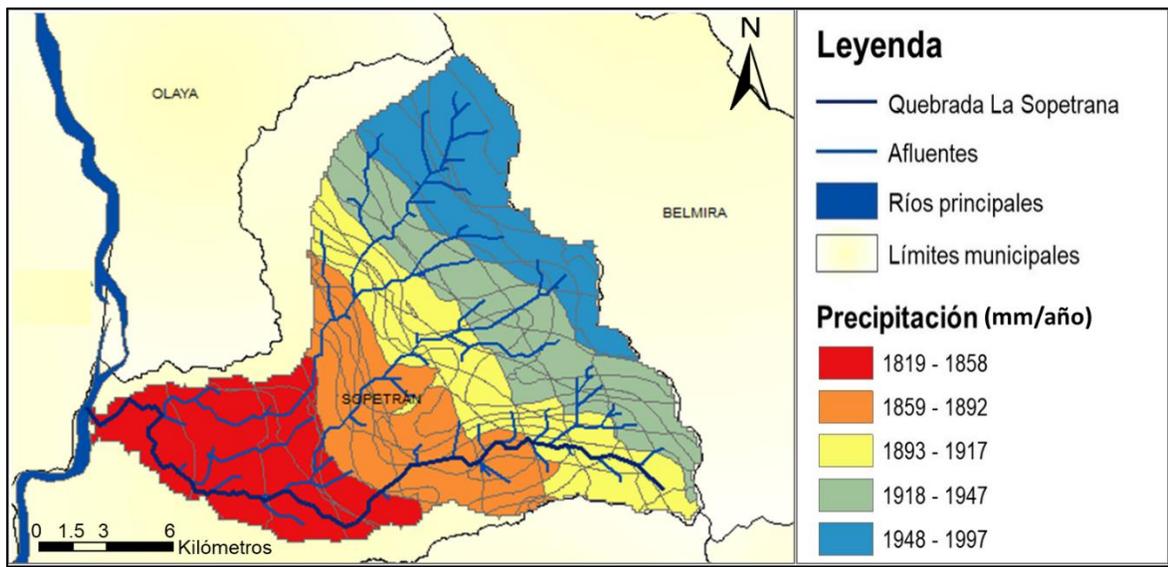


Tabla 3-8. Comparación de láminas de precipitación entre los tres modelos de circulación global empleados.

Modelo climático global	Precipitación (mm/año)		
	Mínima	Máxima	Media
GISS-E2-R	1,965	2,156	2,074
MPI-ESM-MR	1,755	1,905	1,818
MRI-CGCM3	1,738	1,929	1,822

En el Mapa 3-9 se presenta la distribución espacial de la precipitación media anual en la cuenca hidrográfica de la Quebrada La Sopetrana, obtenida como un promedio de las distribuciones espaciales sugeridas por los tres modelos de circulación empleados. La precipitación media anual para el horizonte prospectivo 2016-2040 para el área de estudio asciende a 1,906 milímetros al año, lo que implica una reducción con respecto al escenario histórico del 1% aproximadamente.

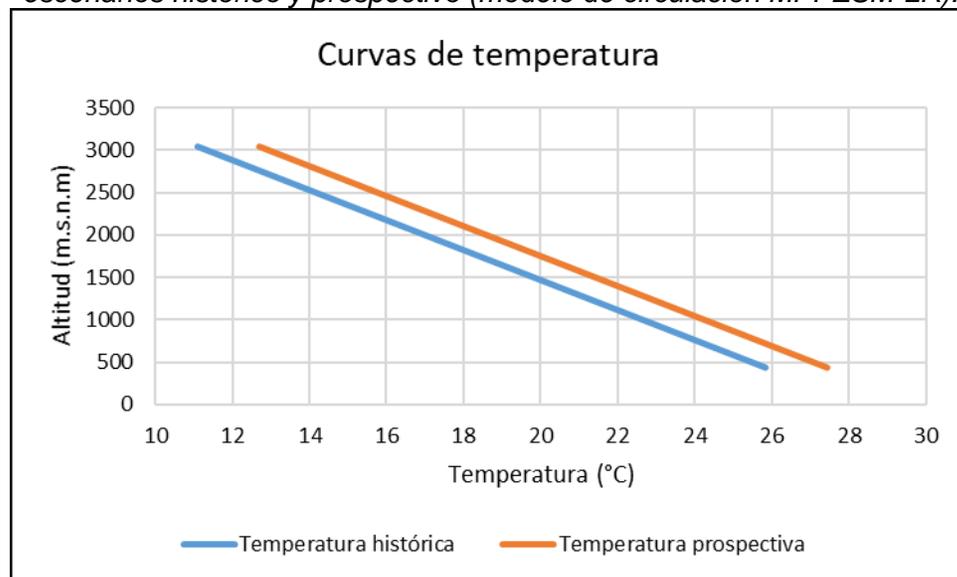
Mapa 3-9. Precipitación media anual en la cuenca de la Quebrada La Sopetrana para el escenario prospectivo 2016-2040.



3.2.1.2 Temperatura

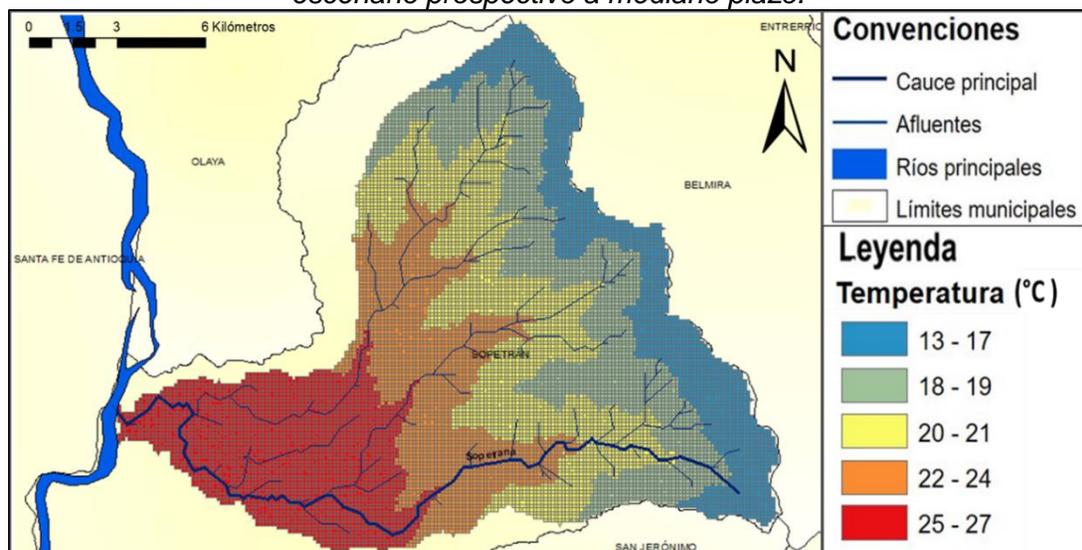
En la Figura 3-15 se muestra la distribución altitudinal de la temperatura media anual para un incremento de $+1.6^{\circ}\text{C}$, sugerido por la implementación de la técnica de reducción de escala de kNN a las simulaciones prospectivas del modelo MPI-ESM-LR. El Mapa 3-10 muestra la distribución espacial correspondiente.

Figura 3-15. *Distribuciones altitudinales de la temperatura media anual para los escenarios histórico y prospectivo (modelo de circulación MPI-ESM-LR).*



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Mapa 3-10. Mapa de temperatura para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana para el escenario prospectivo a mediano plazo.



3.2.1.3 Evapotranspiración

Las láminas de ETP prospectivas ascienden a 1,516 mm/año mediante la ecuación de *Turc*, 1,315 mm/año según *Coutagne* y 1,760 mm/año según *Cenicafé*. La evapotranspiración potencial promedio alcanza entonces los 1,530 milímetros al año. Teniendo en cuenta que la precipitación media del área de estudio proyectada es de 1,906 mm/año, se puede decir que el agua que se podrá perder por evapotranspiración en el futuro corresponde al 80% de la precipitación media anual.

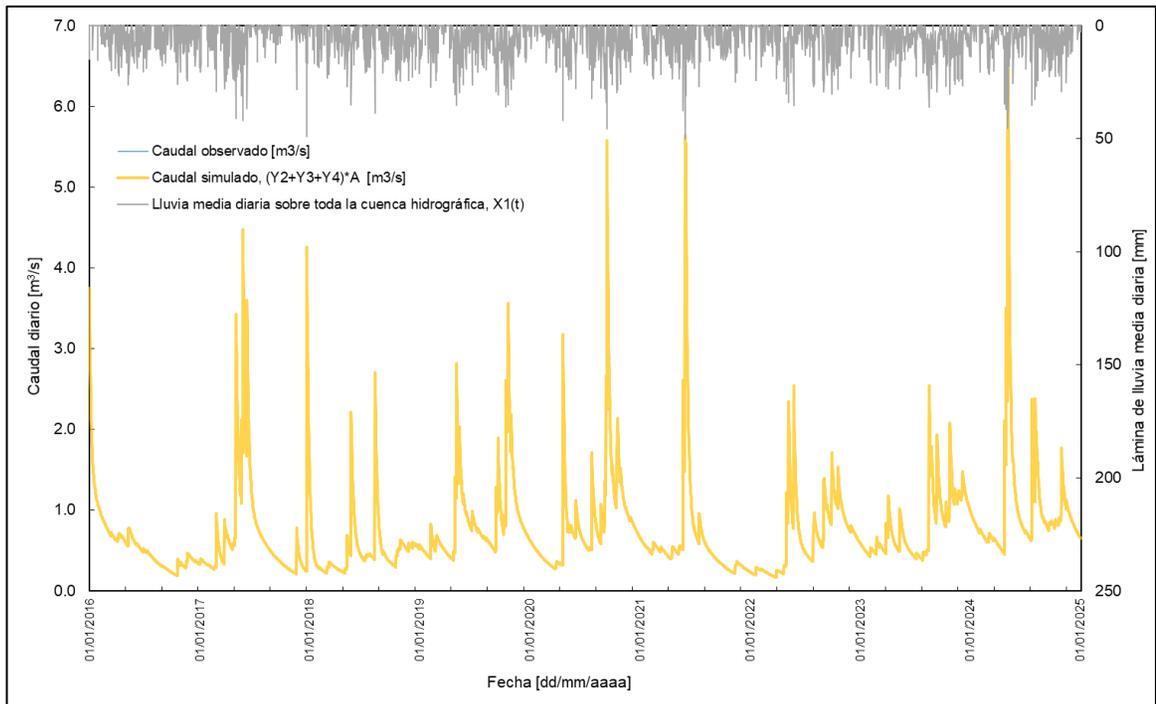
3.2.2 Simulación hidrológica para el escenario prospectivo

Para los datos de precipitación, se emplearon nuevamente las estaciones Aragón y Belmira, pero para el escenario a futuro, utilizando los datos de dos modelos climáticos globales: GISS-E2-R y MPI-ESM-MR, los cuales son los menos extremos de los tres contemplados.

Para la estación Aragón se utilizan las series sintéticas del modelo MPI-ESM-MR. Para dicho modelo se tenía un 7% de datos faltantes, por lo que se tomó la decisión de reemplazar los mismos por valores nulos, ya que se encontraban en periodos relativamente secos. Para la estación de Belmira, se emplearon los datos del modelo GISS-E2-R. Para este modelo se tenía un 3% de datos faltantes, por lo que se realizó el mismo procedimiento explicado anteriormente. Una vez determinadas todas las variables de entrada, se corrió la simulación dando como resultado lo presentado en la Figura 3-16.

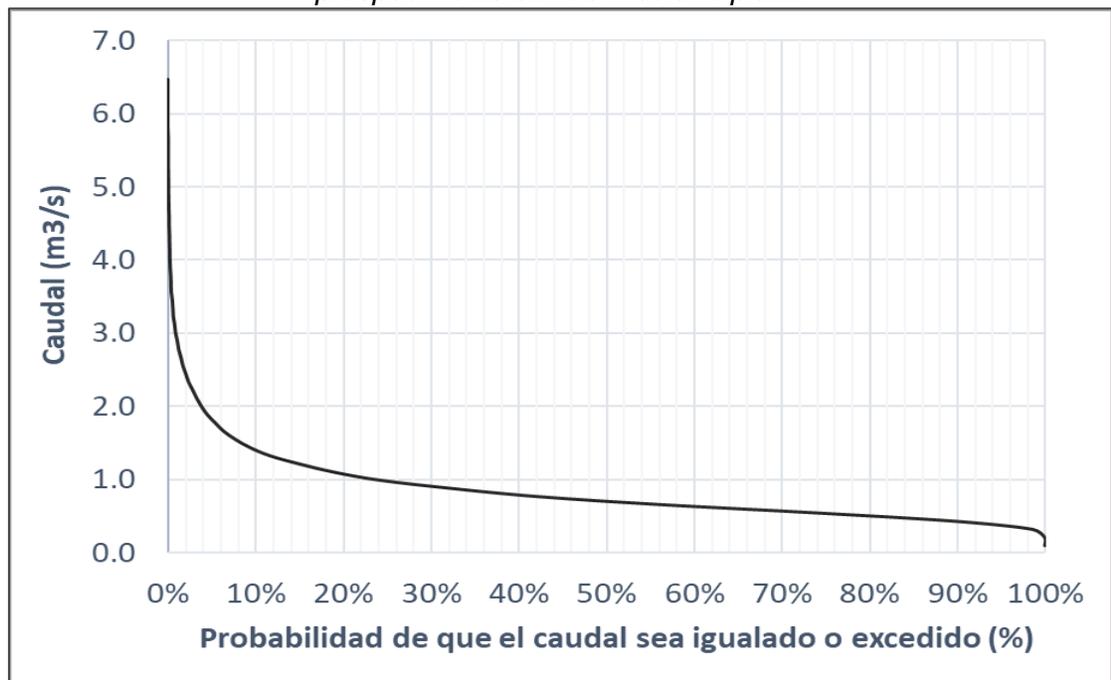
Figura 3-16. Serie de caudales para el escenario prospectivo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Se muestra también la curva de duración para el caudal prospectivo simulado (Figura 3-17).

Figura 3-17. Curva de duración de caudales de la serie simulada para el horizonte prospectivo de corto a mediano plazo.



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

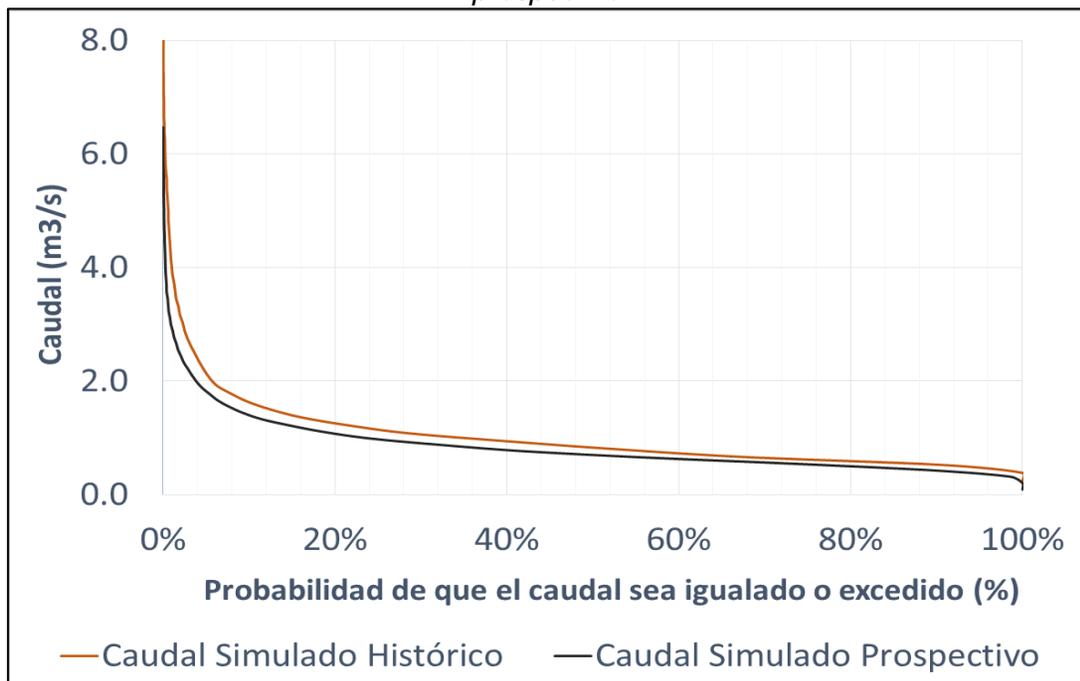
3.2.3 Determinación de los cambios en la oferta hídrica

Se compararon los datos obtenidos para la línea base y el escenario prospectivo a mediano plazo, para ello se evaluaron los caudales obtenidos para una probabilidad de que el caudal sea igualado o excedido del 50% y del 97.5%, a partir de las curvas de duración de caudal (Tabla 3-9). Se observa una reducción del 16% en Q_{50} prospectivo respecto al caudal histórico simulado y una reducción del 34% para $Q_{97.5}$ en el escenario de corto a mediano plazo. La reducción en ambos implica una disminución en la oferta hídrica superficial de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana considerable, pero es importante resaltar la disminución del caudal para el percentil 97.5, ya que este representa el caudal mínimo ecológico. En la Figura 3-18, se presenta una comparación gráfica entre la línea base establecida y el escenario prospectivo, mediante las curvas de duración de caudales histórico y prospectivo simulados.

Tabla 3-9. Comparación de la oferta hídrica superficial para los percentiles 50 y 97.5.

	Caudal histórico observado (m ³ /s)	Caudal histórico simulado (m ³ /s)	Caudal prospectivo simulado (m ³ /s)
P ₅₀	0.914	0.875	0.733
P _{97.5}	0.352	0.403	0.267

Figura 3-18. Comparación entre las curvas de duración de las series de caudal histórico y prospectivo

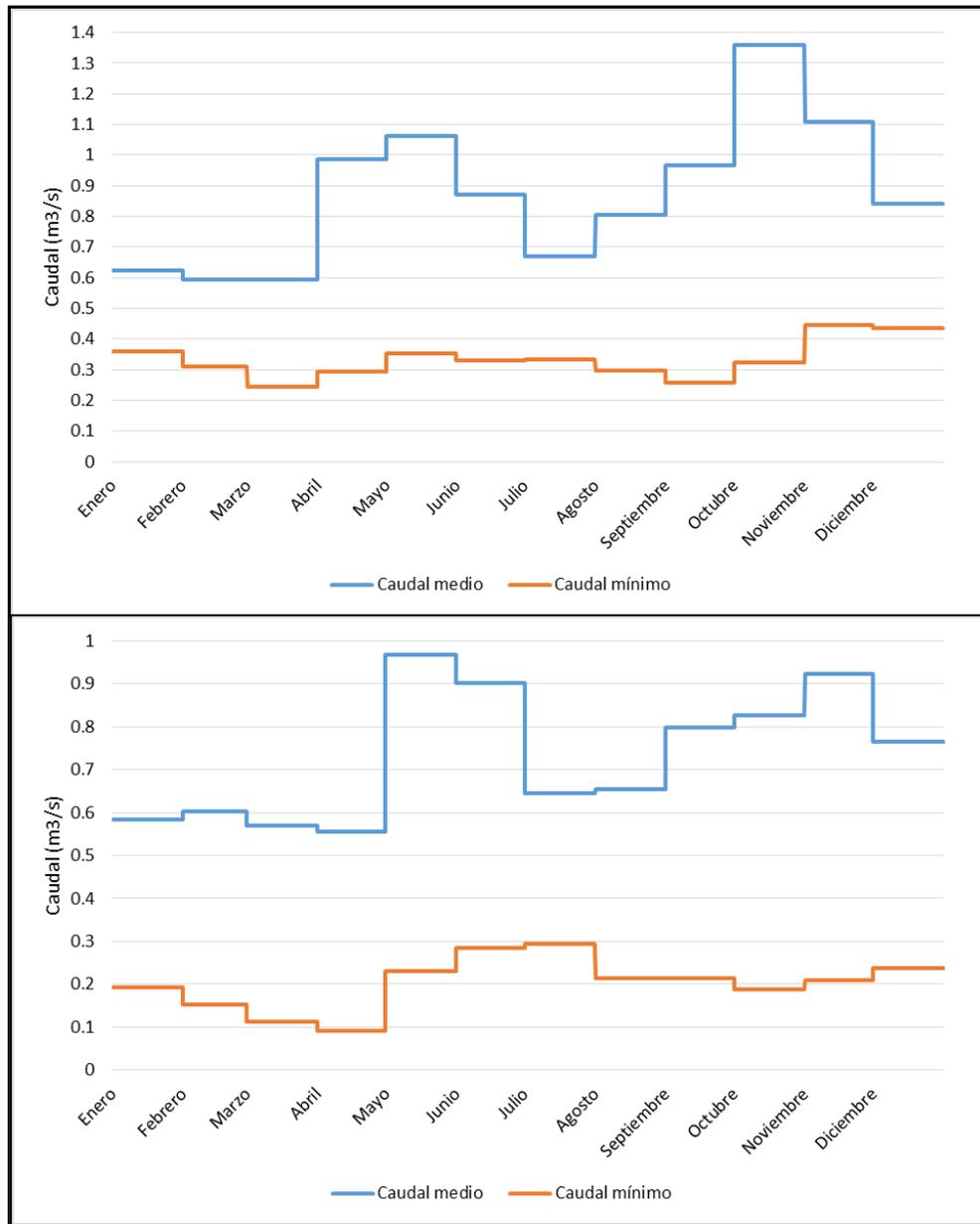


La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Se evaluó además la oferta hídrica superficial calculada (histórico simulado y prospectivo) con el caudal mínimo para un período de retorno de 10 años, siendo $Q_{Tr=10}$ de $0.413 \text{ m}^3/\text{s}$. Este valor representa “la disponibilidad hídrica mínima del recurso hídrico de que dispondrá la comunidad en épocas de poca precipitación” (Otya et al., 2008), y equivale al 47% del caudal histórico simulado y al 56% del prospectivo simulado. Esto se traduce en un aumento potencial cada vez mayor a alcanzar valores mínimos que anteriormente no eran tan recurrentes.

En la Figura 3-19 se presentan los ciclos anuales de caudales históricos y prospectivos. Históricamente, la época más seca ocurría en el mes de septiembre con un caudal mínimo absoluto de $0.256 \text{ m}^3/\text{s}$. En el futuro, aunque este mes no resulta siendo el más crítico, el caudal mínimo prospectivo alcanza un valor por debajo del mínimo absoluto histórico, siendo este $0.213 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal mínimo absoluto de la serie prospectiva alcanza los $0.092 \text{ m}^3/\text{s}$, sugiriendo una disminución del 64% con respecto al mínimo absoluto histórico. Bajo el escenario más crítico analizado, los resultados de simulación del modelo indican que la cuenca de la Quebrada La Sopetrana experimentará épocas secas más extremas, por lo que la oferta hídrica se podrá volver altamente reducida.

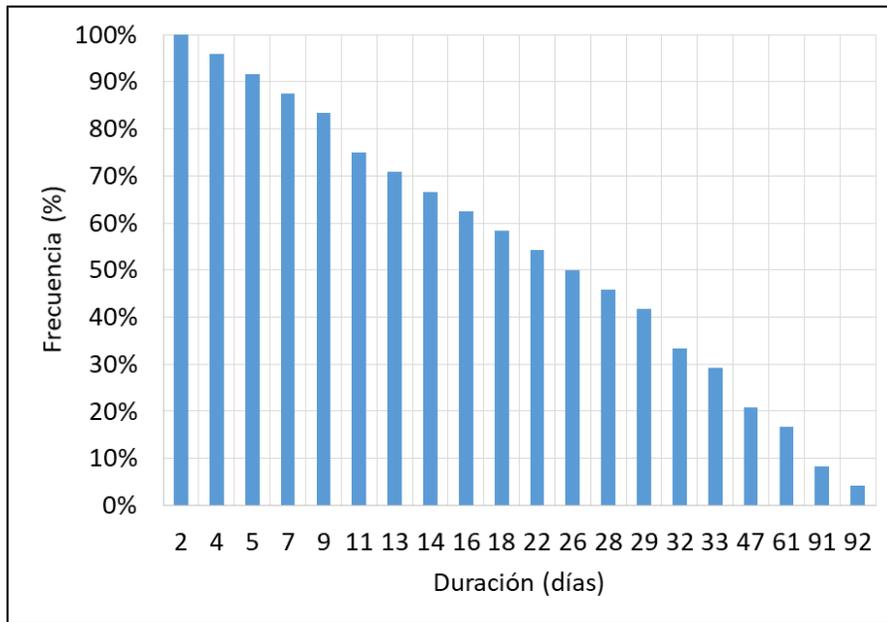
Figura 3-19. *Ciclos anuales para las series de caudales históricos (panel superior) y prospectivos de mediano plazo (panel inferior).*



Para corroborar lo arriba mencionado, se buscó la racha de días secos consecutivos más larga para la cual el caudal medio diario histórico está por debajo del caudal mínimo asociado a un 95% de probabilidad de ser igualado o excedido ($Q_{95}=0.443 \text{ m}^3/\text{s}$). Se encontró que la racha seca consecutiva más larga para el escenario histórico fue de 92 días, con una frecuencia de ocurrencia del 4.2% como se muestra en la Figura 3-20.

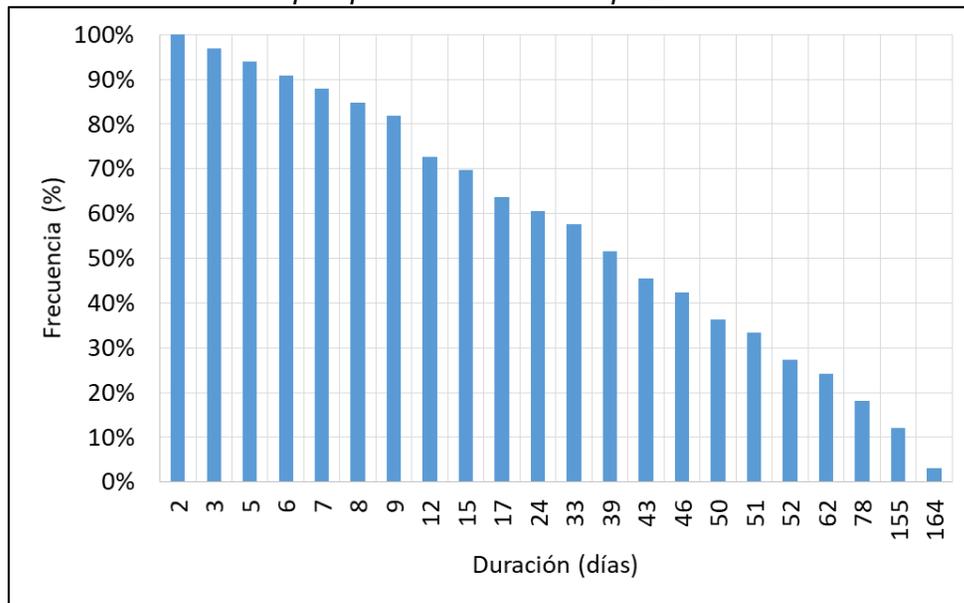
Figura 3-20. Histograma de rachas de días secos consecutivos para el escenario histórico.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Se procedió a determinar si en el escenario prospectivo aumentaba el porcentaje de ocurrencia de la racha de días secos consecutivos más larga y si se daban rachas de días secos consecutivos de mayor duración. Ver Figura 3-21.

Figura 3-21. *Histograma de rachas de días secos consecutivos para el escenario prospectivo de mediano plazo.*



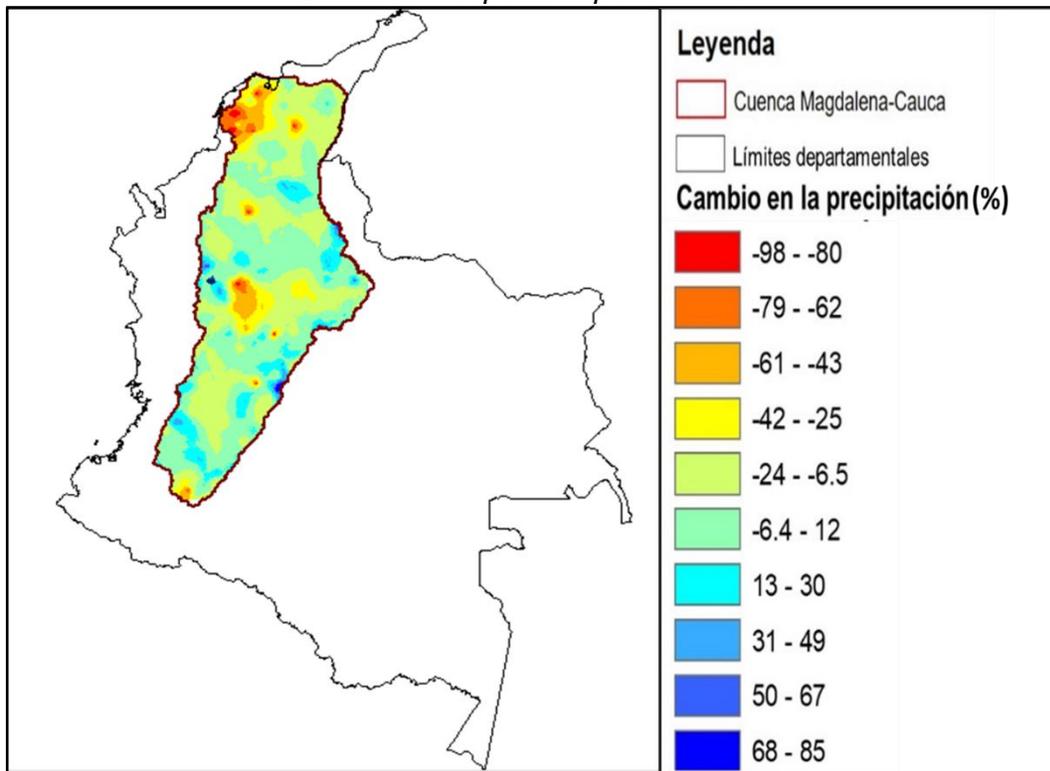
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.3 Análisis del efecto del Cambio Climático en la oferta hídrica de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana y posibles medidas de mitigación

3.3.1 Identificación de factores causales que inciden sobre la oferta hídrica

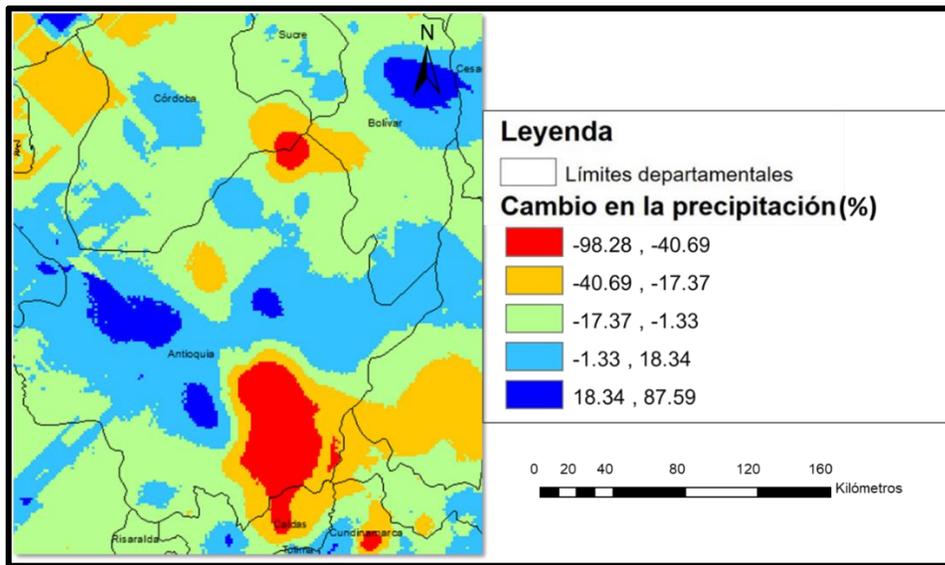
Respecto a la identificación de los factores responsables del cambio en la oferta hídrica en la cuenca hidrográfica, se evaluaron los resultados obtenidos para las variables climáticas de precipitación, temperatura y evapotranspiración tanto históricas como prospectivas. Para la precipitación, se calculó la diferencia entre el escenario prospectivo definido por el modelo GISS-E2-R y el histórico. Se decide evaluar la diferencia sólo para este modelo, ya que este abarca toda la extensión de la macrocuenca Magdalena-Cauca. El resultado es un mapa donde se observan las zonas que experimentan un aumento en la precipitación, representadas en color azul, y las que experimentan una disminución o desecación identificadas por colores cálidos (amarillo a rojo). Para el área de estudio se encontró que hay una disminución del 1.22% en la precipitación media anual.

Mapa 3-11. Cambios porcentuales en la precipitación para la cuenca del Magdalena-Cauca con respecto al período base.



Mapa 3-12. Cambios en la precipitación para el departamento de Antioquia y su entorno cercano.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Con respecto a la temperatura, el aumento de 1.6°C representa un incremento del 8% respecto a la temperatura del escenario histórico.

La evapotranspiración potencial aumenta, por su parte, en un 4.13%. Ver Tabla 3-10.

Tabla 3-10. Cambio de la ETP en un escenario de cambio climático para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana.

Escenario analizado	Precipitación [mm/año]	Temperatura [°C]	ETP [mm/año]
Histórico (1987-1996)	1,930	19.05	1,469
Prospectivo (2016-2040)	1,906	20.58	1,530
Cambio (%)	-1.22	+8.01	+4.13

3.3.2 Establecimiento de la demanda hídrica superficial total (DHST) para la cuenca de la Quebrada La Sopetrana

Las concesiones existentes, tanto de usuarios naturales como jurídicos, de la Quebrada La Sopetrana se proyectaron al año 2025 mediante la estimación de la tasa de crecimiento

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

histórico de cada sector. En la Tabla 3-11 se observa que la demanda hídrica actual de los usuarios legalizados asciende a 0.5003 m³/s.

Tabla 3-11. *Demanda hídrica de La Sopetrana por naturaleza de usuario y total en [m³/año]. Nota: Adaptado de “Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico QuBERada La Sopetrana” por CTA & Corantioquia, 2016, p.114.*

Caudal Persona Natural (PN)	Caudal Persona Jurídica (PJ)	Total
4.049.190	11.728.396	15.777.587

Para la demanda hídrica de usuarios legalizados a futuro, CORANTIOQUIA realizó una proyección para un período de análisis a largo plazo (2025), mediante la estimación de la tasa de crecimiento histórico de cada sector productivo. Se estima que esta tasa es del 5.77%, dando como resultado una demanda hídrica total a futuro de 16'687,639 m³/año, equivalentes a 0.529 m³/s.

La demanda de usuarios no legalizados en la cuenca hidrográfica de la Quebrada La Sopetrana alcanza los 64.08 l/s. Para efectos de análisis, se asumió que los usuarios no legalizados no aumentan a futuro, y por lo tanto este dato es igual para ambos escenarios aquí discutidos. En la Tabla 3-12 se muestra entonces la demanda hídrica superficial total para ambos escenarios, teniendo en cuenta usuarios legalizados y no legalizados.

Tabla 3-12. *Demanda hídrica superficial total para los escenarios histórico y prospectivo.*

DHST escenario histórico [m ³ /s]	0.564
DHST escenario prospectivo [m ³ /s]	0.593

3.3.3 Determinación de la presión antrópica sobre la oferta hídrica

Los resultados sugieren que mientras para el escenario histórico existe una presión del 64.5%, ésta aumenta al 80.9% bajo el escenario prospectivo contemplado. Ver Tabla 3-13.

Tabla 3-13. *Determinación de la presión antrópica ejercida sobre la cuenca de la Quebrada La Sopetrana para los escenarios histórico y prospectivo.*

	Escenario histórico	Escenario prospectivo
DHST [m³/s]	0.564	0.593
Caudal medio [m³/s]	0.875	0.733
Presión antrópica $\left(\frac{DHST}{OHST}\right)$	0.645	0.809

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Esta presión antrópica calculada se comparó con los rangos y categorías del IUA (índice de regulación hídrica) presentados por el IDEAM (IDEAM, 2010), para dar una idea del estado en que se encuentra el área de estudio para los escenarios histórico y prospectivo. Ambos escenarios presentaron condiciones de déficit hídrico, siendo el prospectivo un escenario altamente preocupante debido a la insuficiencia que presenta la cuenca hidrográfica para satisfacer la demanda.

Tabla 3-14. Rangos y categorías del índice de regulación hídrica (IUA) del IDEAM. Nota: Adaptado de “Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico Quebrada La Sopetrana” por CTA & Corantioquia, 2016, p.130.

Rango (Dh/Oh)*100	Categoría IUA	Significado
> 50	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
20,01 - 50	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
10,01 - 20	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
1 – 10	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
< 1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

3.3.4 Presentación de escenarios de conflicto por usos de agua en el mundo

En el mundo ya se están experimentando escenarios de escasez de agua. Esta limitación o insuficiencia para satisfacer la demanda hídrica configura un alto potencial de tensión y conflicto. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) ha destacado respecto al recurso hídrico que “el uso no sostenible del agua, la mala gestión, la contaminación y el rápido crecimiento demográfico están fomentando su escasez, hecho que puede provocar el surgimiento de conflictos y la carestía alimentaria” (Cañadas et al., 2005).

The Pacific Institute, en un esfuerzo por entender la conexión que existe entre el recurso hídrico y la seguridad y los conflictos internacionales, creó una base de datos donde se monitorean y categorizan eventos relacionados con conflictos por agua a nivel mundial. En el Mapa 3-13 se presentan los conflictos que este instituto ha identificado desde antes del 0 B.C hasta la fecha, reportando un total de 551 conflictos.

Mapa 3-13. Conflictos de agua a nivel global ocurridos desde 0 B.C hasta la fecha. Nota: Adaptado de “Water Conflict Chronology” por Pacific Institute, 2018.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Se muestra además un mapa que presenta los conflictos que se han dado desde el año 2010 hasta el presente, como instrumento comparativo. Para este período de tiempo el número total de escenarios de conflicto reportados asciende a 263.

Mapa 3-14. *Conflictos de agua a nivel global para el año 2010 hasta el presente. Nota: Adaptado de "Water Conflict Chronology" por Pacific Institute, 2018.*



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos del año 2018, se estima que hay 3,600 millones de personas viviendo en áreas con riesgo de sufrir escasez de agua al menos un mes al año, pudiendo alcanzar casi los 6,000 millones para el año 2050 (ONU, 2018). Estas cifras son alarmantes, teniendo en cuenta que las proyecciones estiman que la demanda hídrica está aumentando a una tasa del 1% anual.

En el informe *¡Alerta 2005! Informe sobre conflictos, derechos humanos y construcción de paz*, elaborado por la Escuela de Cultura de Paz (referencia), se presentan nueve áreas geográficas que afrontan problemas de insuficiencia de agua y que pueden desembocar en conflictos armados para acceder a este recurso. Estas áreas se muestran en la Tabla 3-15, extraída de dicho documento.

Tabla 3-15. *Áreas geográficas con conflictos por insuficiencia hídrica. Nota: Adaptado de “¡Alerta 2005! Informe sobre conflictos, derechos humanos y construcción de paz” por Cañadas et al., 2005, p.30.*

Cuadro 1.5. Principales zonas de disputa y tensión por escasez de agua	
ÁFRICA	
-	En el lago Chad , que desde los años 60 se ha reducido en un 95%, convergen las fronteras de Chad, Níger, Nigeria y Camerún. El cambio climático y la sobreexplotación han provocado que 9 millones de personas se encuentren en una situación desesperada por la falta de agua.
-	160 millones de personas en los 10 países que comparten la cuenca del Nilo dependen de sus aguas. Un tratado de 1929 entre el Reino Unido y Egipto establece que no se podrán llevar a cabo operaciones que reduzcan el volumen de agua que llega a Egipto, pero recientemente Tanzania ha planteado la construcción de un acueducto para usos agrícolas. En 1993 se creó la <i>Nile Basin Initiative</i> , que ha realizado diversos progresos alcanzando acuerdos entre los países miembros en la gestión conjunta de su potencial.
AMÉRICA	
-	La construcción de un importante embalse en el cauce del río Bio Bio , en Chile , ha provocado el desplazamiento forzado de miles de personas de la comunidad Mapuche de sus territorios ancestrales.
ASIA	
-	La gestión y uso del agua del río Indo ha provocado tensiones entre las provincias del norte y del sur de Pakistán .
-	En China , la construcción del pantano de las Tres Gargantas en el río Yangtze ha provocado el desplazamiento forzado de 600.000 personas. Parte de sus aguas quieren canalizarse para nutrir al río Huang He , que irriga la principal zona de cultivos de China, y que se encuentra exhausto y muy polucionado como consecuencia de los usos agrícolas.
-	La gestión de las aguas del río Mekong , que comparten Viet Nam, Camboya, Lao y China , también es un motivo de tensión en el Sudeste Asiático.
-	El abusivo uso de las aguas del río Ganges ha provocado su progresiva reducción y contaminación, hecho que se ha convertido en un foco de disputa entre India y Bangladesh .
ORIENTE MEDIO	
-	La gestión del agua en Oriente Medio, que agrupa el 5% de la población mundial y que intenta sobrevivir con el 1% de los recursos hídricos, forma parte de la disputa entre Israel y Palestina y también entre Libano, Israel y Siria , debido a la competencia por los escasos recursos hídricos del Mar de Galilea, que a su vez nutre al río Jordán, cuya gestión estratégica por parte de Israel (junto a los escasos yacimientos acuíferos presentes en Cisjordania) condena al desabastecimiento y a la escasez a la población palestina.
-	El drenaje y los esquemas de irrigación establecidos por S. Hussein en el sur de Iraq han provocado la pérdida del 90% de uno de las principales zonas húmedas a escala mundial. La gestión del agua de los ríos Tigris y Éufrates ha generado tensiones entre Iraq, Siria y Turquía , por la construcción de presas y canales de irrigación.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En África por ejemplo, más de 300 millones de habitantes se ven afectados por escasez hídrica y otras 6,000 mueren al año debido a ésta. Las Naciones Unidas estiman que para el año 2025, una de cada dos personas en este continente sufrirá consecuencias por la escasez del recurso hídrico. En el Oriente Medio, región que agrupa el 5% de la población y que cuenta con el 1% de los recursos hídricos, se vienen experimentando disputas entre Israel y Palestina, Líbano, Israel y Siria debido a la competencia por los limitados recursos hídricos de la zona (Cañadas et al., 2005).

Por otro lado, los largos períodos de sequía que vienen experimentando las poblaciones que se encuentran en el corredor seco de El Salvador, Guatemala y Honduras, han ocasionado estragos económicos y sociales, como resultado de la pérdida del suministro alimenticio y las fuentes de ingreso. Según el estudio acerca de la seguridad alimenticia y la emigración para estas zonas, dirigido por el Programa Mundial de Alimentos de la ONU, “el principal «factor impulsor» identificado no fue la violencia, sino la sequía y sus consecuencias: falta de alimento, de dinero y de trabajo” (Steffens, 2018; Programa Mundial de Alimentos - PMA, 2017).

Es importante tener en cuenta que el suministro hídrico se espera disminuya en mayor medida en las regiones que se encuentran en latitudes medias. En estas zonas, las épocas de mayor disponibilidad hídrica se verán alteradas, al igual que aumentará la severidad de eventos de inundaciones y sequías (Gleick & Iceland, 2018). El aumento en la presión antrópica ejercida sobre el recurso hídrico conlleva a que haya una disminución en la seguridad hídrica de una población y se detonen problemas por conflictos, migraciones y seguridad alimenticia. Por esto, la información presentada anteriormente, sirve como llamado de atención para las autoridades gubernamentales y comunidades de la cuenca de la Quebrada La Sopedrana acerca de lo que puede ocurrir en un futuro no muy lejano si no se toman medidas adecuadas que permitan gestionar adecuadamente el recurso hídrico disponible.

3.3.5 Proposición de posibles medidas de adaptación para la aplicación de estas en el área de estudio

Es necesario implementar medidas que permitan mitigar los efectos negativos generados por la presión antrópica ejercida sobre el recurso hídrico en la cuenca de estudio, si se quiere asegurar en un futuro agua para la población asentada en su interior o en el entorno cercano. Este aseguramiento hídrico permitirá hacer frente a las dinámicas sociales y económicas de la región. Estas medidas pueden enmarcarse en las Metas para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, que incluyen garantizar el acceso al agua de toda la población, el uso eficiente del agua y la reducción en la demanda hídrica, y la utilización de enfoques efectivos de gestión del agua que incluyan estrategias económicas inteligentes y de participación comunitaria (Gleick & Iceland, 2018).

En primera instancia, es importante entonces ejercer control sobre factores que ocasionan el detrimento del ecosistema natural, como lo son la fragmentación de los bosques por agricultura, ganadería y urbanización en la zona. Es importante identificar los “puntos de inflexión” de un ecosistema, donde se reconozca la capacidad de carga de éste y se

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

determinen los umbrales en donde cualquier presión adicional sobre el mismo cause daños irreversibles a éste. En este sentido, “el pago por esquemas de servicios ambientales, proporciona incentivos monetarios y no monetarios a las comunidades, agricultores y propietarios de tierras particulares aguas arriba, para proteger, restaurar y conservar los ecosistemas naturales y adoptar prácticas agrícolas y de uso de la tierra sostenibles” (ONU, 2018).

De igual manera, y teniendo en cuenta que el acceso al agua potable y al saneamiento constituyen un derecho humano fundamental, amparado por el derecho internacional, deben plantearse medidas que vinculen al DHAS (Derecho humano al agua y saneamiento) no sólo a la distribución hídrica, sino también a la fuente de abastecimiento como tal. También debe considerarse que existe una prioridad de los usos domésticos y de subsistencia, por lo que deben adoptarse medidas que eviten que terceros contaminen las fuentes hídricas o extraigan el agua de modo inequitativo.

Esto adquiere relevancia en áreas como Sopenetrán, donde por el creciente desarrollo turístico y recreativo de la zona, existen usuarios que demandan agua para actividades de las que se puede prescindir. Un ejemplo de esto es la demanda de agua por parte de dueños de propiedades de recreación para alimentar fuentes hídricas decorativas que no cuentan con ninguna otra funcionalidad; mientras que aguas abajo existen poblaciones vulnerables que experimentan un déficit hídrico. Para ello, se propone la asignación de derechos de uso de agua que aseguren el acceso de agua de dichas comunidades, permitiendo además que se refuercen “las capacidades estatales para poner en práctica una fuerte regulación de la gestión de los recursos hídricos” (Martín & Justo, 2015).

Es necesario fortalecer además las estructuras políticas y de gobernanza en la zona. Si no existe un escenario efectivo de gobernabilidad, las medidas técnicas implementadas no serán perdurables en el tiempo. Debe haber una asignación clara de las funciones y responsabilidades respecto a la gestión del recurso hídrico por parte de los ministerios, entidades ambientales y demás instituciones públicas. Pero también debe darse la participación activa por parte de las comunidades en las políticas del agua, donde se generen procesos decisorios y de control (Martín & Justo, 2015).

Solanes y Getches (1998 citado en Martín & Justo, 2015) resaltan que “uno de los problemas más relevantes frente a la inercia administrativa o la toma de decisiones inadecuadas es que en general (...) el público tiene problemas para acreditar su legitimidad en procesos asociados a la gestión del agua” (Martín & Justo, 2015). La falta de apropiación por parte de la ciudadanía imposibilita la aplicación de las políticas y programas propuestos para la gestión del agua por lo que deben ampliarse mecanismos participativos, para que haya una participación activa por parte de la comunidad como se mencionó anteriormente. Por ello se proponen como mecanismos de adaptación la educación de la ciudadanía como medio para generar cambios en la mentalidad ciudadana fomentando la cohesión y pertenencia social.

Por último, la reducción a futuro de la oferta hídrica superficial implica una búsqueda de alternativas de abastecimiento que permitan satisfacer la creciente demanda por este

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

recurso en la región. Entre estas alternativas se encuentran la recolección de aguas lluvias que se puede relacionar también con la construcción o implementación de nueva capacidad de almacenamiento y el reciclaje del agua y la exploración y extracción de agua subterránea (Galindo et al., 2014).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

4 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

A pesar de que el estudio de los impactos potenciales que ejerce el cambio climático sobre el recurso hídrico en la cuenca de la Quebrada La Sopetrana depende de datos simulados que están sujetos a diversos niveles de incertidumbre, lo obtenido en este trabajo de investigación permite dar una idea general de la situación que puede llegar a desarrollarse en un futuro cercano. Esto permite direccionar la toma de decisiones teniendo en cuenta la localización, medidas de adaptación y áreas más vulnerables dentro de la cuenca.

Se observó que la variable que incide en mayor medida sobre la oferta hídrica es la temperatura, ya que esta experimenta el mayor cambio en el escenario de corto a mediano plazo (un incremento del 8% en la temperatura media anual) y conlleva a cambios en las otras variables climáticas como la precipitación y evapotranspiración, ya que están condicionadas por esta. El determinar los cambios potenciales que pueden experimentar las variables climáticas evita que los procesos de adaptación sean espontáneos, ineficientes y temporales debido a que no se consideran como alteraciones permanentes (Galindo et al., 2014).

Teniendo en cuenta que se encontró una disminución del 17% en el caudal medio multianual de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana, y un aumento del 5% en la demanda hídrica, es importante prever una situación de escasez hídrica para el futuro en dicha zona. Las comunidades más vulnerables del municipio podrán verse expuestas a conflictos por agua, que pueden poner en amenaza su estabilidad económica y social. No obstante, se sugiere realizar una instrumentación de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana, con el fin de ampliar la información aquí planteada. Esta instrumentación permitirá evaluar los efectos del cambio climático sobre la oferta hídrica, teniendo en cuenta valores reales a los que está sujeta el área de estudio.

También se propone a futuro emplear modelos que permitan predecir como cambiará el uso del suelo dentro del área estudiada (Pascual Rosa et al., 2010) y de esta manera predecir de manera más acertada como podría cambiar la demanda hídrica dentro de la cuenca de la Quebrada La Sopetrana. Lo anterior se propone teniendo en cuenta que lo presentado en este trabajo se deriva de estimaciones de demanda generalizadas que pueden no representar en su totalidad el comportamiento de esta. Estos modelos posibilitan además la implementación de medidas de ordenamiento territorial eficientes a largo plazo, que permitan el desarrollo sostenible del municipio, lo que incluye el adecuado manejo del recurso hídrico de este.

La incidencia que tiene la variabilidad climática sobre los recursos hídricos es cada vez mayor. Es por ello que es necesaria la generación de políticas que den respuesta a las afectaciones del recurso hídrico, y que además orienten la planificación del agua y la ocupación del territorio para escenarios de mediano y largo plazo. Seguir con la reducida voluntad política actual, en donde los gobiernos buscan implementar medidas cortoplacistas que aumenten su popularidad, da como resultado una incapacidad de las autoridades nacionales y regionales para generar, monitorear y aplicar un sistema consistente y

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

sustentable de manejo de las intervenciones sobre los recursos hídricos (Martín & Justo, 2015).

Considerando que este trabajo de investigación se concentró en el análisis de la oferta hídrica superficial y que está podría experimentar una reducción significativa en el futuro, se considera pertinente disponer de las aguas subterráneas como una medida de adaptación al cambio climático. Para ello es necesario ampliar los estudios que se han realizado respecto a la evaluación de zonas de recarga de acuíferos (algunos estudios se mencionan en el marco de referencia de este trabajo) y cuantificar el recurso hídrico allí disponible y que aún no es aprovechado. Iniciativas como el “Plan de Manejo Ambiental del Sistema Acuífero del Occidente Antioqueño”, adelantado por CORANTIOQUIA en el año 2017, que aunque aún no ha sido adoptado desde el marco jurídico por la Corporación, fomentan y amplían el conocimiento respecto al agua subterránea para de esta manera poder considerarla como una alternativa de abastecimiento tanto para la cuenca aquí analizada, como para las zonas aledañas.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

REFERENCIAS

- Arismendy, R. D., & Salazar, J. F. (2003). *Evaluación del Potencial Acuífero de los municipios de Puerto Berrío y Puerto Nare*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Armenta, G., Dorado, J., Rodríguez, A., & Ruiz, J. (2014). *Escenarios De Cambio Climático Para Precipitación Y Temperaturas En Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM. <http://doi.org/10.1042/BJ20150758>
- Armenteras, D., & Rodríguez, N. (Eds.). (2007). *Monitoreo de los ecosistemas andinos 1985-2005: síntesis*. Bogotá, D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Caicedo, F. M. (2009). *Programa Piloto Nacional de Adaptación al Cambio Climático -INAP*. Bogotá, D.C. Recuperado a partir de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/15016/ModelacionAltaMontana.pdf/638e42ee-5598-4e8a-b5da-5e09a781a847>
- Cañadas, M., Caramés, A., Armengol, V., Álvarez, D., Martín, O., Pérez, R., ... Villellas, M. (2005). *Alerta 2005! Informe sobre conflictos, derechos humanos y construcción de paz. Ecola de Cultura de Pau (ecp)*. Barcelona: Icaria editorial.
- CIIFEN. (2017). *Efecto Invernadero*. Recuperado a partir de http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=99&Itemid=342&lang=es
- CORANTIOQUIA. (2007). *Plan de Gestión Ambiental Regional, 2007 - 2019*.
- CORANTIOQUIA, & GOTTA INGENIERÍA S.A.S. (2017). *Evaluación regional del agua en la jurisdicción de CORANTIOQUIA*. Medellín.
- CTA, & CORANTIOQUIA. (2016). *Informe Final. Fase I Declaratoria y Fase II Diagnóstico. Plan de ordenamiento del recurso hídrico-PORH- Quebrada La Sopetrana. Informe Técnico*.
- DANE. (2011). *Estimaciones de Población 1985-2005 y Proyecciones 2005-2020 nacional y departamental desagregadas por sexo, área y grupos quinquenales de edad*. Bogotá. Recuperado a partir de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/seriesp85_20/EstimacionesProyecciones1985__020.xls
- Decreto-Ley 2811. (1974). *Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*. Bogotá, D.C.: Ejecutivo. Recuperado a partir de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1551>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- EIA, & GOTTA INGENIERÍA S.A.S. (2014). *Modelación hidrológica distribuida para el proyecto "inferencia de cambios de condiciones climáticas y sus impactos en la dinámica de ecosistemas de alta montaña. Estudio caso: cuencas hidrográficas de los ríos Claro y Otún, Parque Nacional de los Nevados*. Medellín.
- Enríquez Alonso, A. (2016). *Evaluación de modelos climáticos: el comportamiento de la variable nubosidad*. Universitat de Girona. Recuperado a partir de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=116042>
- Espinosa, I. D. (2012). Municipio de Sopetrán. Recuperado a partir de <https://idespinosa.wordpress.com/2012/10/23/4-2-2municipio-de-sopetran/>
- Francés, F., Vélez, J. I., & Vélez, J. J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332(1–2), 226–240. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.032>
- Francés, F., Vélez, J. I., Vélez, J. J., & Puricelli, M. (2002). Distributed Modeling of Large Basins for Real Time Flood Forecasting System in Spain. En *Second Federal Interagency Hydrologic Modelling* (p. 13). Las Vegas, USA.
- Galindo, L. M., Samaniego, J., Alatorre, J. E., & Carbonell, J. F. (2014). *Procesos de adaptación al cambio climático: análisis de América Latina*. Santiago de Chile, Chile. Recuperado a partir de http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37613/S1500005_es.pdf;jsessionid=6911757670AC7B69B3AC6634E170EC4A?sequence=1
- García, N. (2014). *“Aplicación de herramientas SIG al estudio de la cuenca del Río Nalón”*. Universidad de Oviedo. Recuperado a partir de http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/28025/4/TFM_Nerea_García_González.pdf
- Gleick, P., & Iceland, C. (2018). *Water, Security, and Conflict*.
- Grupo Ecoindustria. (2017). La concentración de CO2 en la atmósfera supera los 400 ppm - Grupo Ecoindustria. Recuperado a partir de <https://www.grupoecoindustria.com/la-concentracion-co2-la-atmosfera-supera-los-400-ppm/>
- Hurtado, A. F., & Mesa, O. J. (2015). Cambio Climático y Variabilidad Espacio-Temporal de la Precipitación en Colombia. *Revista EIA*, 12(24), 131–150. <http://doi.org/ISSN 1794-1237>
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua 2010*. Bogotá, D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá, D.C. Recuperado a partir de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Instituto Humboldt Colombia. (2017). Bosques secos tropicales en Colombia. Recuperado a partir de <http://www.humboldt.org.co/es/investigacion/proyectos/ens-desarrollo/item/158-bosques-secos-tropicales-en-colombia>
- Interstate Technology Regulatory Council. (2016). Evaluate Geospatial Method Accuracy. Recuperado a partir de <https://gro-1.itrcweb.org/evaluate-geospatial-method-accuracy/?print=pdf>
- 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*. (Core Writing Team, R. K. Pachauri, & L. A. Meyer, Eds.). Ginebra, Suiza: IPCC.
- Lehner, B., Verdin, K., & Jarvis, A. (2006). HydroSHEDS. *World Wildlife Fund*. Washington, DC.
- Martín, L., & Justo, J. B. (2015). *Análisis, prevención y resolución de conflictos por el agua en América Latina y el Caribe. Recursos naturales e infraestructura*. Santiago de Chile. <http://doi.org/10.3989/arbor.2000.i653.1000>
- Martínez, P., & Patiño, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5–20. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/pdf/3535/353531976001.pdf>
- Mejía, R. (1999). *Inventario Hídrico de la Región de los Hevéxicos (Occidente) de la Jurisdicción de CORANTIOQUIA*. Medellín.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Recuperado a partir de <http://faolex.fao.org/docs/pdf/col146504.pdf>
- Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (Vol. 62301). <http://doi.org/FCCC/INFORMAL/84>. GE.05-62301 (S) 220705 220705
- NASA. (2017). What's in a name? Weather, global warming and climate change. Recuperado a partir de <https://climate.nasa.gov/resources/global-warming/>
- Ojeda, E., & Arias, R. (2000). Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en Colombia. En *Segundo Foro Mundial del Agua* (p. 77). La Haya, Países Bajos. Recuperado a partir de <http://www.cepal.org/samtac/noticias/documentosdetrabajo/5/23345/inco00200.pdf>
- ONU-DAES. (2010). El derecho humano al agua y al saneamiento. Recuperado a partir de http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml
- ONU. (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. Paris.

- Ortiz-Vera, O. (2015). Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 25–44. Recuperado a partir de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000400002&lng=es&tlng=es
- Ortiz, C., & Restrepo, C. (2004). *Evaluación del Potencial Acuífero de los Municipios de Santa Fe de Antioquia, San Jerónimo, Sopetran, Olaya y Liborina*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Osorio, C. Y. (2016). *Dinámica del clima y la vegetación de los últimos 200 años del Holoceno en el humedal La Bramadora (Antioquia-Colombia)*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/55672/>
- Otaya, L. A., & Bustamante, G. de J. (2004). *Oferta Hídrica del Área de Manejo Especial "Sistema de Páramos y Bosques Altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño"*. Medellín.
- Otaya, L. A., Vásquez, G. L., & Bustamante, G. de J. (2008). Estimación de la Oferta Hídrica con Información Escasa en Ecosistemas Estratégicos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 61(1), 4366–4380. Recuperado a partir de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v61n1/a13v61n1.pdf>
- Pacific Institute. (2018). Water Conflict Chronology. Recuperado a partir de <http://www.worldwater.org/conflict/map/>
- Pascual Rosa, V., Aguilera Benavente, F., Plata, W., Gómez Delgado, M., & Bosque Sendra, J. (2010). Simulación de modelos de crecimiento urbano: métodos de comparación con los mapas reales. En J. Ojeda Zújar, I. Vallejo Villalta, & M. F. Pita López (Eds.), *La información geográfica al servicio de los ciudadanos de lo global a lo local*. Sevilla, España: Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla. Recuperado a partir de https://www.researchgate.net/publication/228948435_SIMULACION_DE_MODELOS_DE_CRECIMIENTO_URBANO_METODOS_DE_COMPARACION_CON_LOS_MAPAS_REALES
- Pinillos, A. (2012). Diseño metodológico. Recuperado a partir de <https://www.slideshare.net/apinillos03/diseo-metodolgico-13495208>
- Posada, L., Arenas, S., Quiceno, M., & Rodríguez, C. (2006). Procesos Morfodinámicos en el Abanico de Sopetrán. *XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, 672–681.
- Programa Mundial de Alimentos (PMA). (2017). *Food Security and Emigration: why people*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

flee and the impact on family members left behind in El Salvador, Guatemala and Honduras.

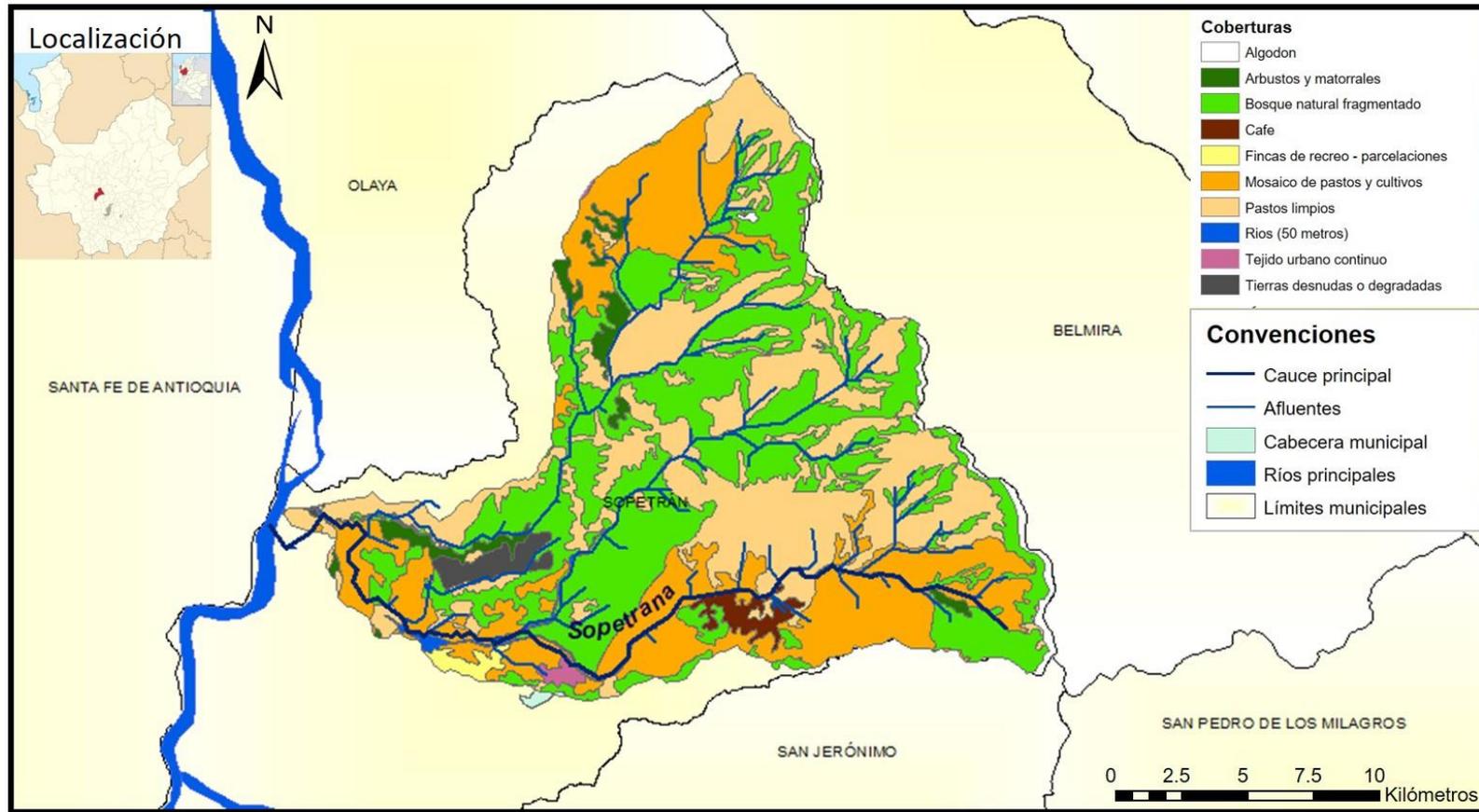
- Restrepo Tamayo, C. A. (2007). *Modelo Hidrológico Distribuido Orientado a la Gestión de la Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Rojas, P. (2015). ¿Qué es una curva hipsométrica? Recuperado a partir de <https://www.ingeciv.com/que-es-una-curva-hipsometrica/>
- Rojo, J. D. (s/f). Morfometría de Cuencas. Recuperado a partir de <http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/morfometria.pdf>
- Ruiz, D. (2005). *Apoyo al Desarrollo de Temas Inherentes a la Aplicación de los Decretos 3100 de 2003 y 3440 de 2004*. Medellín.
- Ruiz, D. (2016). *Probability in Hydroclimatology (Part 1 of 2)*.
- Ruiz, D. (2017). *Cuencas hidrográficas, escorrentía, pronóstico y predicción*.
- Ruiz, J. A. (2016). *Evaluación de metodologías indirectas para la estimación de caudales medios mensuales en la zona del piedemonte del departamento del Casanare*. Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.
- Sánchez, M., & Maroto, S. (s/f). Aproximación de integrales. Recuperado a partir de http://repositorio.uned.ac.cr/multimedias/metodos_numericos_ensenanza/modulo4/descripcion.html
- Semana. (2016). ¿Potencia hídrica? *Semana*. Recuperado a partir de <http://www.semana.com/nacion/articulo/escasez-de-agua-en-colombia/494180>
- Steffens, G. (2018). El clima cambiante obliga a emigrar a los guatemaltecos desesperados. *National Geographic*. Recuperado a partir de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2018/10/el-clima-cambiante-obliga-emigrar-los-guatemaltecos-desesperados>
- Vélez, J. I. (2001). *Desarrollo de un Modelo Hidrológico Conceptual y Distribuido Orientado a la Simulación de las Crecidas*. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Vélez, J. J., & Botero, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizalez. *DYNA*, 78(165), 58–71. Recuperado a partir de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25640>
- Vélez, J., Poveda, G., & Mesa, O. (2000). *Balances Hidrológicos de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Vélez, M. V., & Rhenals, R. L. (2008). Determinación de la recarga con isótopos ambientales en los acuíferos de Santa Fé de Antioquia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 24, 37–54.
- Villegas, P. P. (2013). Análisis Morfométrico de una Cuenca. Recuperado a partir de <https://www.aguaysig.com/2013/10/analisis-morfometrico-de-una-cuenca.html>
- Zapata, E. (2016). *Análisis de la capacidad de simulación hidrológica del modelo distribuido SHIA ante la caracterización por tramos de la geometría hidráulica del cauce*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

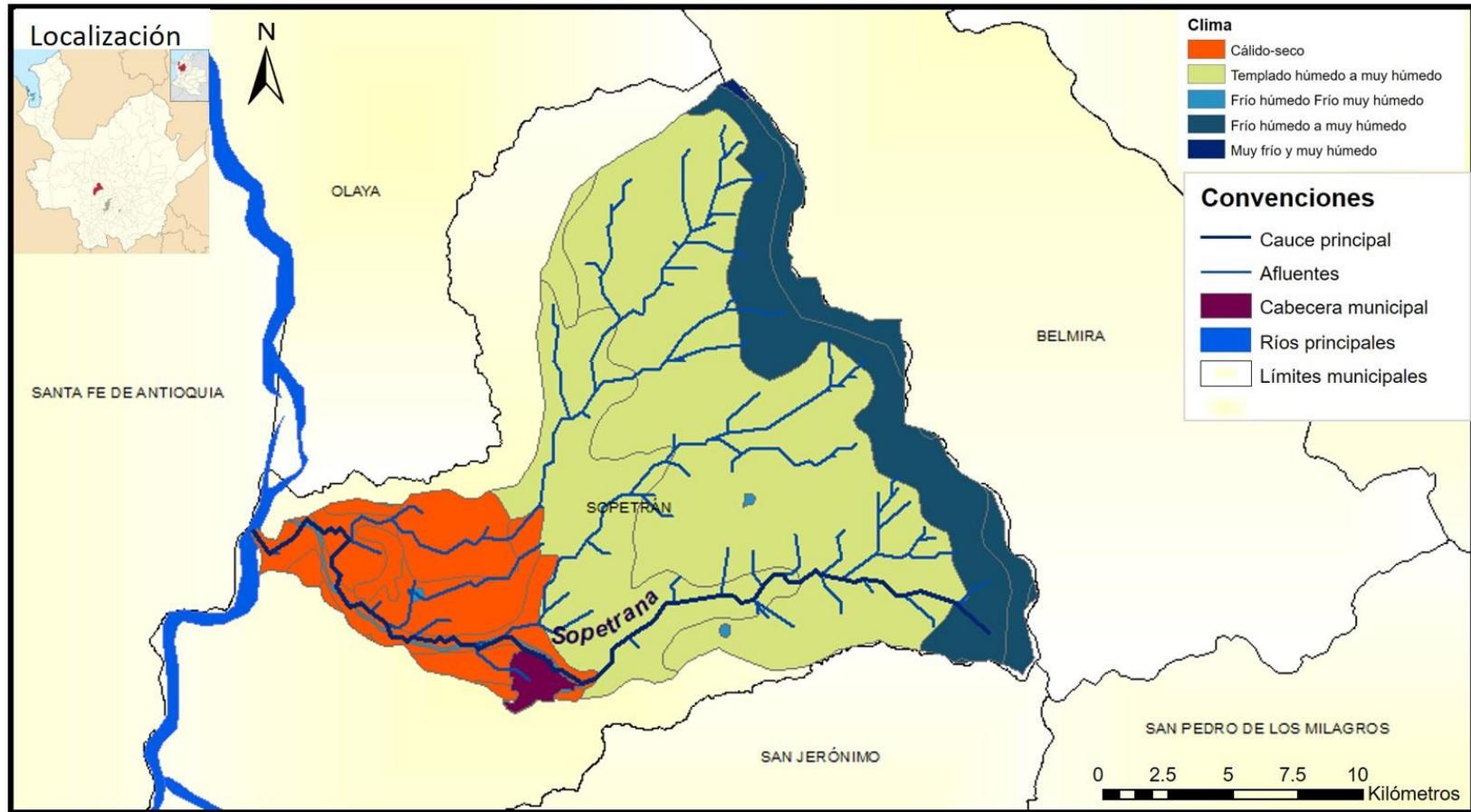
ANEXOS

A. 1. MAPA DE LAS COBERTURAS DE SUELO PARA LA CUENCA DE LA QUBERADA LA SOPETRANA



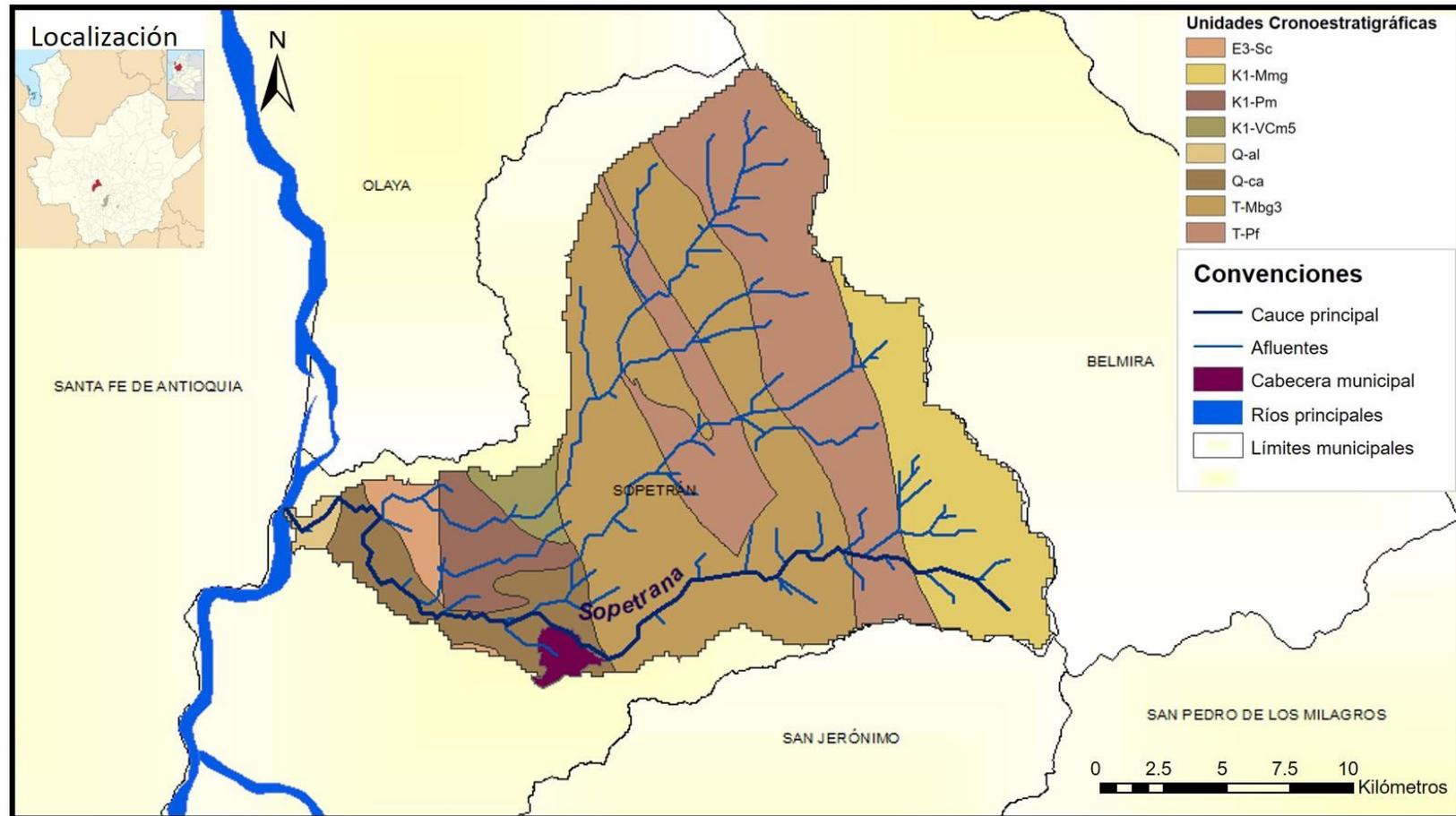
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

A. 2. MAPA DE LOS PISOS TÉRMICOS PRESENTES EN LA CUENCA DE LA QUBERADA LA SOPETRANA



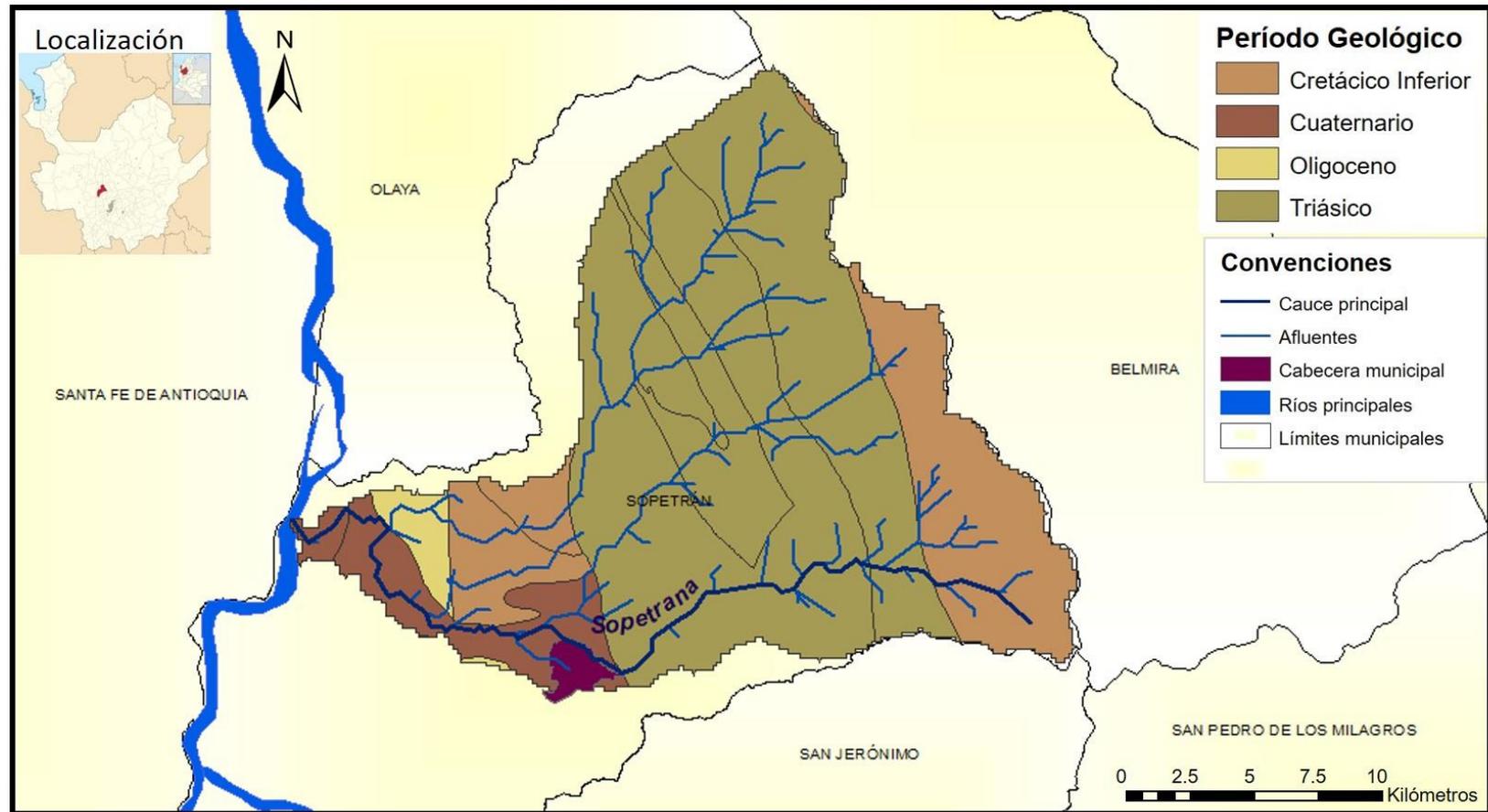
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

A. 3. MAPA DE LAS UNIDADES CRONOESTRATIGRÁFICAS PRESENTES EN LA CUENCA DE LA QUBERADA LA SOPETRANA



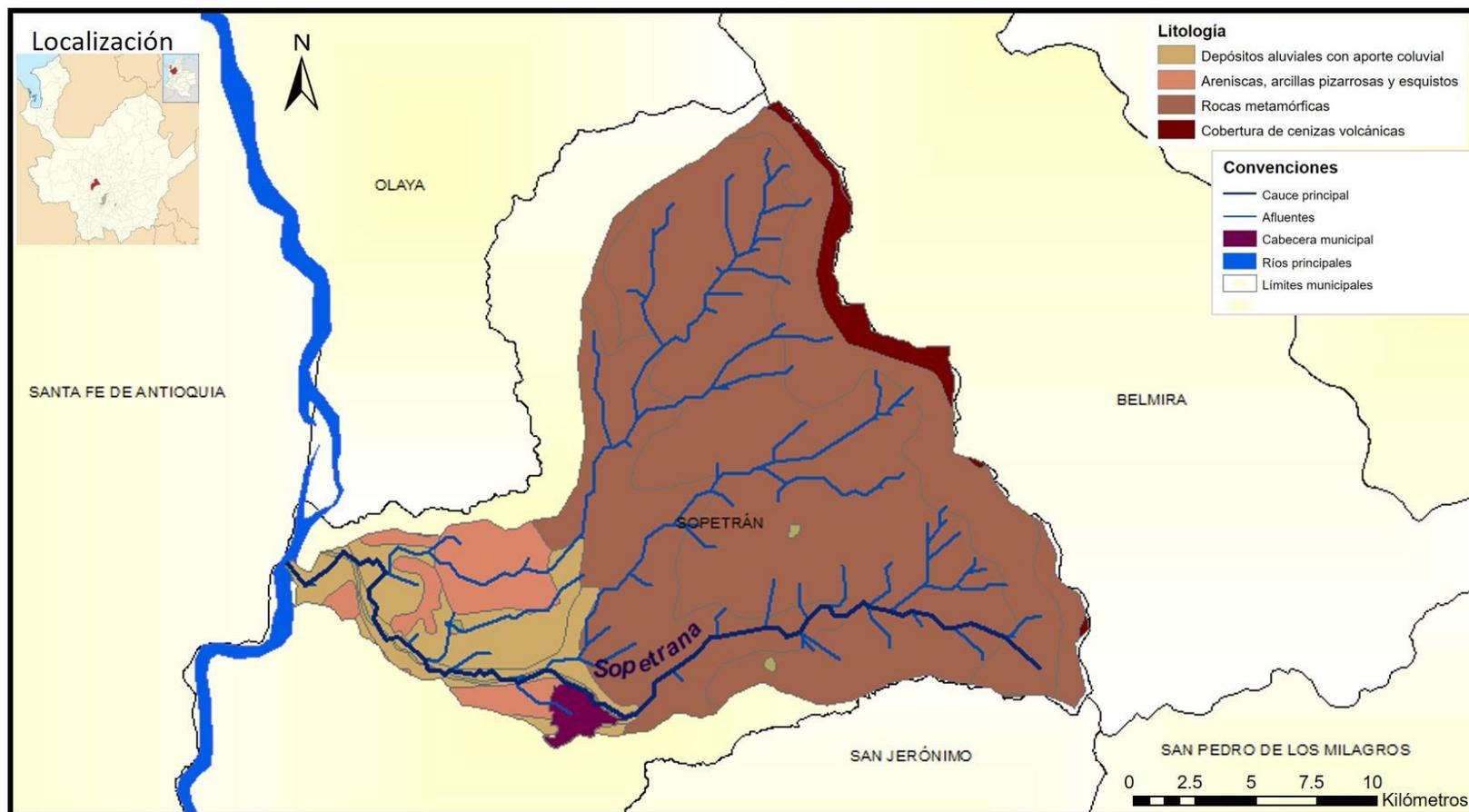
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

A. 4. MAPA DE LAS EDADES GEOLÓGICAS DE LAS UNIDADES CRONOESTRATIGRÁFICAS PRESENTES EN LA CUENCA DE LA QUBERADA LA SOPETRANA



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

A. 5. MAPA DE LA LITOLOGÍA DE LOS SUELOS PRESENTES EN LA CUENCA DE LA QUBERADA LA SOPETRANA



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.