

**ÍNDICE DE SALUD  
DEL AGUA**

**Corredor de  
Conservación**  
Bogotá, Colombia

# AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a todos los actores que participaron activamente en el estudio del Índice de Salud del Agua del Corredor de Conservación, los cuales contribuyeron en la encuesta de percepción, entrega de información, validación de los resultados, comentarios y sugerencias sobre los principales desafíos que se presentan en la gestión de los recursos hídricos en la región.

Agradecemos de manera especial al equipo técnico de la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá -EAB, a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca- CAR, a Parques Nacionales Naturales de Colombia - PNN, y a la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia -ANDI, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de este estudio.

Nos gustaría también agradecer al Centro del Agua para América Latina y el Caribe (cuyo financiamiento provienen del Banco Interamericano de Desarrollo, la Fundación FEMSA y el Tecnológico de Monterrey), por su apoyo técnico en la realización de los modelos hidrológicos, escenarios futuros de cambio climático y por la viabilidad de financiamiento de este proyecto.

ELABORADO POR:



EN COLABORACIÓN CON:



FINANCIAMIENTO:



CO-FINANCIAMIENTO:



# TABLA DE CONTENIDOS

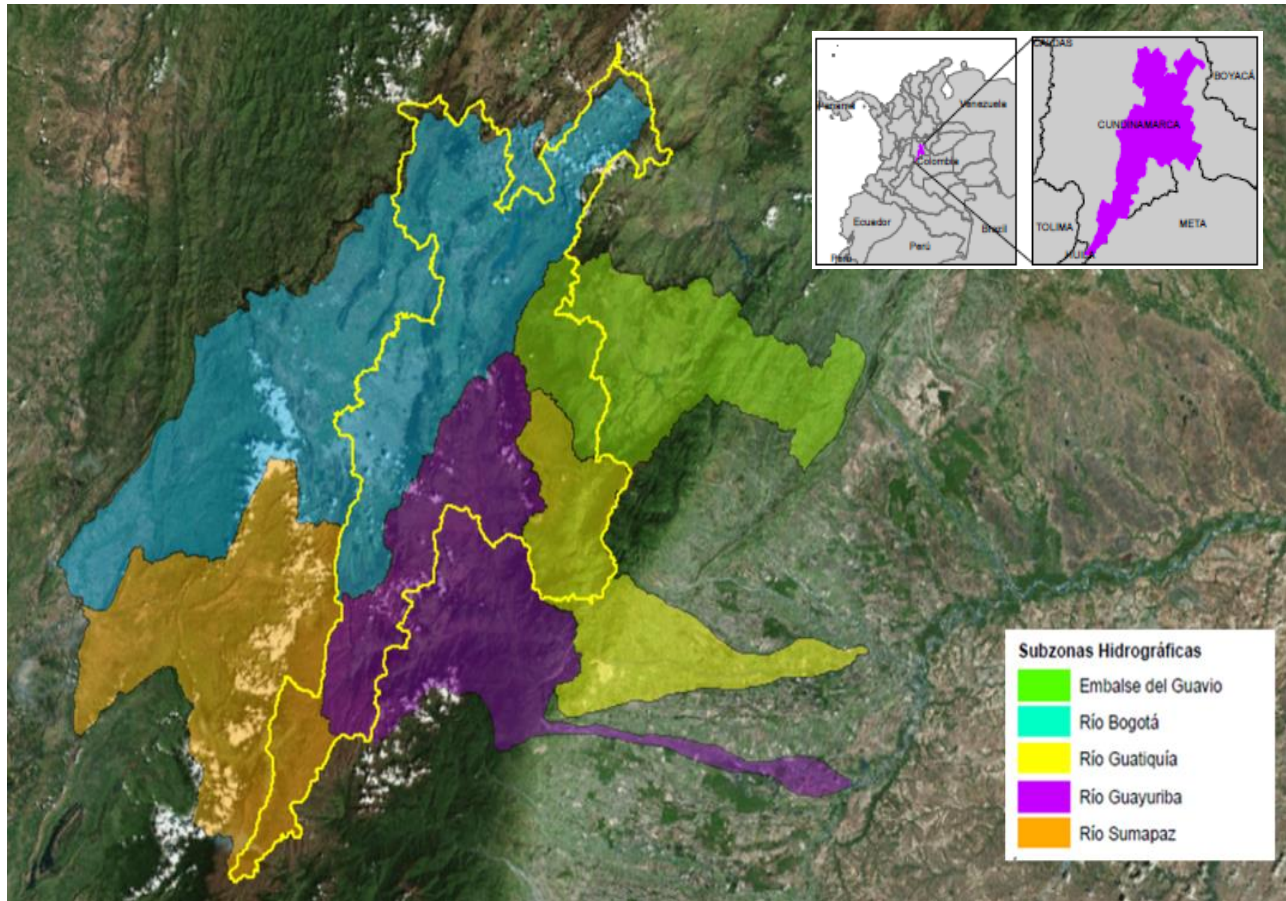
Resumen Ejecutivo  
Resultados Principales  
Conclusiones y Próximos pasos

## PARTE I: EVALUACIÓN DE LÍNEA BASE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	10
<b>2. VITALIDAD DEL ECOSISTEMA: RESULTADOS DE LOS INDICADORES</b>	13
2.1 Cantidad de Agua	13
2.1.1 Desviación del Régimen de Flujo Natural	13
2.1.2 Agotamiento del Agua Subterránea	14
2.2 Calidad del Agua	15
2.2.1 Calidad del Agua	15
2.3 Condición de Drenaje de la Cuenca	17
2.3.1 Conectividad del Flujo	17
2.3.2 Modificación del Canal	16
2.3.3 Naturalidad de la Cobertura Terrestre	18
2.4 Biodiversidad	17
2.4.1 Especies de Interés	19
2.4.2 Especies Invasoras	20
<b>3. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS: RESULTADOS DE LOS INDICADORES</b>	20
3.1 Servicios de Suministro	21
3.1.1 Confiabilidad del Suministro de Agua en Relación con la Demanda	21
3.1.2 Biomasa para el Consumo	21
3.2 Servicios de Regulación y Soporte	22
3.2.1 Regulación de Sedimentos	22
3.2.2 Regulación de la Calidad del Agua	23
3.2.3 Regulación de Enfermedades	23
3.2.4 Regulación de Inundaciones	23
3.3 Servicios Culturales	22
3.3.1 Conservación y Patrimonio Cultural	25
3.3.2 Recreación	23
<b>4. GOBERNANZA Y PARTES INTERESADAS</b>	26
4.1 Entorno propicio	27
4.1.1 Marco para la Gestión de la Cuenca	27
4.1.2 Normas para el Uso del Recurso	27

4.1.3	Incentivos y Regulaciones .....	28
4.1.4	Capacidad Financiera .....	28
4.1.5	Capacidad Técnica .....	29
4.2	Compromiso de las Partes Interesadas .....	29
4.2.1	Información y Conocimiento .....	29
4.2.2	Participación en el Proceso de Toma de Decisiones .....	30
4.3	Efectividad .....	30
4.3.1	Aplicación y Cumplimiento .....	30
4.3.2	Distribución de Beneficios de los Servicios Ecosistémicos .....	30
4.3.3	Conflicto Relacionado con el Agua .....	31
4.4	Visión y Gobernanza Adaptativa .....	31
4.4.1	Planificación Integral y Gestión Adaptativa .....	31
4.4.2	Mecanismos de Control .....	32
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>32</b>
<b>PARTE iI: ESCENARIOS FUTUROS</b>		
<b>1.</b>	<b>ESCENARIOS FUTUROS DE CAMBIO DE USO DE LA TIERRA .....</b>	<b>36</b>
1.1	Objetivos.....	36
1.2	Resultados .....	36
<b>2.</b>	<b>ESCENARIOS FUTUROS DE CAMBIO CLIMÁTICO .....</b>	<b>37</b>
2.1	Objetivos .....	38
2.2	Resultados .....	38
2.2.1	Cuenca Alta Río Bogotá.....	38
2.2.2	Zona Chingaza.....	39
<b>PARTE iIi: MODELO HIDROLÓGICO Y ESCENARIOS FUTUROS</b>		
<b>1.</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>41</b>
<b>2.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>42</b>
2.1	Cuenca Alta del Río Bogotá .....	42
2.2	zona chingaza .....	44
<b>PARTE iV: INDICADORES PARA EL FUTURO</b>		
<b>ANEXOS</b>		
<b>PARTE I: MÉTODO PARA EL CÁLCULO DE LOS INDICADORES .....</b>		<b>49</b>
<b>PARTE II: MÉTODOS PARA ESCENARIOS FUTUROS.....</b>		<b>55</b>
<b>PARTE III: METODO PARA MODELO HIDROLOGICO Y ESCENARIOS FUTUROS .....</b>		<b>56</b>
<b>REFERENCIAS</b>		

# ÁREA DE ESTUDIO DEL ÍNDICE DE SALUD DEL AGUA



Región Hídrica De La Ciudad De Bogotá. Corredor de Conservación (línea amarilla) y subzonas hidrográficas asociadas

# RESUMEN EJECUTIVO

## CORREDOR DE CONSERVACIÓN CHINGAZA - SUMAPAZ - GUERRERO - GUACHENEQUE - CERROS ORIENTALES

La iniciativa del Corredor de Conservación Chingaza - Sumapaz - Guerrero - Guacheneque - Cerros Orientales, nace en el 2007 en el marco de un plan estratégico entre la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB y Conservación Internacional Colombia – CI para avanzar en el diseño de una estrategia de ordenamiento territorial y ambiental entre los Parques Nacionales Naturales Chingaza y Sumapaz, la Reserva Forestal Bosque Oriental de Bogotá y la zona conocida como Páramo de Guerrero, con el propósito de conservar la biodiversidad existente en la zona y garantizar hacia el futuro la sostenibilidad de las cuencas hidrográficas (Bogotá, Sumapaz, Guavio, Guatiquía y Guayuriba) de las cuales depende el abastecimiento de agua para consumo humano de la población ubicada en Bogotá y 22 municipios aledaños.

Con el fin de apoyar la toma de decisiones para el proceso de gestión integral de las cuencas, evaluar el estado actual de los recursos hídricos y establecer prioridades para el futuro del Corredor de Conservación bajo un marco de demandas crecientes de agua y posibles recurrencias de eventos climáticos extremos, un consorcio liderado por Conservación Internacional (CI) y el Centro del Agua para América Latina y el Caribe (CDA) implementó el Índice de Salud del Agua como una herramienta innovadora para evaluar la salud de las cuencas en tres componentes: Vitalidad del Ecosistema, Servicios Ecosistémicos y Gobernanza y Partes Interesadas. Trabajando con socios del equipo técnico de los principales actores de la región, un equipo de expertos de Conservación Internacional midió 11 indicadores clave, con 25 subindicadores, escalados de 0 a 100 para facilitar la interpretación y promover los procesos participativos de toma de decisiones sobre el uso del territorio, permitiendo a los gestores comprender las sinergias y compensaciones para los escenarios futuros.

Las partes interesadas del gobierno a nivel nacional, regional y local, así como la industria, universidades y la sociedad civil, proporcionaron información y ayudaron a identificar las principales prioridades para la gestión del recurso hídrico en el Corredor de Conservación. Esta es la primera aproximación, hacia un análisis exhaustivo de la salud del agua que integra las 5 subzonas hidrográficas de las cuales depende el abastecimiento 9 millones de personas, y proporciona varias perspectivas para continuar con un análisis más detallado o posibles propuestas y acciones para una mejor gobernanza.

## RESULTADOS PRINCIPALES

Los resultados generales para las 5 subzonas hidrográficas se presentan en la Tabla 1. Los resultados para cuenca del Río Bogotá se encuentran resumidos en la Figura 2. A continuación se presentan el análisis de los resultados más relevantes:

- Los resultados presentados en este estudio evidencian la necesidad de mejorar los mecanismos de monitoreo y recolección de datos tanto biofísicos, como socio-económicos en las 5 subzonas hidrográficas estudiadas. La cuenca del río Bogotá es la única cuenca que cuenta con la información mínima requerida para hacer la evaluación completa e integral del Índice de Salud del Agua. Las cuencas de Guatiquía, Guayuriba, Guavio y Sumapaz, cuentan con menor información disponible, especialmente en la información requerida para evaluar la Vitalidad de los Ecosistemas.
- Los resultados encontrados para la cuenca del río Bogotá, indican que el componente de Gobernanza y Partes Interesadas (43) presentó la mejor puntuación, seguido del componente de Servicios Ecosistémicos (36) con una puntuación intermedia, mientras que el componente de Vitalidad del Ecosistema (25) presenta la menor puntuación. Este primer resultado nos permite contextualizar la realidad del territorio, en la cual es evidente que la salud de la cuenca, en sus tres dimensiones, se encuentra en una situación no satisfactoria.
- Dentro del componente de Servicios Ecosistémicos, el indicador de Regulación y Soporte, fue evaluado por las partes interesadas como el de mayor importancia dentro del componente de Servicios Ecosistémicos. La percepción general, es que los ecosistemas de alta montaña son indispensables para mantener la regulación de la calidad del agua, el transporte de sedimentos y las inundaciones. Sin embargo, estos tres indicadores obtuvieron la menor puntuación: Regulación Calidad de Agua (16), Regulación de Sedimentos (26), Regulación a Inundaciones (10). La degradación de la cuenca alta y media del Río Bogotá, dados los procesos de urbanización e industrialización, han disminuido la capacidad de la cuenca de regular los sedimentos, y las altas cargas de contaminantes han comprometiendo significativamente la capacidad de abastecimiento de agua potable desde el Sistema Agregado Norte – Tibitoc de manera costo efectiva, dado los altos costos de tratamiento asociados.
- Dentro del componente de Vitalidad de Ecosistemas, la calidad del agua (7), las especies invasoras (10) y la desviación del régimen de flujo natural (35), son los indicadores con las puntuaciones más bajas y por lo tanto las prioridades donde se hace necesario reunir esfuerzos entre las partes interesadas con el fin de mejorar sus condiciones. Sin embargo, dada la realidad del territorio, donde actualmente se prioriza el uso del suelo industrial y urbano, catalizar y enfocar acciones para mejorar los indicadores de Condición de la Cuenca de Drenaje – principalmente la naturalidad de la cobertura del suelo - permitiría una mejora integral del componente de Vitalidad de Ecosistemas.
- Gobernanza y Partes Interesadas recibió una puntuación de 43 y mejorar la puntuación debe ser prioridad para los tomadores de decisión, principalmente considerando las demandas crecientes de agua y los cambios climáticos que pueden generar conflictos entre los actores de las cuencas. En ese componente, Capacidad Técnica y Capacidad Financiera fueron evaluados como los subindicadores más bajos, ya que las partes interesadas perciben que hay dificultades en la capacidad financiera que limitan la inversión en educación y capacitación especializada, así como una dificultad en la capacidad de gestión y planificación estratégica.
- Los escenarios futuros pueden ayudar a identificar compensaciones (*trade-offs*) potenciales en el futuro al manejar los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica. Ambos escenarios de cambio climático (RCP 6.0 y 8.5) modelados para la región hídrica de Bogotá indicaran la posibilidad de aumentos de la disponibilidad de agua en la región. Estos cambios en la disponibilidad de agua en función de escenarios futuros tienen implicaciones sobre todos los atributos que constituyen la



salud de la cuenca hidrográfica. Por ejemplo, la calidad del agua es un atributo que se ve influenciado significativamente si se mantiene el escenario de *Business as Usual* de uso de la tierra, especialmente en la cuenca alta del Río Bogotá.

## CONCLUSIONES & PRÓXIMOS PASOS

Los resultados de la evaluación de la línea base del Índice de Salud del Agua encontrados concuerdan con la realidad del Corredor de Conservación y las subzonas hidrográficas asociadas. Visualizando en conjunto, todos los resultados obtenidos, se puede ver claramente que la salud del agua es mucho menor para la cuenca del río Bogotá que para las otras cuatro cuencas. Esto se debe a la gran presión que existe actualmente en la cuenca del río Bogotá, debido a que en ella se aloja gran parte de la población nacional, y una parte importante de la producción agropecuaria y energética del país. La menor puntuación de Vitalidad del Ecosistema en relación a Servicios Ecosistémicos demuestra que los servicios o beneficios esperados de la cuenca del río Bogotá, se suministran a costa de la integridad del ecosistema, principalmente afectando la calidad del agua y la red de drenaje. La fuerte dependencia de Bogotá con toda su región hídrica compuesta por las 5 subzonas hidrográficas, en relación al abastecimiento de agua para la ciudad, demuestra la necesidad de integrar la gestión de esas zonas hidrográficas estudiadas. La puntuación baja del componente de Gobernanza y Partes Interesadas indica que los tomadores de decisión pueden no estar preparados para los posibles conflictos por el uso del agua en los escenarios futuros de mayor demanda y cambios climáticos, teniendo en cuenta la fragilidad del sistema de gobernanza del agua en la región. Los servicios ecosistémicos relacionados con el agua son los que generan mayores situaciones de inequidad y conflictos socioeconómicos, por lo tanto, requieren una mayor atención por parte de los tomadores de decisiones con el firme propósito de generar condiciones de equidad desde una distribución justa e igualitaria del recurso.



Figura 1. Puntajes ponderados para la cuenca del río Bogotá



# PARTE I: EVALUACIÓN DE LINEA BASE

## 1. INTRODUCCIÓN

A partir de un convenio entre la Empresa de Acueducto de Bogotá – EAB y Conservación Internacional Colombia – CI, se desarrolló y diseñó la iniciativa del Corredor de Conservación en el año 2007. Éste conecta, a través de un criterio ecosistémico, a los Parques Naturales Nacionales Chingaza y Sumapaz, el páramo de Guerrero y la Reserva forestal Bosque Oriental de Bogotá. El propósito del corredor es conservar la biodiversidad existente en la zona, con el objetivo de garantizar hacia el futuro el mantenimiento de las cuencas hidrográficas, de las cuales depende el abastecimiento de agua de la ciudad de Bogotá y la región.

El Corredor de Conservación representa una de las áreas estratégicas más importantes del país, genera aproximadamente el 29% del PIB nacional (Cámara de Comercio de Bogotá, 2017) y aloja a la ciudad capital, Bogotá. Por esta razón es importante contar con una herramienta que permita medir y cuantificar el estado de los componentes ecosistémicos y socio económicos de las cuencas, y los componentes más críticos que pueden poner en riesgo la seguridad hídrica de la región. Gracias a un nuevo convenio entre el Centro del Agua para América Latina y el Caribe y Conservación Internacional, se escogió el Corredor de Conservación y las cinco subzonas hidrográficas, como cuencas piloto para aplicar la metodología del Índice de Salud del Agua y cuantificar cada uno de sus indicadores.

Partiendo de entrevistas realizadas a los actores de las cuencas y utilizando los resultados de los cálculos de cada uno de los subindicadores, se definieron los puntajes ponderados para los tres componentes del

Índice de salud del agua, Vitalidad del Ecosistema, Servicios Ecosistémicos, Gobernanza y Partes Interesadas (para mayor información sobre la metodología, dirigirse a [www.freshwaterhelthindex.org](http://www.freshwaterhelthindex.org))

**Tabla 1.** Resultados Índice de Salud del Agua para el Corredor de Conservación

INDICADORES	SUBINDICADORES	PUNTUACIÓN				
		Bogotá	Sumapaz	Guayuriba	Guatiquia	Guavio
VITALIDAD DEL ECOSISTEMA						
Cantidad de Agua	Desviación del Régimen de Flujo Natural	35			61	
	Agotamiento del Agua subterránea	77				
Calidad del Agua	Calidad del Agua	7	13			20
	Modificación del Canal	46	64	69	67	65
Condición de la cuenca de drenaje	Conectividad del Flujo	50	79	100	97	47
	Naturalidad de la Cobertura Terrestre	57	73	79	72	72
Biodiversidad	Especies de Interés	46				
	Especies Invasoras	10	10			40
SERVICIOS ECOSISTÉMICOS						
Suministro	Confiabilidad de Suministro	69	100			
	Biomasa para el consumo					
Regulación y Soporte	Regulación de Sedimentos	26	40	55	91	63
	Regulación de Calidad del Agua	16	32			55
	Regulación de Enfermedades	100		100	100	100
	Regulación de Inundaciones	10	14	44	24	
Cultural	Conservación y Patrimonio Cultural	49	51	63	63	53
	Recreación					
GOBERNANZA Y PARTES INTERESADAS			Valor integrado para todas las cuencas			
Entorno propicio	Marco Para la Gestión de Cuencas			43		
	Normas para el uso del Recurso			48		
	Incentivos y Regulaciones			57		
	Capacidad técnica			39		
	Capacidad Financiera			40		
	Información y Conomientos			45		
Compromiso de las partes interesadas	Participación en los procesos de toma de decisiones			43		
	Aplicación y Cumplimiento			42		
Efectividad	Distribución de beneficios de los servicios ecosistémicos			46		
	Conflicto relacionados con el agua			41		
Visión y Gobernanza	Mecanismos de Control			42		
	Planificación Integral y gestión adaptativa			41		

## 2. VITALIDAD DEL ECOSISTEMA: RESULTADOS DE LOS INDICADORES

El componente de Vitalidad del Ecosistema del Índice de Salud de Agua mide la integridad y el funcionamiento de los ecosistemas (arroyos, ríos, humedales y bosques) dentro de la cuenca. Los ecosistemas saludables son fundamentales para proporcionar agua limpia, mantener la biodiversidad de especies acuáticas y terrestres, protección contra inundaciones y una variedad de otros beneficios de los que la gente depende de las cinco cuencas relacionadas al corredor de conservación (Bogotá, Sumapaz, Guayuriba, Guatiquía, y Guavio). Los cuatro indicadores principales dentro del componente de Vitalidad del Ecosistema miden: Cantidad de Agua, Calidad del Agua, Condición de la Cuenca de Drenaje y Biodiversidad. Los datos provienen principalmente de fuentes gubernamentales oficiales y se presentan a escala de subcuenca, para mostrar cómo y dónde varían las puntuaciones de los indicadores dentro de las diferentes partes de la cuenca.

Al combinar los cuatro indicadores principales, la cuenca Bogotá recibe una calificación general de 25 para la Vitalidad del Ecosistema. Esto sugiere una salud baja del ecosistema, pero como lo indican los resultados detallados, algunos indicadores obtienen mejores puntajes que otros. Para las demás cuencas no se presenta una calificación general, debido a que no fue posible calcular la totalidad de los indicadores debido a la falta de información.

Los resultados finales corresponden a los valores del índice para cada subindicador de Vitalidad del Ecosistema. Los valores en gris corresponden a subindicadores por cuenca en los cuales no fue posible adquirir la información necesaria para realizar los cálculos correspondientes.

### 2.1 CANTIDAD DE AGUA

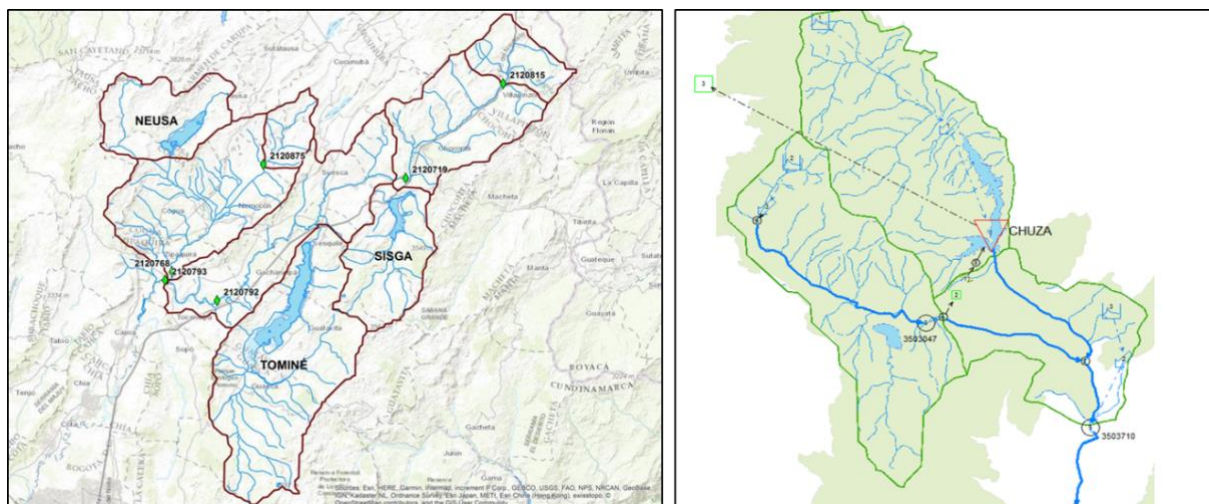
El indicador de Cantidad de Agua mide la cantidad y el flujo de agua a través de la cuenca, incluidas las aguas superficiales y subterráneas. Los ecosistemas dependen de los patrones estacionales de agua en la cuenca, y en muchos lugares, las personas también dependen de las fluctuaciones estacionales en la cantidad de agua. Cambiar este patrón natural es a menudo una consecuencia del desarrollo moderno (por ejemplo, la construcción de presas para regular los períodos de inundaciones y sequías), lo que representa una compensación a favor de satisfacer de las necesidades humanas relacionadas con el agua. Sin embargo, estas alteraciones también pueden tener consecuencias negativas para la biodiversidad acuática y para las personas que están acostumbradas a un patrón de flujo natural. La Cantidad de Agua se mide a través de dos subindicadores: Desviación del Flujo Natural y Agotamiento del Agua Subterránea. Donde la cuenca del río Bogotá obtuvo un puntaje de 35 para la desviación del régimen de flujo natural y 77 para el agotamiento de agua subterránea.

#### 2.1.1 Desviación del Régimen de Flujo Natural

El subindicador de Desviación del Régimen de Flujo Natural mide el grado en que los flujos de agua superficiales actuales se han desplazado de los flujos naturales históricos (es decir, predesarrollo). Los reservorios, la agricultura y los cambios en el uso del suelo pueden afectar el régimen y el volumen de los flujos superficiales, que en consecuencia afectan a los organismos acuáticos y los servicios ecosistémicos en las porciones inferiores de la cuenca. Tradicionalmente, el manejo de los recursos hídricos está orientado a suavizar la variabilidad estacional como, por ejemplo, para reducir los daños de

las inundaciones o asegurar el suministro de agua más adecuado, y por eso la alteración del régimen de las condiciones naturales puede ser necesaria para atender la demanda de algunas comunidades.

Para la cuenca del río Bogotá, el indicador fue calculado en la cuenca alta, donde se encuentran los embalses que regulan el agua en el río Bogotá y que abastece el 25% del agua potable de la ciudad de Bogotá. Para la cuenca del río Guatiquía, el indicador fue calculado también para su parte alta, donde se encuentra el embalse de Chuza que abastece el 70% del agua potable de la ciudad de Bogotá.



**Figura 2.** Cuenca alta río Bogotá y Cuenca alta río Guatiquía

**La zona de la cuenca alta del río Bogotá recibió una puntuación de 35 para la Desviación del Régimen de Flujo Natural** lo que significa una diferencia significativa entre los caudales demandados y los caudales producidos naturalmente por la cuenca. El puntaje bajo refleja la operación de tres reservorios grandes en la cuenca, Tominé, Sisga y Neusa que modifican los patrones de flujo de agua de las condiciones naturales. La política de operación de esos reservorios es controlada, por ejemplo, por la demanda de suministro de agua. La disponibilidad de agua para las personas representa un beneficio evidente proporcionado por los ecosistemas, pero a su vez tiene una compensación o un *trade-off* negativo para la biodiversidad (por ejemplo, al disminuir la conectividad de las corrientes y limitar el hábitat), y para la economía, pelo aumento en los sedimentos y la disminución de la calidad del agua afectada por la desviación, los cuales pueden requerir costos adicionales para el dragado o el lavado.

**La cuenca alta del río Guatiquía recibió una puntuación de 61 para la Desviación del Régimen de Flujo Natural lo que** indica un puntaje aceptable con respecto a los flujos desviados para suministro de la ciudad de Bogotá y el flujo natural de la cuenca. Este puntaje se debe al gran volumen de agua que es conducido desde la cuenca del río Guatiquía hacia la cuenca del río Bogotá el cual representa un 70% del suministro de la ciudad.

### 2.1.2 Agotamiento del Agua Subterránea

El subindicador de Agotamiento del Agua Subterránea mide el potencial de abatimiento de los acuíferos. Los recursos hídricos subterráneos representan una parte significativa de los recursos hídricos disponibles para uso por el hombre y, normalmente, sus reservas son muy superiores a las disponibilidades hídricas

superficiales. Cada vez más la extracción de agua subterránea viene aumentando y asumiendo importancia para atender las demandas de las comunidades rurales, urbanas e industriales, sin embargo, el Corredor de Conservación, el conocimiento sobre la cantidad real de pozos y sus monitoreos son bastante deficientes.

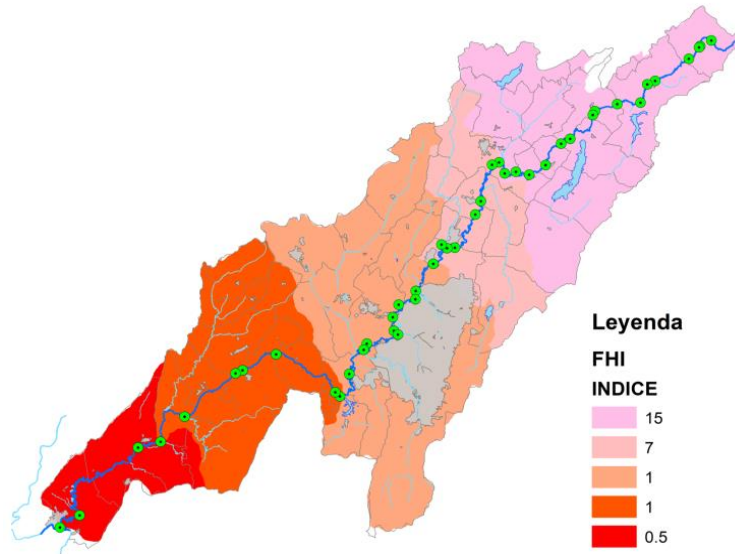
**La cuenca Bogotá recibió una puntuación de 77**, lo que indica que la cuenca del río Bogotá cuenta con acuíferos poco explotados proporcionalmente a su área. Sin embargo, es importante señalar que los acuíferos explotados se encuentran en su mayoría ubicados en la cuenca media del río Bogotá y concentrados cerca de ciudades con rápido crecimiento urbano, lo que ha causado problemas importantes de abatimiento en esta zona de la cuenca. Es importante tener en cuenta que se contó únicamente con la información de agua subterránea para las cuencas alta y media del río Bogotá, correspondientes a las áreas con estudios. Esto limita el resultado final del índice a estas dos zonas únicamente y el resultado de este subindicador debe ser considerado como parcial, y con la necesidad de expandir su investigación.

## 2.2 CALIDAD DEL AGUA

La Calidad del Agua en la categoría de Vitalidad del Ecosistema se refiere específicamente a la concentración de contaminantes en comparación con los umbrales necesarios para mantener la biodiversidad acuática en los ecosistemas, independiente de los impactos directos sobre la salud humana. La contaminación puede afectar la vida acuática directamente y también alterar el equilibrio ecológico, por ejemplo, desencadenando floraciones de algas nocivas. Este indicador está compuesto solamente por un subindicador, el indicador de Calidad de Agua.

### 2.2.1 Índice de Calidad del Agua

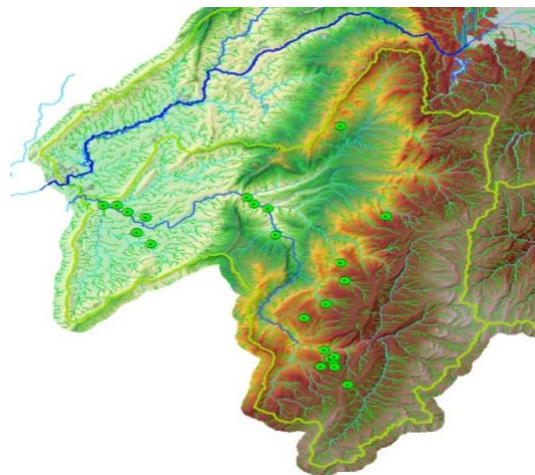
El Índice de Calidad del Agua mide cuánto las concentraciones de parámetros de calidad del agua se diferencian de los umbrales necesarios para mantener la biodiversidad acuática, seleccionando los parámetros considerados cruciales para la salud ecológica de los ecosistemas de agua dulce. Con respecto a los umbrales, estos se definieron con respecto a los mínimos necesarios para mantener los ecosistemas saludables. **El valor del indicador de Calidad del Agua para toda la cuenca del río Bogotá tuvo una puntuación de 7, lo que indica una calidad muy baja en todo el río Bogotá.** Además, se analizó el indicador por cada sección de la cuenta, acorde con la división usada por la CAR. Este análisis indica que la condición de la cuenca sigue siendo crítica, pues la cuenca alta considerada la que tiene la mejor calidad únicamente alcanza un valor de 15. La calidad de las aguas en estas áreas no es adecuada para el mantenimiento de la biodiversidad acuática, pero puede mejorarse con el aumento de las redes colectoras y plantas de tratamiento de aguas residuales, en áreas urbanas y rurales, y de las acciones de reforestación, especialmente en la cuenca alta del río Bogotá.



**Figura 3.** Indicador calidad de agua para la cuenca del río Bogotá

Para la cuenca del río Sumapaz se utilizaron los mismos umbrales, definidos para condiciones óptimas ecosistémicas que en el río Bogotá. **El valor del indicador de Calidad del Agua recibió una puntuación de 13, lo que indica una calidad baja en la cuenca del río Sumapaz.** Sin embargo, es importante tener en cuenta que la mayoría de las estaciones analizadas se encuentran en la cuenca baja del río, donde el río se encuentra más contaminado dada la degradación de los ecosistemas.

**Para la cuenca del río Guavio se obtuvo un puntaje de 20,** lo que indica también un puntaje bajo para calidad del agua. Nuevamente, para el cálculo de este índice se utilizaron estaciones disponibles sobre el río Guavio, las cuales miden los parámetros sobre aguas que están bastante influenciadas por descargas de los municipios aledaños, lo que resulta en valores del indicador sea más bajos.



**Figura 4.** Indicador calidad de agua para la cuenca del río Sumapaz

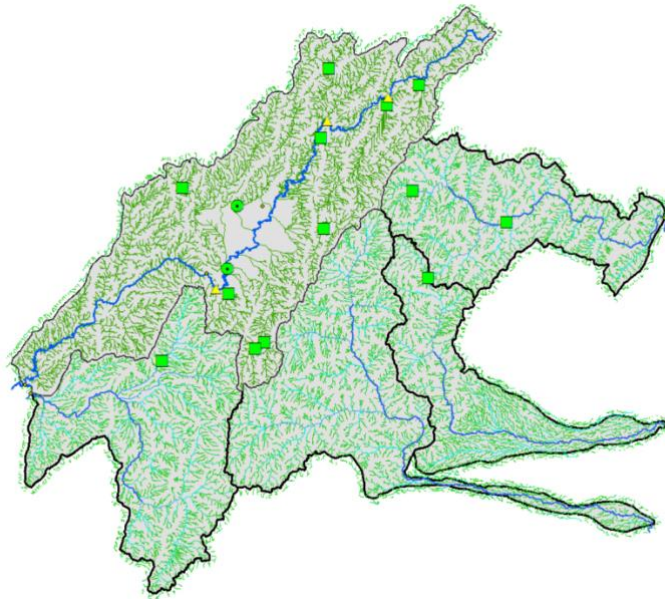


## 2.3 CONDICIÓN DE DRENAJE DE LA CUENCA

La Condición de Drenaje de la Cuenca mide el alcance de las modificaciones físicas tanto de la cobertura del suelo (por ejemplo, los bosques convertidos a la agricultura) como de los arroyos y ríos (por ejemplo, la construcción de presas o la ampliación de los canales), todo lo cual puede afectar el flujo y la calidad del agua, así como el hábitat para la vida acuática. Este indicador se compone de tres subindicadores: Conectividad del Flujo, Modificación del Canal y Naturalidad de la Cobertura Terrestre. **Cuando estos tres subindicadores se combinan, la cuenca del río Bogotá obtuvo una puntuación de 51.** Es decir, cambios significativos en la condición física de la cuenca están ocurriendo, lo que afecta negativamente la salud de los ríos y arroyos. Teniendo en cuenta la alta densidad de población y la dependencia humana en el río Bogotá, será un desafío mejorar sustancialmente este puntaje, por lo que se debe enfatizar la estabilización de la cuenca, restaurando las subcuencas más degradadas. En las cuatro subzonas hidrográfica adicionales, asociadas al río Guatiquía, Guayuriba, Sumapaz y Guavio existe un potencial mayor para proteger de manera efectiva las cabeceras de cuenca que aún tienen áreas naturales mejor conservadas.

### 2.3.1 Conectividad del Flujo

El subindicador de Conectividad del Flujo mide la fragmentación de la red de drenaje para el tránsito de las especies de peces. Como se puede observar en la Figura 5, la cuenca del río Bogotá presenta un número mayor de obstrucciones a la conectividad del flujo que las otras cuencas estudiadas, principalmente por las continuas obras de adecuación para garantizar el abastecimiento de la ciudad, pero también para reducir el riesgo de inundaciones. **Esto se refleja en la puntuación de 50 obtenido para la cuenca Bogotá,** lo que indica un grado moderado de fragmentación de la red de drenaje por obstrucciones artificiales. Este puntaje refleja la presencia de las tres presas (Tominé, Sisga y Neusa) en la red de arroyos, y de compuertas para el control de caudal sobre el cauce principal del río Bogotá. **El puntaje de 79 para la cuenca de Sumapaz** indica un grado de fragmentación más bajo. Las cuencas de Guayuriba y Guatiquía tienen índices muy altos, lo que indica una buena conectividad en sus ríos. La cuenca del río Guavio obtuvo una puntuación de 47, esto se debe a que la presa de Guavio se encuentra en la mitad de su cuenca, obstruyendo el paso de su cauce principal. Sin embargo, se necesita una investigación más detallada de la posibilidad de paso real para peces de todas las estructuras construidas en la red del río.



**Figura 5.** Barreras de flujo localizadas en las 5 subzonas hidrográficas (cuadrados en verde)

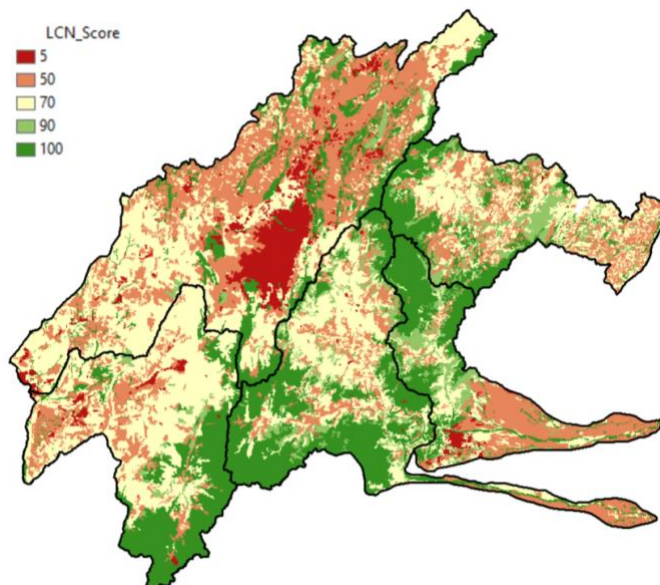
### 2.3.2 Modificación del Canal

El subindicador de Modificación del Canal mide la conectividad lateral, que afecta el intercambio de material entre arroyos y llanuras de inundación. La pérdida de vegetación ribereña (es decir, el uso de la tierra a lo largo de las áreas ribereñas) se utilizó como aproximación para la modificación de la margen de los canales y por medio de un análisis de intersección, se calculó la longitud y tipo de ecosistema para cada tramo de drenaje. En el caso de la cuenca del río Bogotá se tuvo en cuenta adicionalmente las zonas altamente modificadas por agricultura y ganadería, así como las zonas construidas de los centros urbanos de los municipios. **El puntaje de 46 para la cuenca Bogotá indica una modificación moderada-alta** de las corrientes principalmente debido a la urbanización y trabajos de ingeniería (por ejemplo, canalización y adecuaciones hidráulicas) para el abastecimiento público y el control de inundaciones. **El puntaje de 64 para la cuenca del río Sumapaz** indica modificación moderada, concentrada en la parte baja de la cuenca al igual que en las cuencas de Guayuriba, Guatiquía y Guavio.

### 2.3.3 Naturalidad de la Cobertura Terrestre

El subindicador de la Naturalidad de la Cobertura Terrestre (Figura 6) mide cuánto ha cambiado la cobertura vegetal por las actividades humanas. Cuando se degradan o se convierten en pastos, áreas agrícolas y áreas urbanas, el ecosistema pierde la capacidad de regular el ciclo del agua. **La cuenca del río Bogotá recibió una puntuación de 57, indicando una conversión moderada de la cobertura natural.** Debido a que la cobertura natural está estrechamente relacionada con la regulación hídrica de la cuenca, es importante considerar medidas para recuperar dicha cobertura en áreas estratégicas, como lo son los páramos de la cuenca alta del río Bogotá. **Para la cuenca del río Sumapaz se obtuvo un puntaje de 73 muy similar a Guatiquía y Guavio,** lo que significa una conversión moderada-baja. Sin embargo, se puede observar un cambio importante de la cobertura natural en la parte baja de la cuenca donde existe mayor desarrollo urbano y agrícola. La cuenca del río Guayuriba obtuvo el puntaje

más alto 79, lo que indica una salud buena de su cobertura vegetal. La diferencia en los puntajes de las cuencas radica en la extensión de los usos del suelo asociados a la agricultura y a las áreas urbanas, las cuales se visualizan en naranja y rojo en el mapa de naturalidad de la cobertura terrestre, y que tienen los puntajes más bajos, 5 y 50.



**Figura 6.** Naturalidad de la cobertura terrestre.

## 2.4 BIODIVERSIDAD

La Biodiversidad se refiere al estado de la población y las tendencias de las especies animales y vegetales que viven directamente o junto a ecosistemas de agua dulce. Datos sobre reducciones en las especies nativas o aumentos en especies no nativas (“invasoras”) se usan como indicadores de degradación del ecosistema. Además, la biodiversidad acuática a menudo se asocia positivamente con la pesca y servicios culturales como la recreación. El indicador de Biodiversidad se divide en dos subindicadores: Especies de Interés, que se enfoca principalmente en amenazas o especies de importancia local, y Especies Invasoras. Cuando combinados los dos subindicadores, **la cuenca Bogotá obtiene un puntaje de Biodiversidad de 28, lo que sugiere una salud baja.** Las puntuaciones de los subindicadores representan, sin embargo, sólo la proporción de las especies amenazadas y exóticas con relación al total de especies en la zona, siendo necesario datos sobre el comportamiento de crecimiento o decrecimiento del estatus de las especies para evaluar mejor este subindicador.

### 2.4.1 Especies de Interés

Las Especies de Interés mide el grado que las especies nativas, relacionadas a ecosistemas de agua dulce o ribereños, están amenazadas en las cuencas. Como no existen datos de monitoreo continuo de especie para la región del Corredor de Conservación, este indicador representa la proporción de especies con algún tipo de amenaza en relación con la diversidad total de especies ya observadas en la cuenca. Por esta razón es ponderada de acuerdo con la clasificación de la IUCN dada a cada especie en la cuenca del

río Bogotá. En este caso se obtuvo información de anfibios, reptiles y moluscos. No fue posible obtener datos espaciales sobre peces y aves relacionadas a ecosistemas de agua dulce en la Lista Roja de la IUCN y ni en otras fuentes para las cuencas de Sumapaz, Guayuriba, Guatiquia y Guavio.

**Especies de Interés recibió una puntuación de 46, indicando una salud moderada-baja de la biodiversidad en la cuenca del río Bogotá.** La confianza en este puntaje puede mejorarse al reunir datos de series temporales sobre las poblaciones de especies de interés para evaluar los cambios en las poblaciones a lo largo de lo tiempo.

#### 2.4.2 Especies Invasoras

El indicador de Especies Invasoras mide el predominio de especies invasoras en la cuenca, introducidas en el ecosistema, tanto intencionalmente como accidentalmente, y que son capaces de competir o imponer algún tipo de amenaza a las especies nativas. El aumento de la cantidad y las poblaciones de las especies invasoras puede presionar a las especies nativas, degradar los ecosistemas e impactar negativamente la economía y la salud humana. Para la cuenca del río Bogotá se utilizaron los estudios de especies invasoras realizados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca donde se identificaron especies de peces, moluscos, y anfibios presentes en la cuenca. Algunos ejemplos de estas especies son, la Tilapia de Nilo y el Cangrejo Rojo Africano. **Especies Invasoras recibió una puntuación de 10, indicando una cantidad crítica de especies invasoras en los ecosistemas tanto en la cuenca del río Bogotá cuanto en la cuenca del río Sumapaz. Para la cuenca del río Guavio se obtuvo un puntaje de 40,** lo que indica una cuenca con una alta cantidad de especies invasoras.

### 3. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS: RESULTADOS DE LOS INDICADORES

El componente de Servicios Ecosistémicos del Índice de Salud de Agua mide los beneficios relacionados con el agua, desde el suministro de agua potable hasta la protección contra inundaciones. Estos beneficios, a menudo proporcionados en lugar de o como complemento de la infraestructura gris, son una forma de conectar a las personas con los ecosistemas naturales de los que ellas dependen. Los Servicios Ecosistémicos se clasifican comúnmente según la forma en que las personas los experimentan, y esto se refleja en nuestros tres indicadores principales: Suministro (bienes extraídos del ecosistema), Regulación y Soporte (procesos que determinando lo funcionamiento de los ecosistemas) y Cultural (experiencias que las personas "obtienen" de los ecosistemas). Los datos para estos indicadores provienen de fuentes oficiales, incluidos los anuarios estadísticos. Los servicios culturales son generalmente difíciles de cuantificar, porque los datos no son generalmente recopilados de forma continua. **Al combinar los tres indicadores principales de los Servicios Ecosistémicos, la cuenca Bogotá recibe una puntuación total de 36, esto sugiere que la cuenca no está actualmente cumpliendo de forma satisfactoria las necesidades de bienestar de las partes interesadas, aunque existe una variación entre los servicios específicos.** La cuenca Sumapaz recibe una puntuación total de 51. Este es un puntaje parcial, ya que hacían falta datos para el cálculo de algunos subindicadores. También vale la pena señalar que estos indicadores y subindicadores fueron ponderados por las partes interesadas, lo que reveló una clara preferencia por los servicios de Regulación y Soporte de la cuenca (el doble en relación con los servicios de suministro y tres veces más en relación a los servicios culturales).

Los resultados finales corresponden a los valores del índice para cada subindicador de Servicios Ecosistémicos. Los valores en gris corresponden a subindicadores por cuenca en los cuales no fue posible adquirir la información necesaria para realizar los cálculos correspondientes.

### 3.1 SERVICIOS DE SUMINISTRO

Los Servicios de Suministro se refieren a los resultados físicos, principalmente cantidad de agua y pesca (biomasa) que las personas obtienen de los ecosistemas de agua dulce. Estos productos del ecosistema son insumos críticos para el desarrollo económico y son fundamentales para la seguridad alimentaria y seguridad hídrica para el abastecimiento. El indicador de Servicios de Suministro tiene dos subindicadores: Confiabilidad del Suministro de Agua en Relación con la Demanda y Biomasa para Consumo. **Cuando se combinó, el indicador de Suministro obtuvo un puntaje de 36 para la cuenca del río Bogotá, lo que indica una capacidad media-baja de la cuenca para suministrar servicios de suministro.** Sin embargo, el indicador de Biomasa para Consumo no fue calculado para el Corredor de Conservación dada la falta de información disponible. La cuenca del río Sumapaz obtuvo un puntaje de 100 lo que indica una capacidad total de la cuenca para abastecer la demanda de agua dentro de la misma. Las partes interesadas asignaron un mayor peso (0.8 en una escala de 0 - 1) al subindicador de Confiabilidad del Suministro de Agua en Relación con la Demanda en comparación con lo subindicador de Biomasa para Consumo (0.2), lo que indica que le dan mucho mayor importancia a asegurar el aprovisionamiento de agua para los diferentes usos.

#### 3.1.1 Confiabilidad del Suministro de Agua en Relación con la Demanda

El subindicador de la Confiabilidad del Suministro de Agua mide la capacidad actual de la zona de estudio para satisfacer la demanda de diferentes sectores (por ejemplo, urbano, residencial y agrícola), en toda el área, a pesar de la variabilidad estacional. **Para la cuenca del río Bogotá, una puntuación de 69 indica una capacidad moderada para abastecer por sí sola su propia demanda total.** A pesar de que el suministro de agua no se considera actualmente como un área problemática, es importante destacar que el puntaje toma en consideración el suministro de agua adicional por infraestructura gris (transvase de la cuenca del río Guatiquía), y no solo la cantidad de agua naturalmente disponible en la cuenca. Esto significa que la cuenca ya depende de otras fuentes de agua fuera de sus límites para cumplir con sus demandas. La cuenca del río Sumapaz obtuvo un puntaje de 100, lo que indica una capacidad muy alta de abastecer la demanda hídrica dentro de la misma.

#### 3.1.2 Biomasa para el Consumo

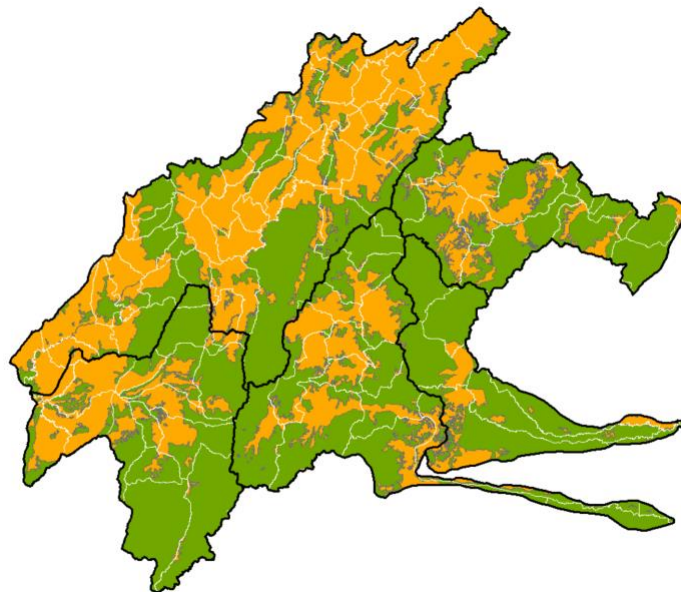
Biomasa para el Consumo evalúa la cantidad de biomasa (biota de agua dulce) que se utiliza o se compra para consumo. Actualmente, no hay datos disponibles sobre el consumo de pescados producidos naturalmente en el área de estudio. Aunque la pesca artesanal puede estar presente, no existe evidencia de poblaciones altamente dependientes de ese recurso como fuente nutricional, por lo que ese subindicador no fue calculado.

## 3.2 SERVICIOS DE REGULACIÓN Y SOPORTE

Los servicios de Regulación y Soporte se refieren a los procesos naturales que apoyan el suministro de agua y la pesca (por ejemplo, al mantener el agua limpia y fluyendo) y ofrecen protección contra inundaciones y otros peligros. Las decisiones de manejo de recursos hídricos con frecuencia pasan por alto los procesos naturales que ayudan a regular el agua en los ecosistemas, sin tener en cuenta que reemplazar estos servicios "gratuitos" con infraestructura gris puede llegar a ser mucho más costoso. El indicador de Regulación y Soporte comprende cuatro subindicadores: Regulación de Sedimentos, Regulación de la Calidad del Agua, Regulación de Inundaciones y Regulación de Enfermedades. **En general, la cuenca del río Bogotá obtuvo un puntaje de 20 para este componente.** Para el río Sumapaz se obtuvo un puntaje de 27. Las partes interesadas asignaron el mayor peso similar a los servicios de Regulación de la Calidad del Agua, Regulación de Inundaciones, y Regulación de Enfermedades (0.31, 0.29, 0.25 en una escala de 0 a 1, respectivamente). Así, la Regulación de Sedimentos es el servicio de Regulación y Soporte de menor importancia para las partes interesadas.

### 3.2.1 Regulación de Sedimentos

El subindicador de Regulación de Sedimentos mide la capacidad del ecosistema para moderar el flujo de sedimentos de la tierra a los arroyos y depositarlo en las llanuras de inundación o en las desembocaduras. Demasiada cantidad de sedimentos puede comprometer la capacidad de los embalses de almacenar agua o degradar la calidad del agua, mientras que muy poco sedimento distribuido aguas abajo priva la vida acuática y las tierras agrícolas de nutrientes críticos. **La Regulación de Sedimentos recibió una puntuación de 26, indicando una cuenca con un nivel de erosión muy alto, lo cual puede afectar el suministro de agua en la cuenca debido a la reducción de la capacidad de almacenamiento de agua en los embalses.** Para la cuenca del río Sumapaz se obtuvo un puntaje de 40, lo que indica un nivel de erosión moderado-alto, principalmente en su zona baja, al igual que la cuenca del río Guayuriba. La cuenca del río Guavio obtuvo un puntaje de 63, un valor moderado y la cuenca del río Guatiquia un puntaje alto de 91, indicado bajo problema de erosión.



## Figura 7. Mapa de áreas erosionadas

### 3.2.2 Regulación de la Calidad del Agua

El subindicador de Regulación de la Calidad del Agua se refiere a la capacidad del ecosistema de moderar las concentraciones de contaminantes en relación con los diferentes usos que pueda existir para el agua. Los ecosistemas naturalmente "filtran" muchos contaminantes del agua, pero esa capacidad puede ser fácilmente superada por el volumen de contaminantes liberados por la actividad humana. La diferencia con el indicador de Calidad de Agua en Vitalidad de Ecosistemas es que este indicador se enfoca en los umbrales necesarios para el consumo humano y otros usos dados el agua.

**El indicador de Calidad de Agua para la cuenca del río Bogotá recibió una puntuación de 16, puntaje bastante bajo si se tiene en cuenta que dichos servicios ecosistémicos están relacionados con la disponibilidad del agua para consumo humano y agrícola.** Los puntajes fueron más bajos en la porción de la cuenca más abajo, lo que indica que la capacidad de amortiguación del río se está estresando y que requiere un monitoreo más cercano. La cuenca de Sumapaz recibió una puntuación de 32, lo cual indica una calidad del agua baja. La cuenca del río Guavio obtuvo un índice de 55, lo que indica una calidad del agua regular. Al comparar estos puntajes con los puntajes de Calidad del Agua en la Vitalidad del Ecosistema, el control de las fuentes de contaminación no puntuales se presenta como una estrategia para una mejora fundamental.

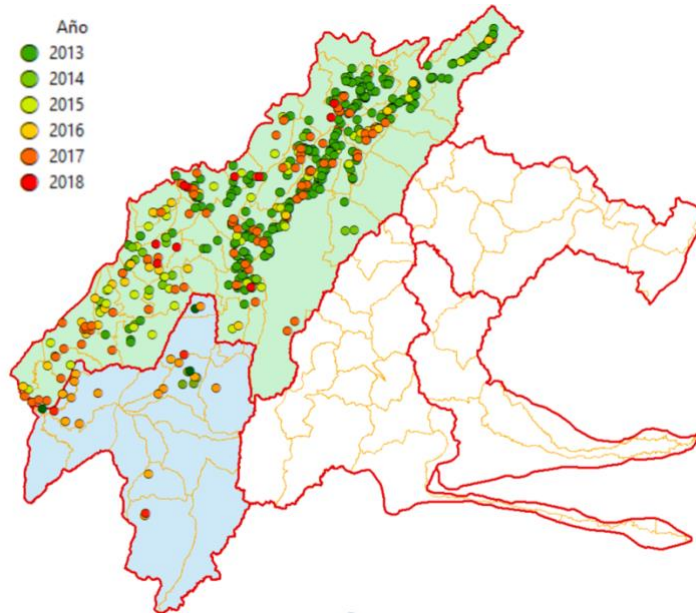
### 3.2.3 Regulación de Enfermedades

El subindicador de Regulación de Enfermedades mide la exposición de la población a enfermedades asociadas al agua. Los ecosistemas de agua dulce desempeñan un papel importante en la transmisión y la contención de patógenos y vectores asociados a diversas enfermedades. Debido a la falta de información de enfermedades asociadas al agua y de información relacionada con los umbrales máximos permitidos en el país, no fue posible calcular este indicador.

### 3.2.4 Regulación de Inundaciones

El subindicador de Regulación de Inundaciones mide la capacidad de los ecosistemas de agua dulce para reducir el volumen de escorrentía, a través de la disminución de los caudales de pico, aguas abajo y / o absorción de las aguas de inundación. Las prácticas usuales de impermeabilización del suelo durante el proceso de urbanización disminuyen la infiltración del agua, aumentando las inundaciones en los períodos de lluvia. **La Regulación de Inundaciones recibió una puntuación de 10 y 14 para las cuencas de Bogotá y Sumapaz, respectivamente**, como se muestra en la figura 9, los cuales indican que ambas cuencas tienen baja capacidad para desacelerar el momento de los flujos máximos y / o la absorción de las aguas de inundación (por ejemplo, en los humedales y las planicies de inundación). La cuenca del río Guatiquía también obtuvo un puntaje bajo de 24. La cuenca del río Guayuriba obtuvo 44 lo que indica una capacidad moderada-baja de regulación de inundaciones. Es importante, señalar que, bajas puntuajes para esto subindicador también puede indicar un menor riesgo de inundación, debido a la construcción de diques, terraplenes y otras obras de protección contra inundaciones en la cuenca. Nuevamente, esto es un ejemplo de compensación (*trade-off*) entre la demanda de beneficios que las personas dependen que refleje en la baja Condición de la Cuenca. Además, es probable que este sea un

tema de preocupación constante a pesar de la reducción del riesgo, ya que el cambio climático puede aumentar la intensidad de las lluvias.



**Figura 8. Ocurrencia de inundaciones 2013-2018 (CAR, 2018)**

### 3.3 SERVICIOS CULTURALES

Los Servicios Culturales se refieren a los beneficios no materiales que las personas obtienen (o experimentan) de los ecosistemas acuáticos, como su belleza estética, oportunidades recreativas y culturales o realización espiritual. Estos servicios culturales están vinculados a los beneficios de salud física, emocional y mental de las personas, así como a las oportunidades de desarrollo económico (como el ecoturismo). Los ecosistemas de agua dulce a menudo se asocian con la identidad cultural de una sociedad. Las partes interesadas asignaron el peso más bajo a este indicador (0.19 de una escala de 1), lo que sugiere que actualmente tiene poca importancia en relación con los servicios de Suministro y Regulación & Soporte de lo componente de Servicios Ecosistémicos. El indicador Cultural comprende dos subindicadores basados en los dos componentes del valor experiencial de los servicios de los ecosistemas de agua que pueden ser cuantificados: Conservación y Patrimonio Cultural, y Recreación. **Cuando se combinó, el indicador de servicio Cultura obtuvo un puntaje de 49, éste se basa únicamente en la puntuación de Conservación y Patrimonio Cultural**, ya que los datos para calcular el indicador de Recreación no estaban disponibles. Las partes interesadas del Corredor de Conservación dieron mayor importancia (0.82 de una escala de 1) a lo servicio de Conservación y Patrimonio Cultural en relación a lo servicio de Recreación.



### 3.3.1 Conservación y Patrimonio Cultural

El subindicador de Conservación y Patrimonio Cultural mide el grado en que los ecosistemas de agua dulce se conservan por su importancia cultural y ambiental. Lugares de conservación y patrimonio cultural están relacionados con valores culturales, religiosos y científicos de una sociedad. Este subindicador recibió una puntuación 49, 51 y 53 para las cuencas de Bogotá, Sumapaz y Guavio, respectivamente. Estos puntajes se basan en la cantidad de la red del río que está contenida dentro de alguna forma de área protegida e indican que las tres cuencas tienen una salud moderada. A pesar de que este subindicador es un proxy de la conservación real de los ríos para la preservación del patrimonio cultural, los valores señalan que las tres cuencas anteriores no están superando el objetivo mundial de proteger el 17% de las vías fluviales y los humedales (objetivo establecido por el Convenio sobre la Diversidad Biológica). Por otro lado, las cuencas de Guayuriba y Guatiquía, superan un poco ese objetivo al obtener puntajes de 63.

### 3.3.2 Recreación

La recreación mide cuánto la gente pasa su tiempo en actividades recreativas relacionadas con el agua. Actualmente el monitoreo sistemático del número de visitantes en cascadas, ríos, reservorios, entre otros cursos de agua, en áreas protegidas o no, no se están realizando o los datos no están disponibles, por lo cual, este subindicador no fue calculado para las cinco subzonas hidrográficas.



## 4. GOBERNANZA Y PARTES INTERESADAS

El componente Gobernanza y Partes Interesadas del Índice de Salud de Agua hace una ponderación de las estructuras de regulación (legales y técnicas) y los procesos mediante los cuales diversos grupos de actores sociales claves toman decisiones relacionadas con los recursos hídricos. A diferencia de los indicadores de Vitalidad de los Ecosistemas y Servicios Ecosistémicos, donde los datos se buscan y toman de fuentes formales y métodos estadísticos habituales, la medición de Gobernanza y Partes Interesadas se hace de manera diferente, acudiendo a la percepción subjetiva y la autoevaluación de los participantes en el estudio.

La búsqueda de la información de este componente se realiza a través de la aplicación de un formato de encuesta que se aplica a los diferentes actores, que tienen algún grado de incidencia en el área de estudio, especialmente en la toma de decisiones sobre los asuntos de ordenamiento ambiental territorial y gestión integral del recurso hídrico en las 5 subzonas hidrográficas.

La distribución de las Partes Interesadas que participaron en la gestión de la encuesta tuvo una representación de agentes gubernamentales del ámbito nacional, regional, departamental y municipal equivalente al 57%, un 18% de actores comunitarios organizados formalmente, 10% de Organizaciones No Gubernamentales – ONGs, 8% de actores sociales pertenecientes al sector industrial y 7% del sector académico. Sin embargo, el ejercicio inicial de aplicación del instrumento tipo encuesta se siguió aplicando de manera individual y en espacios cedidos por varios actores interesados, que podían agregar información adicional de cierta importancia sobre aspectos político – administrativos y gestión integral del agua en las 5 subzonas hidrográficas relacionadas con el Corredor de Conservación Chingaza – Sumapaz – Guerrero – Guacheneque – Cerros Orientales.

Combinando los resultados de la investigación, **las cuenca asociadas con el Corredor de Conservación tiene una puntuación de 43 para el componente de Gobernanza y Partes interesadas**, este número llama la atención, pues es bajo para el área de estudio a pesar de existir unas políticas y desarrollos legales en torno a la gestión integral del recurso hídrico, además de unos compromisos convencionales de orden internacional relacionados con la gobernanza del agua. Sin embargo, no es sorprendente considerando que mejorar la gobernabilidad del agua es un reto global.

Este puntaje se convierte en un reto y una prioridad para los tomadores de decisiones y actores sociales claves que tienen incidencia – directa o indirecta – en los asuntos de gestión del agua en el área de estudio, particularmente considerando los futuros aumentos en las demandas de servicios ecosistémicos y los impactos relacionados con la variabilidad climática. Es importante notar también que estos indicadores y subindicadores de Gobernanza y Partes Interesadas fueron ponderados por las partes interesadas. La ponderación reveló que no existe una preferencia particular entre los indicadores dado que los pesos fueron muy similares entre los subindicadores: Compromiso de las partes interesadas (0.29 en una escala de 1), Efectividad (0.26), Visión y Gobernanza (0.25) y Entorno Propicio (0.20). Sin embargo, hay una preferencia un poco menor para los asuntos de gobernanza que determinan el Entorno Propicio.

Sin embargo, es necesario hacer una revisión detallada de cada uno de los indicadores y subindicadores, como se destaca a continuación, para determinar las áreas de intervención estratégica para realizar acciones de mejora. Cabe señalar que las partes interesadas que participaron también recomendaron

que esta investigación se amplíe, tal vez de forma simplificada, a una sección transversal más amplia de las partes interesadas en la cuenca.

## 4.1 ENTORNO PROPICIO

Este indicador hace referencia al conjunto de políticas, regulaciones, mecanismos de mercado y normas sociales que existen para la gestión político – administrativa los recursos hídricos en el marco de un ordenamiento ambiental territorial que favorezca tanto el cuidado de los ecosistemas como la oferta de servicios ecosistémicos. En conjunto, estos atributos determinan qué derechos y activos están protegidos dentro de una cuenca, así como su gestión frente los conflictos.

El Entorno Propicio obtuvo una puntuación de 45. Esto sugiere una necesidad de mejora, que puede implicar establecer unas estrategias de mejoramiento inmediatas y que involucren a todos los actores sociales claves que tienen jurisdicción, competencias y responsabilidades en el área de estudio. Entre los cinco subindicadores del Entorno Propicio, las partes interesadas atribuyeron un peso similar a los subindicadores de Capacidad Financiera (0.26 en una escala de 1), Marco para la Gestión de la Cuenca (0.23), y Capacidad Técnica (0.23). Estas preferencias fueron seguidas por Incentivos y Regulaciones (0.15) y Reglas de Uso de los Recursos (0.12).

### 4.1.1 Marco para la Gestión de la Cuenca

El Marco para la Gestión de la Cuenca mide el grado en que las entidades político – administrativas y otros actores sociales claves con incidencia – directa o indirecta – en el área de estudio tienen competencias, jurisdicción y funciones relacionadas con el ordenamiento ambiental territorial, la gestión socioambiental, la planificación y desarrollo de infraestructura, movilización de recursos financieros y las acciones coordinadas en torno a la protección de los ecosistemas. El Marco para la Gestión de la Cuenca es un proceso complejo y que requiere la articulación de entidades públicas de todos los niveles (nacional, regional, departamental, municipal), organizaciones no gubernamentales - ONGs, sector empresarial y organizaciones comunitarias. La desarticulación entre estos grupos podría llevar a resultados ineficientes, inequitativos o ineficaces. **La Gestión de la Cuenca obtuvo una puntaje de 43.** Este valor sugiere una mejora en temas de coordinación, cumplimiento de la legislación vigente, toma de decisiones congruentes y participativas, viables y factibles en su implementación, establecimiento de prioridades de conservación y restauración ecosistémica, fortalecimiento de las capacidades técnicas y operativas para mejorar la gestión de recursos hídricos en las subzonas hidrográficas objeto de estudio.

### 4.1.2 Normas para el Uso del Recurso

Las Normas para el Uso del Recurso miden la claridad de los derechos del agua y de los recursos relacionados con el agua. Las normas claras y viables, sean formales o informales (por ejemplo, derechos de la comunidad), son importantes para el uso eficiente de los recursos hídricos y su distribución equitativa en toda la cuenca. A través de este subindicador se puede evaluar el grado de conocimiento y claridad que tienen los diferentes actores sociales en cuanto a los derechos y deberes en materia de Gestión Integral del Recurso Hídrico – GIRH, asunto que incluye por defecto la gestión integral de los

ecosistemas. Una sociedad informada y capacitada en los derechos y deberes que se derivan del uso eficiente del agua probablemente tendrá mejores condiciones en la distribución equitativa del agua y garantizará su sostenibilidad en todo momento.

**El subindicador Normas para el Uso del Recurso recibió una puntuación de 48, indicando que las partes interesadas perciben que las normas para el uso del agua no son claras y aplicables.** Este resultado tiene alusión a problemas sociales tales como la contaminación del recurso, los cambios en los usos el suelo, la falta de mecanismos de control ciudadano efectivos, las acciones ilegales que afecta a los ecosistemas, entre otros aspectos.

### 4.1.3 Incentivos y Regulaciones

Los Incentivos y Regulaciones se refieren a la disponibilidad de diferentes instrumentos de gestión tales como evaluaciones de impacto e incentivos financieros que, de acuerdo con las disposiciones legales nacionales y el llenado de ciertos requerimientos, pueden implementarse para el fomento de actividades humanas, sistemas productivos sostenibles, con un impacto negativo mínimo sobre los recursos hídricos y el entorno natural. En principio, una mayor diversidad de esos instrumentos de gestión deviene en mayores alternativas de solución y eficiencia frente a problemáticas de gestión del recurso hídrico. Para el caso del Corredor de Conservación que incluye las 5 subzonas hidrográficas se obtuvo un puntaje de **57, que es el más alto dentro de todos los subindicadores del componente Gobernanza y Partes Interesadas**, sin embargo, sigue siendo un valor crítico. Por ejemplo, aunque incentivos de tipo ambiental (pago por servicios ambientales – PSA, exenciones prediales, subsidios especiales a la conservación, etc.) están planteados en la ley colombiana, las partes interesadas perciben que hace falta la reglamentación pertinente y los protocolos técnicos de aplicación que los conviertan en verdaderas salvaguardas de las subzonas hidrográficas.

### 4.1.4 Capacidad Financiera

La Capacidad Financiera se refiere a la medición de las inversiones públicas y privadas necesarias para apoyar el desarrollo y la protección de los recursos hídricos, esto incluye obras de infraestructura tales como represas, plantas de tratamiento de aguas residuales y otras obras de alto costo; pero también instrumentos económicos asociados a las tarifas de los servicios públicos, especialmente acueducto y alcantarillado (tasas de usos y tasas retributivas o compensatorias), que tienen legalmente una destinación específica en materia ambiental, y buscan que los usuarios (incluidos individuos y corporaciones) ayuden a compensar los altos costos y financiar medidas adicionales. En el caso de la inversión pública para la región del Corredor de Conservación este tipo de financiación se canaliza a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS y las Corporaciones Autónomas Regionales – CARs que fungen como autoridades ambientales regionales, que deben proyectar inversiones relacionadas con la conservación, restauración ecosistémica y apoyo a sistemas productivos sostenibles. **La Capacidad Financiera obtuvo una puntuación de 40**, un valor que indica que los actores creen que existe una necesidad de mejorar la gestión financiera, e intensificar la planeación de ejecución de los recursos que se trasladan de diversos sectores públicos y privados al sector ambiental responsable de las inversiones ambientales locales, regionales y nacionales.

#### 4.1.5 Capacidad Técnica

La Capacidad Técnica se refiere a la formación y entrenamiento del personal que debe desempeñar funciones profesionales, técnicas y operativas relacionadas con la gestión integral del recurso hídrico. Para tales efectos, se requiere una articulación con la capacidad financiera para poder adelantar esos procesos de formación de manera efectiva y de acuerdo con las necesidades inherentes a la gestión integral del recurso hídrico. **La Capacidad Técnica obtuvo el puntaje más bajo, 39, dentro de todos los subindicadores del indicador de Entorno Propicio.** Esto indica que las partes interesadas perciben que hay dificultades en la capacitación especializada y priorización de oportunidades para la capacitación de funcionarios que trabajan en la gestión de los recursos hídricos.

### 4.2 COMPROMISO DE LAS PARTES INTERESADAS

El indicador de Compromiso de las Partes Interesadas se refiere a todas las formas en que los actores interactúan entre sí dentro de la cuenca, y el grado de transparencia y responsabilidad rodeando estas interacciones. Si bien el compromiso de las partes interesadas se lleva a cabo en diferentes formas en todo el mundo, generalmente se considera como un principio clave de buena gobernabilidad del agua para garantizar que se considere la gama completa de inquietudes antes de tomar las decisiones claves, para evitar posibles conflictos y asegurar una distribución equitativa de los beneficios. El indicador de Compromiso de las Partes Interesadas se divide en subindicadores sobre acceso y participación de la información en los procesos de toma de decisiones. **En general, el Compromiso de las Partes Interesadas en la región de las cuencas del Corredor de conservación recibió una puntuación de 44, el más alto entre los indicadores en el componente de Gobernanza y Partes Interesadas,** pero aún un área destacada como una preocupación. Las partes interesadas asignaron un peso similar entre los dos subindicadores de Información y Conocimientos (0.47 de una escala de 1), y Participación en los Procesos de Toma de Decisiones (0.53).

#### 4.2.1 Información y Conocimiento

La Información y Conocimientos mide la accesibilidad que tiene cualquier ciudadano a las fuentes de información (primaria, secundaria y terciaria) de los datos sobre la cantidad y calidad de agua, y con el manejo de recursos destinados a la gestión integral del recurso hídrico. Incluso en los casos en que los datos se recopilan de forma rutinaria, si no están disponibles para las partes interesadas para la investigación o el análisis, las decisiones pueden considerarse menos transparentes. La accesibilidad y el conocimiento de la información permite que la ciudadanía en general tenga parámetros suficientes para hacer control social y fiscal (por ejemplo, para determinar si una determinada política o proyecto está entregando los beneficios previstos), participar en los escenarios de discusión y negociación, establecer responsabilidades en cuanto a la toma de decisiones político – administrativas, y, tener un conocimiento de causa que facilite el diálogo y generación de confianzas (legitimidad). **El subindicador de Información y Conocimiento obtuvo una puntuación de 45,** sugiriendo la existencia de problemas en cuanto a la generación y circulación de la información, en términos de frecuencia, nivel de detalle y temas de interés para los actores; los escasos canales de divulgación para la información pública y el escaso flujo de información con calidad al que acceden las comunidades, para utilizarla rutinariamente en la toma de decisiones.

## 4.2.2 Participación en el Proceso de Toma de Decisiones

Este subindicador mide el alcance de participación e incidencia de las partes interesadas en la toma de decisiones sobre asuntos estratégicos de la gestión integral del recurso hídrico. Una mayor participación está generalmente asociada a una mejor transferencia de información, planes y políticas más específicos y equitativos, mayor transparencia y responsabilidad en la rendición de cuentas y la reducción de conflictos. Sin embargo, la participación social tiene diferentes escenarios y grados de injerencia dentro de la vida política y la planeación del territorio. La participación social está mediada por la capacidad y fortaleza institucional de cada uno de los actores sociales claves, el acceso a información suficiente y de calidad, el conocimiento y capacitación de los actores, las capacidades críticas para el diálogo deliberativo y, por supuesto, la existencia de los escenarios de encuentro generadores de confianza. **El subindicador de Participación en el Proceso de Toma de Decisiones obtuvo una puntuación de 43,** sugiriendo moderada participación de los actores en diferentes procesos de toma de decisiones en el Corredor de Conservación.

## 4.3 EFECTIVIDAD

El indicador de Efectividad se refiere a los resultados finales que se han logrado con las políticas, planes, programas y proyectos generados para la gestión integral del recurso hídrico y las decisiones de inversión asociadas. En el ámbito de la planeación la mejor efectividad corresponde a la menor brecha entre lo proyectado y lo implementado, entre lo que se espera en función de una decisión compleja y lo que realmente ocurre. Así, el indicador de Efectividad intenta evaluar si las decisiones están teniendo los efectos previstos. **El subindicador de Efectividad recibió una puntuación de 43** que sugiere que existe una distancia significativa entre la política y la práctica. Las partes interesadas asignaron similar importancia para los tres subindicadores de Efectividad: peso de 0.32 en una escala de 1 para Aplicación y Cumplimiento, peso de 0.34 para Distribución de Beneficios de los Servicios del Ecosistema, y peso de 0.32 para Conflicto relacionado con el Agua.

### 4.3.1 Aplicación y Cumplimiento

Este subindicador tiene el propósito de medir el grado de respeto y cumplimiento de las diferentes leyes y normas técnicas que sobre la gestión integral del recurso hídrico se encuentran vigentes en el contexto nacional y regional. Una “brecha de cumplimiento” puede reflejar una capacidad regulatoria insuficiente o una falta de responsabilidad, lo que debilita la efectividad de las leyes y políticas. **Para el caso del Corredor de Conservación, el subindicador obtuvo un puntaje de 42,** sugiriendo un baja aplicación y cumplimiento de las leyes y políticas relacionadas con la gestión de los recursos hídricos. El puntaje moderado-bajo señala que puede existir ineficiencia de los mecanismos e instrumentos de control fiscal.

### 4.3.2 Distribución de Beneficios de los Servicios Ecosistémicos

La Distribución de Beneficios de los Servicios del Ecosistema se refiere a los impactos de las decisiones sobre la gestión de los recursos hídricos, con especial atención a los diferentes segmentos de la sociedad:

trabajadores rurales, urbanos, migrantes y sin registro local, y aquellos empleados en sectores dependientes de los recursos, como los pescadores. Los servicios de los ecosistemas relacionados con el agua están, por su naturaleza, distribuidos de manera desigual en una cuenca, por lo que se deben tomar medidas (como el desarrollo de reservorios y redes de distribución de agua) para asegurar que los recursos se distribuyan equitativamente. **La región de las cuencas del Corredor de conservación recibió una puntuación de 46 para este subindicador** que, a pesar de ser el puntaje más alto de todos los subindicadores del indicador de Efectividad, sugiere que las partes interesadas piensan que los beneficios de los servicios del ecosistema no están distribuidos equitativamente entre los diferentes segmentos de la sociedad.

### 4.3.3 Conflicto Relacionado con el Agua

Este subindicador de Conflicto Relacionado con el Agua trata de dar cuenta de los diversos conflictos y tensiones sociales que se derivan cuando hay competición por recursos escasos como el agua. La tensión que se intensifica en batallas legales o en conflictos violentos impide el acuerdo y, por lo tanto, puede retrasar o debilitar las decisiones tomadas dentro de la cuenca. Aquí, restringimos la consideración a los conflictos sobre la asignación de agua, el acceso, la contaminación, el desvío o el desarrollo de infraestructura. **El subindicador de Conflicto Relacionado con el Agua recibió una puntuación de 41**, lo cual sugiere una serie de situaciones tensionantes no resueltas relacionadas con el uso del recurso hídrico y que mejorarlo buscando una mejor participación de las partes interesadas

## 4.4 VISIÓN Y GOBERNANZA ADAPTATIVA

Este indicador se estableció con el propósito de evaluar la capacidad para recopilar e interpretar información que sirve de fundamento para establecer las políticas, elaborar planes de manejo y ordenamiento de cuencas hidrográficas – POMCAs, y establecer escenarios prospectivos capaces de responder a las contingencias y cambios acelerados a los que se puede ver sometido un territorio determinado.

La gestión eficaz de los recursos hídricos requiere formas de gobernanza flexibles e integradas para hacer frente a las condiciones a veces cambiantes en una cuenca y la incertidumbre asociada con el cambio climático y otros retos emergentes. Por lo tanto, la planificación estratégica es un aspecto importante y es uno de los subindicadores aquí, pero también lo son los mecanismos de monitoreo y aprendizaje establecidos, que permiten actualizar y adaptar los planes estratégicos a medida que cambian las circunstancias. **El indicador de Visión y Gobernanza Adaptativa obtuvo un puntaje de 42**. Entre los dos subindicadores de Visión y Gobernanza Adaptativa, las partes interesadas atribuyeron mayor peso al subindicador de Mecanismos de Control (peso de 0.55 de una escala de 1) y menor peso a Planificación Estratégica y Gobernanza Adaptativa (0.45).

### 4.4.1 Planificación Integral y Gestión Adaptativa

La Planificación Integral y Gestión Adaptativa mide el grado en que la planeación estratégica integral (en el caso colombiano conformado por Planes de Ordenamiento Territorial - POT, Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas - POMCAs, Planes Generales de Ordenamiento Forestal, Planes de

Ordenamiento del Recurso Hídrico – PORH, Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos –PMAA, Planes de Desarrollo Municipal – PDM, etc.) tiene un desarrollo efectivo dentro del Corredor de Conservación y subzonas hidrográficas asociadas.

Se puede considerar que tener una planeación integral es una ventaja en cuanto se tienen objetivos bien definidos, una proyección presupuestal más adecuada y precisa en el mediano y largo plazo, una visión de futuro con menor incertidumbre y unas prioridades de desarrollo sostenible en torno a los recursos hídricos. Sin embargo, lo más importante es que la planeación debe poder ajustarse a medida que cambien las circunstancias, cuando haya nueva información disponible o cuando ocurren eventos imprevistos. **El subindicador de Planificación Integral y Gestión Adaptativa recibió una puntuación de 41**, lo que indica que las partes interesadas perciben problemas estructurales y funcionales en materia de planeación estratégica integral, y una baja capacidad para adaptarse a las circunstancias cambiantes.

#### 4.4.2 Mecanismos de Control

Mecanismos de Control se refiere a la calidad y el uso del monitoreo físico, químico y biológico de los recursos hídricos en la cuenca para guiar las políticas y los procesos de planificación. Idealmente, las decisiones sobre la gestión de los recursos hídricos se basan en datos e información sólidos, pero esto requiere recopilar dicha por medio de sistemas de monitoreo, personal capacitado, y hacer que esta información sea comprensible para los tomadores de decisión mediante espacios de socialización de resultados que suelen requerir grandes inversiones. **Para el área de estudio, este subindicador obtuvo un valor promedio ponderado equivalente a 42 puntos.** Este resultado presenta la posición de las partes interesadas frente a la necesidad de robustecer los mecanismos de monitoreo y evaluación.

## 5. CONCLUSIONES

Visualizando todos los resultados del Índice de Salud del Agua para las cinco subzonas hidrográficas en conjunto, se puede ver claramente que la salud del agua es mucho menor para la cuenca del río Bogotá que para las otras cuatro cuencas. Esto se debe a la gran presión que existe actualmente en la cuenca del río Bogotá, debido a que en ella se aloja gran parte de la población nacional, y una parte importante de la producción agropecuaria y energética del país. Por otro lado, la salud de la cuenca del río Guatiquía, de donde viene del 70% al 80% del agua que abastece la ciudad de Bogotá, cuenta con una muy alta puntuación del Índice de Salud del Agua. El sistema Chingaza genera costos doce veces menores a los generados en el tratamiento y distribución del agua de la cuenca del río Bogotá (Sistema agregado norte), el cual representa el 20% restante del suministro de agua de la ciudad. Es aquí donde se evidencia la importancia de preservar los ecosistemas productores de agua, como el páramo y el bosque alto andino, los cuales prestan servicios ecosistémicos de vital importancia para los habitantes de Bogotá y la región.

Los resultados presentados en este estudio evidencian la necesidad de mejorar los mecanismos de monitoreo y recolección de datos tanto biofísicos, como socio-económicos en las 5 subzonas hidrográficas estudiadas. La cuenca del río Bogotá es la única cuenca que cuenta con la información mínima requerida para hacer la evaluación completa e integral del Índice de Salud del Agua. Las cuencas de Guatiquía,



Guayuriba, Guavio y Sumapaz, cuentan con menor información disponible, especialmente en la información requerida para evaluar la Vitalidad de los Ecosistemas. En este sentido, las conclusiones que se presentan a continuación están basadas en el análisis de la cuenca del río Bogotá.

Los resultados obtenidos para la Cuenca del río Bogotá, indican que el componente de Gobernanza y Partes Interesadas (43) presentó la mayor puntuación, seguido del componente de Servicios Ecosistémicos (36) con una puntuación intermedia, mientras que el componente de Vitalidad del Ecosistema (25) presenta la menor puntuación. Este primer resultado nos permite contextualizar la realidad del territorio, en la cual es evidente que la salud de la cuenca, en sus tres dimensiones, se encuentra en un estado crítico. La menor puntuación de Vitalidad del Ecosistema en relación con Servicios Ecosistémicos demuestra que los servicios o beneficios esperados de la cuenca del río Bogotá se suministran a costa de la integridad del ecosistema, principalmente afectando la calidad del agua y la red de drenaje. Esto puede ser evidenciado por la relación entre los subindicadores de Calidad del Agua (7), Desviación del Régimen de Flujo Natural (35) y Confiabilidad del suministro de agua (69), que demuestra claramente que son priorizadas las intervenciones en la cuenca para la atención de las demandas de agua para la población y el sector industrial.

Dentro del componente de Vitalidad de Ecosistemas, la calidad del agua, las especies invasoras y la desviación del régimen de flujo natural, son los indicadores con las puntuaciones más bajas y por lo tanto las prioridades donde el ISA nos advierte que se hace necesario reunir esfuerzos entre las partes interesadas con el fin de mejorar sus condiciones. Sin embargo, dada la realidad del territorio, donde actualmente se prioriza el uso del suelo industrial y urbano, catalizar y enfocar acciones para mejorar los indicadores de Condición de la Cuenca de Drenaje – principalmente la naturalidad de la cobertura del suelo – permitiría una mejora integral del componente de Vitalidad de Ecosistemas.

El indicador de Regulación y Soporte fue evaluado por las partes interesadas como el de mayor importancia dentro del componente de Servicios Ecosistémicos. La percepción general, es que los ecosistemas de alta montaña son indispensables para mantener la regulación de la calidad del agua, inundaciones y de los sedimentos. Sin embargo, estos tres indicadores recibieron la menor puntuación: Regulación Calidad de Agua (16), Regulación de Sedimentos (26), Regulación a Inundaciones (10). La degradación de la cuenca alta y media del Río Bogotá, dados los procesos de urbanización e industrialización, han disminuido la capacidad de la cuenca de regular los sedimentos, y las altas cargas de contaminantes han comprometido significativamente la capacidad de abastecimiento de agua potable desde el Sistema Agregado Norte – Tibitoc de manera costo efectiva, dado los altos costos de tratamiento asociados. En este sentido, resulta relevante considerar que mejorar las puntuaciones de otros indicadores especialmente de Naturalidad de la Cobertura del suelo, por medio de la recuperación de los ecosistemas altoandinos, puede minimizar el impacto de esas intervenciones y modificaciones sobre la biodiversidad, calidad del agua y regulación de sedimentos.

El Corredor de Conservación está diseñado para priorizar algunas áreas estratégicas que permiten realizar trabajos de preservación, restauración y uso sostenible. Si se trabaja conjuntamente con los entes gubernamentales y se logra reducir las áreas agrícolas de alto impacto, y se remplazan por producciones sostenibles adaptadas al cambio climático, y a su vez se aumentan las áreas protegidas y restauradas, sería evidente un aumento en la vitalidad del ecosistema, principalmente en los índices de naturalidad de la condición de la cuenca de drenaje y biodiversidad. Esto tendría un impacto directo en los servicios ecosistémicos, y en el aumento del índice de calidad y cantidad de agua, regulación de sedimentos e inundaciones.

Por otro lado, un escenario tendencial de cambio de uso de la tierra podría alterar todos los indicadores negativamente. Si se continúa reduciendo el área de páramos, el volumen de agua disponible podría disminuir, reduciendo el agua disponible en las presas para consumo humano, lo que disminuiría el indicador de confiabilidad del suministro de agua. La reducción de bosques aumentaría los caudales pico, aumentando la frecuencia en los eventos de inundación (disminuyendo el puntaje de la regulación de inundaciones), aumentando el transporte de sedimentos (disminuyendo el puntaje de regulación de sedimentos) y la erosión de las cuencas.

Dentro del componente de Gobernanza y Partes Interesadas, los actores le dieron mayor peso al indicador de Compromiso de las partes interesadas (0.29). Sin embargo, la distribución de pesos fue relativamente equitativa entre los indicadores: Efectividad (0.26), Visión y Gobernanza (0.25) y Entorno Propicio (0.20). El resultado ponderado 43, convierte a la gobernanza del recurso hídrico en un reto y una prioridad para los tomadores de decisiones y actores sociales claves que tienen incidencia – directa o indirecta – en los asuntos de gestión del agua en el área de estudio, particularmente considerando los futuros aumentos en las demandas de Servicios Ecosistémicos y los impactos relacionados con el cambio climático. Los resultados generales de la mayoría de los subindicadores varían entre una puntuación entre 41 -47, siendo Capacidad Técnica el subindicador con menor puntuación (39), esta percepción se alinea con el resultado de Capacidad Financiera (40), ya que las partes interesadas perciben que hay dificultades en la capacidad financiera que limitan la inversión en educación y capacitación especializada.

También se observa una relación entre el indicador de Participación de las Partes Interesadas en la Toma de Decisiones (43) con el indicador de Información y conocimientos (45) y Mecanismos de Control (42). La accesibilidad y el conocimiento de la información permiten que la ciudadanía en general y los actores sociales claves en la gestión del agua tengan parámetros suficientes para hacer control social y fiscal, participar en los escenarios de discusión y negociación, establecer responsabilidades en cuanto a la toma de decisiones, y tener un conocimiento de causa que facilite el diálogo y legitimidad. En el presente estudio quedó claro que una red de monitoreo más robusta debe ser implementada en toda el área de estudio. La ampliación de las estaciones pluviométricas, instalación de estaciones de medición de transporte de sedimentos y puntos de monitoreo de la calidad del agua en la cuenca del río Bogotá, Guatiquía y Sumapaz, así como monitoreo de los pozos, son algunas de las acciones necesarias, que pueden contribuir al mayor conocimiento de los recursos naturales de la cuenca, la capacidad de planificación y la adaptación para los escenarios futuros.

Por último, la fuerte dependencia de Bogotá con la región, en relación al abastecimiento de agua para la ciudad, demuestra la necesidad de integrar la gestión de las 5 subzonas hidrográficas estudiadas. Los resultados obtenidos para los subindicadores de Distribución de los Servicios Ecosistémicos (46) y de la Planificación Estratégica Adaptativa (41) evidencian la percepción de los actores, donde los servicios ecosistémicos relacionados con el agua son los que generan mayores situaciones de inequidad y conflictos socioeconómicos, por lo tanto, requieren una mayor atención por parte de los tomadores de decisiones con el firme propósito de generar condiciones de equidad desde una distribución justa e igualitaria del recurso.



# PARTE II: ESCENARIOS FUTUROS

## 1. ESCENARIOS FUTUROS DE CAMBIO DE USO DE LA TIERRA

### 1.1 OBJETIVOS

Se modelaron dos escenarios de cambio de uso de la tierra, para las cinco sub zonas hidrográficas para el año 2035, con el objetivo de A) establecer un escenario "Business as Usual" (BaU) o basado únicamente en las tendencias recientes en la conversión de terrenos y B) crear un escenario de "Zonificación" que incorpora un plan de zonificación para el Corredor de Conservación que establece zonas prioritarias para la conservación de las coberturas naturales existentes y la restauración de áreas degradadas (por ejemplo, páramos y bosques). Estos escenarios ofrecen una visión inicial de las diferentes trayectorias que el uso de la tierra puede tomar en la región de Bogotá en un futuro próximo, pero también se utilizan como insumos para el modelo hidrológico, para evaluar los posibles impactos en los flujos de agua superficial.

Es importante tener en cuenta que los modelos de cambio de suelo no están diseñados para "predecir" el futuro, por lo que estos escenarios se crearon para ayudar a explorar posibles cambios en el futuro y asociarlos a potenciales impactos. Como se mencionó anteriormente, este ejercicio es una primera aproximación, por lo que se recomienda examinar en mayor detalle los planes de desarrollo y ordenamiento territorial a nivel de cuencas, como también analizar los impactos adicionales, en particular sobre la calidad del agua y la erosión, que el análisis actual no proporciona.

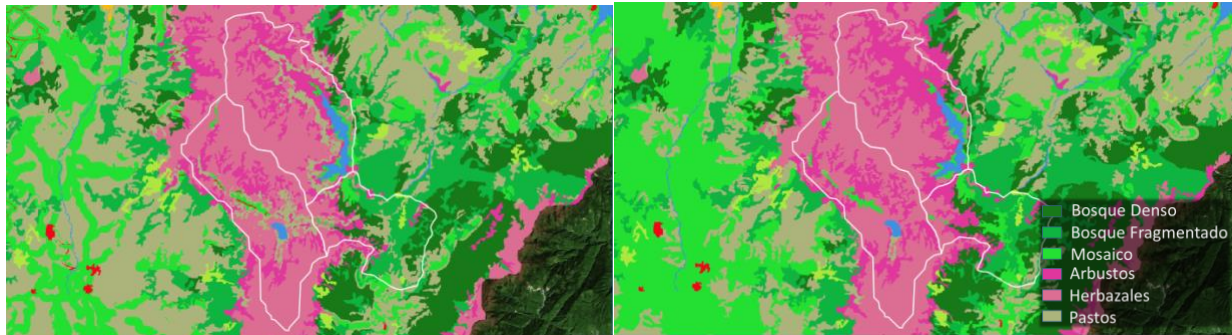
### 1.2 RESULTADOS

Dado que la demanda de tierra se trata de manera equitativa en ambos escenarios, los escenarios BAU y de Zonificación muestran la misma cantidad total de cambio dentro del área modelada. Aproximadamente el 40% del Bosque Denso existente en 2012 está degradado o perdido (alrededor del 60% del total se convierte en Bosque Fragmentado, el 25% en Mosaico y el 15% en Pastos). Además, el 40% de las tierras de Mosaico en 2012 se degradaron (a Pastos) o se perdieron (a tierras urbanas). Finalmente, el 12% de los páramos existentes se degradaron y se convirtieron en pastos o mosaico.

La distinción clave entre los escenarios es, por lo tanto, donde ocurren exactamente estos cambios en el uso de la tierra, con la implementación de la estrategia del Corredor de Conservación como un intento de proteger las tierras de mayor importancia estratégica bajo los criterios de funcionalidad ecológica y seguridad hídrica.

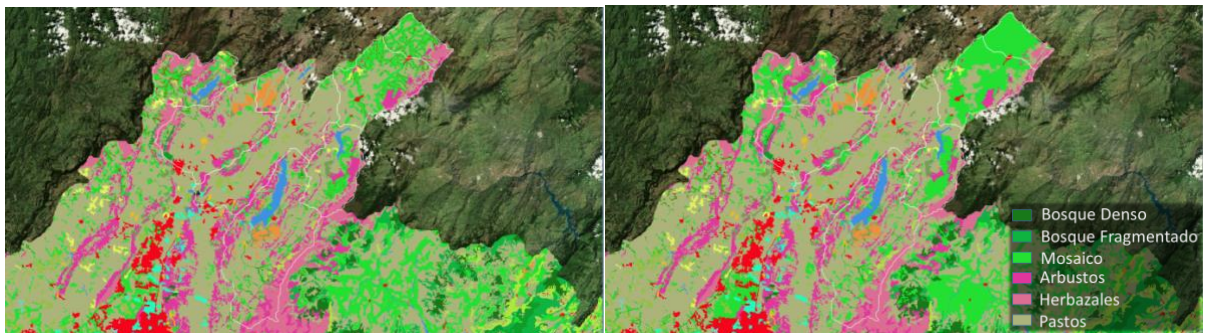
Bajo el escenario de Zonificación, entonces, la cobertura natural dentro del Corredor está comparativamente mejor protegida, que en las áreas fuera del mismo. En la Figura 9, esto es evidente

en la cantidad de Arbustos y Herbazales (las clases colectivas de páramos) que se conservan en comparación con el escenario BAU, principalmente cuando se enfocan en las cuencas pertenecientes al sistema de abastecimiento de Chingaza. Sin zonas de conservación implementadas en el escenario de Zonificación, grandes secciones de los páramos muestran una probabilidad de convertirse al uso agrícola (representado en general como pastos), lo que tendría un impacto en la calidad del agua que ingresa a los embalses estratégicos para el abastecimiento de Bogotá y los municipios aledaños.



**Figura 9.** El escenario BAU 2035 (izquierda) sugiere que podría producirse una degradación sustancial alrededor del embalse de Chuza, en ausencia del PNN Chingaza, presentado en el escenario de Zonificación 2035 (derecha).

De manera similar, en el escenario BAU, la cuenca alta del río Bogotá (Figura 10), la cual actualmente se encuentra altamente degradada, se observa una mayor conversión de las tierras calificadas como Mosaico a Pastos. Nuevamente, esta pérdida de áreas boscosas se da como una consecuencia de la expansión agrícola. Este efecto se mitiga en el escenario de Zonificación, el cual podría tener un impacto positivo en la calidad del agua que llega al sistema norte de abastecimiento de la ciudad - Tibitoc, así como en la cantidad de sedimentos entregados a los embalses de Neusa, Sisga y Tominé.



**Figura 10.** En este caso, el escenario BAU 2035 (izquierda) sugiere que podría ocurrir una degradación mucho mayor en las cabeceras del río Bogotá, especialmente cuando las tierras de Mosaico existentes se convirtieron completamente a la agricultura, en ausencia de zonas de conservación representadas en el escenario de Zonificación 2035 (derecha).

## 2. ESCENARIOS FUTUROS DE CAMBIO CLIMÁTICO

## 2.1 OBJETIVOS

El modelamiento tuvo el objetivo principal de establecer escenarios basados en los potenciales cambios en los patrones de temperatura y precipitación para dos Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Los RCPs son caracterizados como vías o trayectorias que representan proyecciones de las concentraciones de emisión de gases invernadero siguiendo su trayectoria a través del tiempo. Son representativos porque concentran escenarios diferentes, pero con forzamientos radiactivos similares. Existen distintos tipos de escenarios RCP diferenciados por la magnitud de la forzante radiactiva. Los escenarios de cambio climático del MCG CSIRO-Mk3.6.0 utilizados en este estudio fueron el RCP6.0 y RCP8.5, escogidos a partir de las recomendaciones de la Tercera Comunicación Nacional de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (IDEAM, 2017). El escenario 6.0 es un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a una condición media y el RCP 8.5 conduce a un nivel muy alto de emisiones de gases de efectos invernaderos (GEI). Estos escenarios ofrecen una visión inicial de las diferentes trayectorias que el clima, en la cuenca alta del río Bogotá y la zona de Chingaza puede tomar en un futuro próximo. Además, los resultados del modelo de escenarios de cambio climático, es decir, las series temporales de temperatura y precipitación para el futuro fueran utilizadas como insumo a los modelos hidrológicos para entender los efectos sobre la posible disponibilidad del recurso hídrico en el área del estudio.

Es importante tener en cuenta que los modelos de cambio climático no están diseñados para “predecir” el futuro, por lo que estos escenarios se crearon para ayudar a explorar posibles cambios en el futuro y sus posibles impactos.

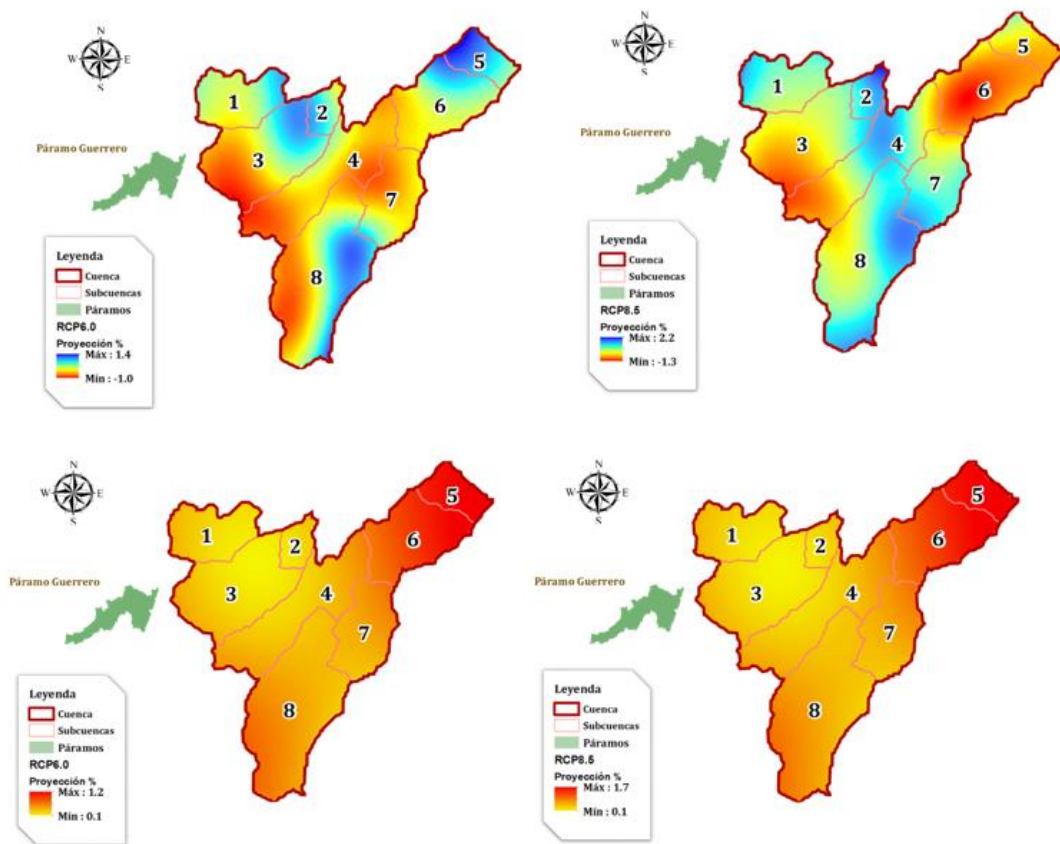
## 2.2 RESULTADOS

### 2.2.1 Cuenca Alta Río Bogotá (CARB)

Los resultados indican, en general, que los cambios de patrones de precipitación para el periodo de 2011-2040 pueden ser muy bajos en relación con la línea de base (periodo de 1981-2010). En la Figura 11, se puede observar cómo los incrementos en la proyección de la precipitación en porcentaje de cambio para el escenario RCP6.0 se esperan para las zonas altas de la CARB. Mientras que las zonas intermedias serán mayormente afectadas por disminuciones en la proyección que se pudieran traducir en periodos secos más largos. A diferencia del escenario RCP6.0, en las cuencas 5 y 6 para un escenario RCP8.5 se observan decrementos en la proyección y los incrementos se mantienen en las cuencas de las partes altas de esta zona (subcuencas 2, 4, 7 y 8). Así mismo, se puede concluir que en general al pasar a un escenario con mayor radiación solar y gases de efecto invernadero la tendencia se invierte en la proyección de la precipitación para la CARB.

En la parte baja de la Figura 11 se muestran los resultados para la proyección de temperatura para los escenarios RCP6.0 y RCP8.5, respectivamente. El comportamiento de la proyección para ambos casos es muy similar, en donde el mayor incremento se generaría en la parte norte de la CARB. La diferencia entre el escenario RCP6.0 y el RCP8.5 es que el segundo presentaría un aumento de 0.5% con respecto al primero (de 1.2% a 1.7%).

La red de estaciones climatológicas de precipitación en la CARB presenta una buena distribución sobre la zona. Así mismo, los datos fueron de buena calidad y cantidad. Sin embargo, no se puede decir lo mismo de las estaciones climatológicas de temperatura, para las cuales se tuvo que optar por estaciones alejadas a la zona. Se recomienda renovar las estaciones climatológicas de precipitación para tener en el mismo punto la recolección de diversa información meteorológica importante, como la temperatura.



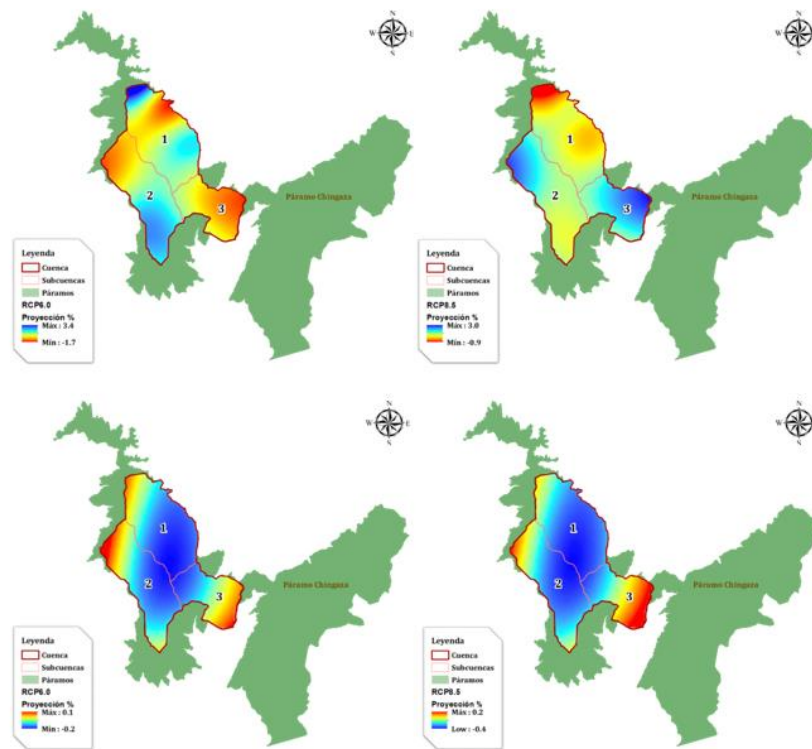
**Figura 11.** Proyecciones de cambio para precipitación (arriba) y temperatura (abajo) para dos escenarios de cambio climático RCP 6.0 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha) para el periodo de 2011-2040 para la cuenca Alta del Río Bogotá. Los resultados se presentan en porcentaje, es decir, la variación media de la variable precipitación en relación con el periodo de base (1981-2010).

### 2.2.2 Zona Chingaza

La zona de Chingaza comprende un área total de 252.74 km<sup>2</sup>, está caracterizada por ecosistemas de páramo y constituye un Parque Nacional Natural en donde también se encuentra el Embalse de Chuza. En esa área se observa que los decrementos más altos en la proyección de la precipitación en porcentaje de cambio para el escenario RCP6.0 se dan hacia las afueras del páramo y muy cercanos al embalse de Chuza. En contraste, las zonas intermedias serían mayormente afectadas por incrementos en la proyección.

Los resultados de la proyección para un escenario RCP8.5 indican que los patrones se invierten respecto a la proyección para un escenario RCP6.0, lo cual se interpreta como que en un futuro con mayor radiación solar y gases de efecto invernadero, la proyección de la precipitación tendería a aumentar. En este escenario se generarían incrementos hacia las afueras del páramo menos en la parte norte donde se observa una tendencia a la disminución en la precipitación proyectada.

En la parte baja de la Figura 12 se muestran los resultados para la proyección de temperatura para los escenarios RCP6.0 y RCP8.5. El comportamiento de la proyección para ambos casos es muy similar tendiendo hacia la disminución en la proyección de la temperatura, lo cual se esperaría principalmente hacia el centro de las tres subcuencas. Una escasa diferencia entre el escenario RCP6.0 y el RCP8.5 se identifica con un aumento del 0.1% en el segundo escenario, valores muy pequeños para poder ser tomados como incrementos o decrementos en la zona.



**Figura 12.** Proyecciones de cambio para precipitación (arriba) y temperatura (abajo) para dos







escenarios de cambio climático RCP 6.0 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha) para el periodo de 2011-2040 para la zona de Chingaza. Los resultados se presentan en porcentaje, es decir, la variación media de la variable precipitación en relación con el periodo de base (1981-2010).

# PARTE III: MODELO HIDROLÓGICO Y ESCENARIOS FUTUROS

## 1. OBJETIVOS

El modelado hidrológico tuvo dos objetivos principales A) estimar los flujos que se esperarían en condiciones naturales. Esa información fue necesaria para el cálculo del subindicador Desviación del Régimen de Flujo Natural del componente de Vitalidad del Ecosistema; y B) estimar los efectos de escenarios futuros (cambio climático y cambio de uso de la tierra) sobre la disponibilidad de agua. El Índice de Salud del Agua fue aplicado en las cinco subzonas que constituyen el corredor de conservación.

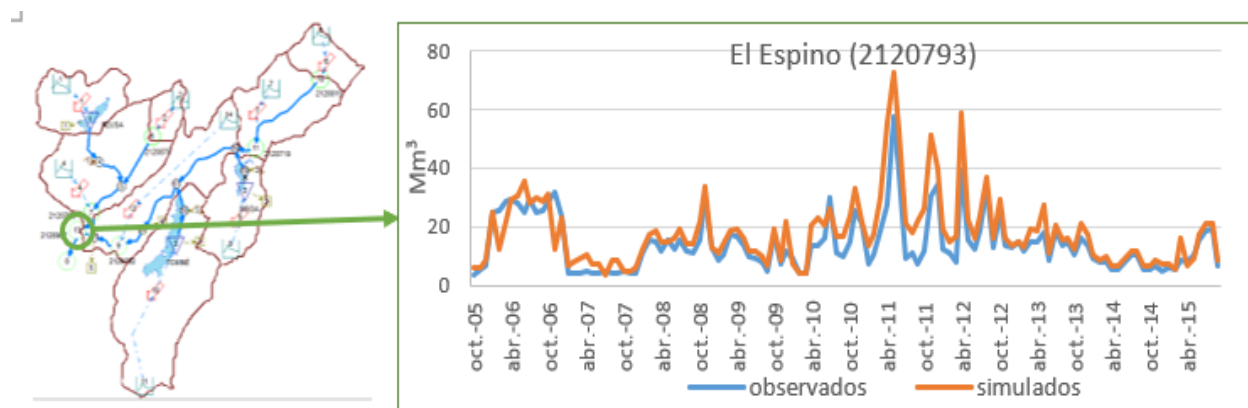
Sin embargo, la definición del área de estudio de la oferta hídrica y el cálculo del indicador de cantidad de agua, fue enfocado en las 2 zonas estratégicas para el abastecimiento: 1) La cuenca alta del río Bogotá, 2) la zona de Chingaza. Es importante tener en cuenta que el modelo hidrológico no es diseñado para “predecir” el futuro, por lo que los efectos modelados de los escenarios futuros sobre los patrones se crearon para ayudar a explorar posibles trayectorias de los caudales en función de posibles cambios en el futuro. Es información es relevante para ayudar en la planeación de acciones de manejo de los recursos hídricos.

## 2. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los diferentes escenarios de cambio climático y cambio de uso de la tierra modelando el impacto en la respuesta hídrica.

### 2.1 CUENCA ALTA DEL RÍO BOGOTÁ

Para evaluar los diferentes escenarios futuros en la cuenca alta del río Bogotá se usó como base el modelo calibrado (Figura 13) obtenido para el modelo de la cuenca alta del río Bogotá, específicamente para la estación final El Espino (#2120793).

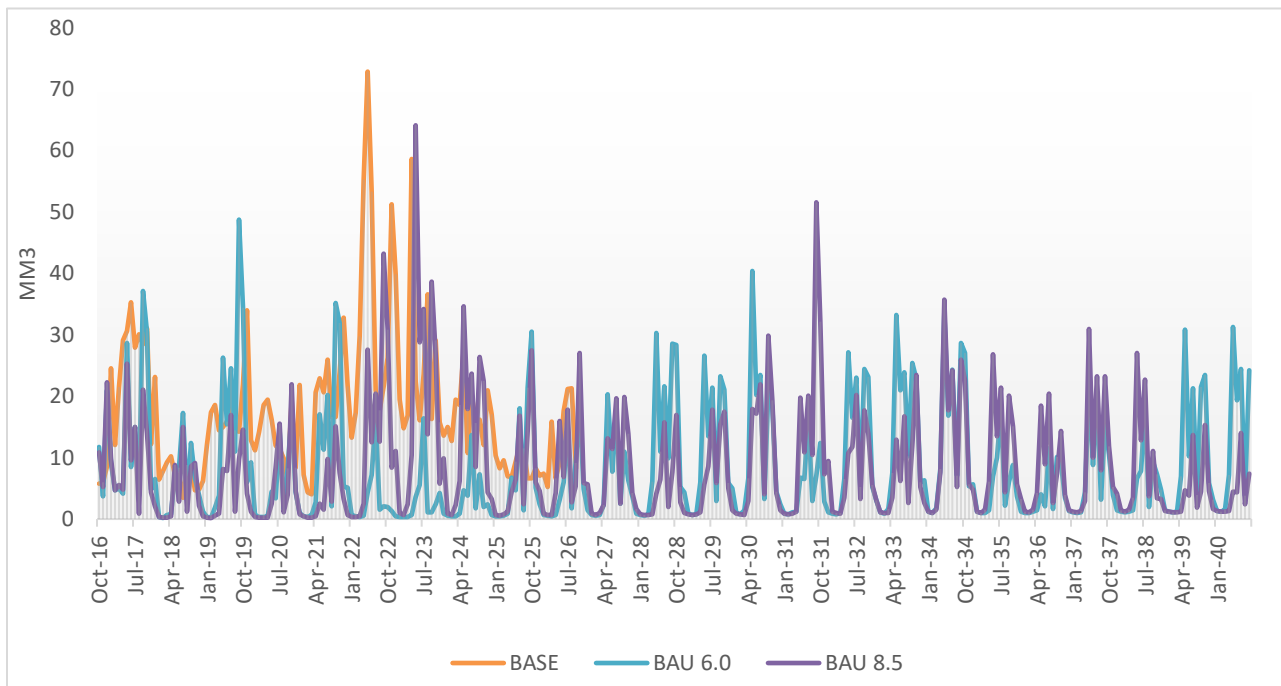


**Figura 13.** Serie de datos de caudal simulados con Aquatool respecto a las observadas para la estación El Espino (2120793), para el periodo de simulación de 2005 a 2015

Los resultados indican que, en términos generales, el régimen hidrológico no se vería afectado por los cambios en el uso de la tierra, sin embargo, si se evidencia una reducción en el caudal medio mensual entre 3 y 18% respecto a los resultados basados en el histórico, siendo Marzo y Septiembre los meses con mayor reducción para los dos escenarios. Esta variación observada se estima como significativa en consideración a la importancia de esta cuenca para el abastecimiento de agua potable de la ciudad de Bogotá y su área metropolitana.

Además de la evaluación independiente de las variaciones por cambio climático y cambio de uso de la tierra (Figura 14), se presenta el impacto de ambos escenarios combinados en el modelo hidrológico. Es decir, que se generaron series de caudales futuros con los datos proyectados de temperatura y precipitación para cada escenario de cambio climático y además se incluyeron las variaciones de infiltración en el suelo (Hmax) asociada a los escenarios de cambio de uso de la tierra.

Los resultados de las variaciones conjuntas son muy similares a las obtenidas para los escenarios de cambio climático, esto debido a que las proyecciones en el cambio de uso de la tierra por sí solas no mostraron cambios significativos a la luz de las variaciones que exhiben las modificaciones en la precipitación y la temperatura. Aun así, estos resultados son importantes como una primera aproximación a las implicaciones de estas variables climáticas y antrópicas en la oferta hídrica futura de la región.



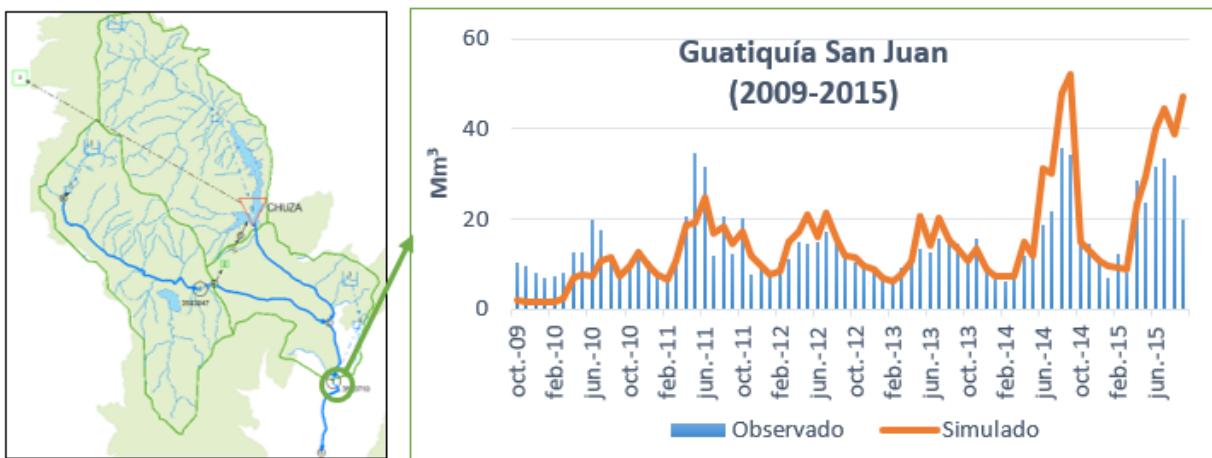
**Figura 14.** Caudal proyectado para el periodo 2016-2040, considerando variaciones conjuntas de cambio climático y cambio de uso de la tierra

Es de resaltar que el modelo utilizado Aquatool no es muy sensible a los cambios espaciales de cobertura vegetal, pues al ser un modelo hidrológico agregado se introduce un valor ponderado de cada parámetro por subcuenca, lo que implica que las variaciones espaciales en la cobertura solo se vean reflejadas en un solo valor ponderado de Hmax, limitando el análisis de las implicaciones sobre otras variables como la infiltración asociada a cada tipo de cobertura. Estas consideraciones dejan abierta la oportunidad para la búsqueda y aplicación de modelos hidrológicos más sensibles que se adapten a las particularidades de la zona de estudio y que permitan analizar mejor la relación entre el uso de la tierra y sus implicaciones en los recursos hídricos.

## 2.2 ZONA CHINGAZA

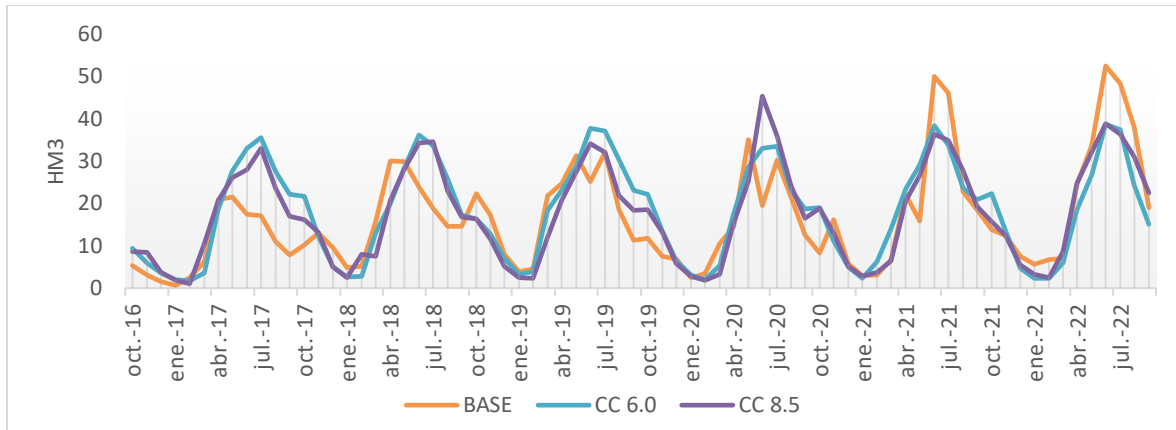
Al igual que para la cuenca alta del río Bogotá, a continuación, se presentan las gráficas e indicadores obtenidos durante la calibración y validación del modelo hidrológico de la zona de Chingaza. Al ser un área protegida, este modelo implicó unas consideraciones y retos particulares durante su calibración, los cuales se mencionarán más adelante.

Para analizar gráficamente el grado de relación entre la serie de datos de caudales simulados con el modelo y los observados en las estaciones de aforo, se presentan en la Figura 15 las series históricas de caudal y el año medio de calibración. Las dos graficas fueron generadas con los datos de la estación Guatiquía San Juan (#3503710) que es la que se encuentra aguas abajo, a la salida de la cuenca de estudio, siendo un punto idóneo para analizar la calibración general de toda la cuenca.



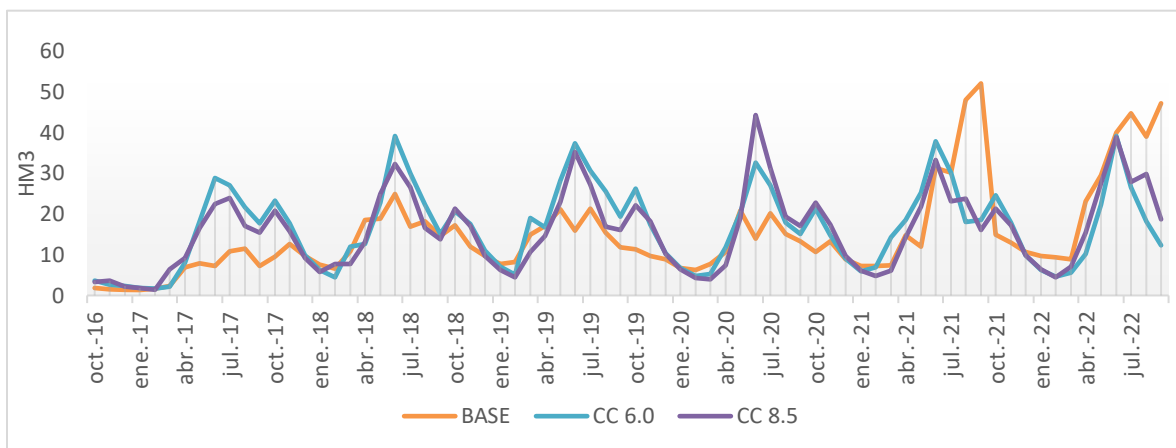
**Figura 15.** Serie de datos de caudal simulados con Aquatool respecto a las observadas para la estación Guatiquía San Juan (#3503710), para el periodo de simulación de 2009 a 2015

En los resultados de variaciones conjuntas proyectadas de cambio climático y cambio de uso de la tierra, se observa que tanto a la salida de la presa (Figure 16), como en la estación San Luis (Figure 17) aguas abajo de la cuenca, hay muy poca diferencia entre las tres series de caudal ya con el escenario de BAU incluido (histórico, RCP6.0 Y 8.5).



**Figura 16.** Caudal histórico y proyectado para la salida de la presa Chuza, incluyendo escenarios de cambio climático y cambio de uso de la tierra, para el periodo (2016-2022).

La similitud de estos resultados con los obtenidos previamente confirma la particularidad de esta zona protegida de páramo, en la que se requiere aplicar otro tipo de metodología que permita obtener resultados más detallados y concluyentes. Adicionalmente, es importante complementar el análisis con datos de demanda proyectada y aguas subterráneas, así como también contar con más puntos de monitoreo de variables climatológicas en la zona, que permitan tener un mayor detalle en los resultados y un periodo de estudio más amplio.



**Figura 17.** Caudal histórico y proyectado para la estación San Juan, incluyendo escenarios de cambio climático y cambio de uso de la tierra, para el periodo (2016-2022).

En la zona de Chingaza, se resalta la dependencia de los modelos respecto al conocimiento del páramo en su inmensa complejidad. El fortalecimiento de una red de monitoreo en la zona será fundamental en la obtención de modelos y estudios más precisos sobre la oferta hídrica y los escenarios futuros para Bogotá y su área metropolitana.

El análisis de la oferta hídrica futura asociada a escenarios de cambio climático y cambio de uso de la tierra permitió evidenciar la importancia de considerar estas variables en la gestión de los recursos hídricos en la región, pues el impacto que tienen sobre el caudal proyectado y su variabilidad guarda una relación directa sobre la seguridad hídrica, la estabilidad ecosistémica y la capacidad de abastecimiento de agua potable para Bogotá y su área metropolitana. Los resultados obtenidos demostraron que la zona más vulnerable al cambio climático y cambio de uso de la tierra proyectado es la Cuenca Alta del Río Bogotá, resaltando la necesidad de establecer planes de restauración y uso sostenible del suelo en esta cuenca que permitan asegurar el acceso futuro a los recursos hídricos. Además de esto, los resultados obtenidos para la zona de Chingaza permiten confirmar la función amortiguadora de las zonas protegidas, cuya preservación hace menos vulnerables sus ecosistemas a la variabilidad climática.



## **PARTE IV: INDICADORES PARA EL FUTURO**

Esta sección busca proveer un análisis tendencial sobre cómo los escenarios futuros de cambios climáticos y uso de la tierra podrían influenciar los indicadores del ISA. Es importante resaltar que los pronósticos presentados son una primera aproximación, dado que se requieren análisis más específicos para simular con mayor precisión la variación de las puntuaciones en relación con los escenarios futuros.

Para el área de estudio del Corredor de Conservación, el ejercicio de pronóstico se realizó considerando los resultados para los dos escenarios de cambio de uso de la tierra, 'Business as Usual 2035' y 'Zonificación 2035'. El análisis tendencial, para considerar los efectos del cambio de uso de la tierra en el escenario de 'Business as Usual' fueron completados para cuatro indicadores: un subindicador del componente de Vitalidad del Ecosistema (Modificación del Canal) y tres subindicadores del componente de Servicios Ecosistémicos (Regulación de Calidad del Agua, Regulación de Sedimentos, y Confiabilidad del Suministro de Agua). El análisis tendencial, considerando los efectos del cambio del uso de la tierra en el escenario de Zonificación fueron completados para tres indicadores: Naturalidad de la Cobertura del Suelo, Conservación y Patrimonio Cultural y Confiabilidad del Suministro de Agua.

Las simulaciones sobre el cambio de uso de la tierra para el Corredor de Conservación de Bogotá considerando el 'Business as Usual' indicaron dos patrones principales: reducción de las áreas de páramos y reducción de las áreas de bosque. La reducción de las áreas de bosques y páramos puede implicar negativamente en varios subindicadores del ISA. Por ejemplo, la transformación de áreas de bosque para usos antrópicos puede resultar en mayor escorrentía superficial del agua de lluvia, especialmente en áreas con relieve más inclinados especialmente en las regiones altas de la cuenca. Como consecuencia de la mayor escorrentía superficial, más agua de lluvia debe llegar a ríos y arroyos. El mayor volumen de agua en ríos y arroyos durante los eventos de lluvia generalmente resulta en ajustes en las dimensiones del canal debido a la intensificación de procesos erosivos causados por la mayor energía del mayor volumen de agua. Consecuentemente, se espera que la modificación de los canales de los arroyos y ríos aumente en ese escenario de cambio de uso de la tierra en el 'Business as Usual'.

Por ser un proceso erosivo, la modificación del canal, invariablemente, resulta en aumento de la concentración de sedimentos siendo cargado dentro de los arroyos. Por lo tanto, el escenario 'Business as Usual' de cambio de uso de la tierra, la Regulación de Sedimentos en el Corredor de Conservación puede verse comprometida. Una mayor cantidad de sedimentos a su vez debe agravar el problema de Regulación de la Calidad del Agua, lo cual ya es significativo en la región.

Al mismo tiempo, la reducción de las áreas de páramos puede generar una potencial alteración de todo el ciclo hidrológico de las cuencas asociadas a ese ecosistema. En consecuencia, para ese escenario debe haber reducción del volumen de agua disponible y reducción de la provisión de agua para represas. Estas modificaciones hidrológicas deben aumentar la incertidumbre hídrica en la región, y llevar la reducción del indicador de Confiabilidad del Suministro de Agua.

Las simulaciones sobre el cambio de uso de la tierra para la región del Corredor de Conservación considerando el escenario de Zonificación, indicaron dos patrones principales: reducción de los mosaicos y aumento de áreas con cobertura de páramo. Conjuntamente, estos dos patrones deben influenciar directamente lo indicador Naturalidad de la Cobertura Terrestre, donde se espera que exista un aumento del puntaje de este subindicador. Con los incrementos de áreas en bosques y/o mejora de la condición de los bosques degradados se espera que el porcentaje de corrientes dentro de áreas de conservación aumenten, lo que debe significar en aumento del puntaje del subindicador Conservación y Patrimonio Cultural.

Un último ejemplo que puede ser positivo en función del escenario de zonificación es lo aumento de la Confiabilidad del Suministro de Agua teniendo en cuenta la preservación, principalmente, de las áreas de páramos que son la vegetación más importante para el suministro y regulación de agua en los arroyos y ríos en la región del Corredor de Conservación.

Los escenarios de cambio del uso de la tierra pueden influir negativa y positivamente en varios atributos de la salud de las cuencas importantes para el suministro de agua en Bogotá. Por eso, ese ejercicio de desarrollo de escenarios futuros y el análisis sobre cómo esos escenarios pueden influenciar los indicadores del ISA puede ayudar de forma directa la planificación estratégica de la cuenca. En consecuencia, puede ayudar al proceso de toma de decisiones y garantizar la distribución sostenida y equitativa del agua entre las diferentes partes interesadas.



## ANEXOS: PARTE I: MÉTODO PARA EL CÁLCULO DE LOS INDICADORES

La documentación completa de los métodos para el Índice de Salud Agua (ISA) está disponible en el manual del usuario, que se puede acceder a través del sitio web ([freshwaterhealthindex.org](http://freshwaterhealthindex.org)) en tres idiomas (portugués, español e inglés). A continuación, se presentan detalles de los métodos y datos utilizados para la evaluación del ISA en el Corredor de Conservación de la ciudad de Bogotá.

### VITALIDAD DEL ECOSISTEMA

#### Desviación del Régimen Natural de la Caudal

El subindicador de Desviación del Régimen de Flujo Natural se calculó a partir de la metodología 'Proporción Anual Modificada de la Desviación del Flujo' (Amended Annual Proportion of Flow Deviation-AAPFD, Gehrke et al., 1995, Gippel et al., 2011). Cuanto mayor es el número de la AAPFD, mayor será la alteración de lo régimen de los flujos en relación con lo que se esperaba en condiciones naturales. El valor del AAPFD es transformado y normalizado a un rango de 0-100, donde 100 indica que no hay desviación del régimen de flujo natural. En general, el AAPFD se calcula para las subcuencas de interés, y la media aritmética ponderada (por flujo promedio anual) de los valores de AAPFD de las subcuencas es el Desvio del Régimen de Flujo Natural agregado para toda la cuenca de interés. Para las dos áreas de estudio indicadas en la sesión sobre el modelo hidrológico, el indicador fue calculado con datos estimados representando los caudales esperados en condiciones naturales y bajo las condiciones actuales calibrados a partir de datos medidos. AQUATOOL fue la herramienta utilizada para desarrollar el modelo hidrológico, y a partir de éste estimar los flujos que se esperarían en condiciones naturales. La descripción de los detalles sobre el modelado hidrológico encuéntrase en la sesión Parte III abajo. Lo modelado hidrológico fue realizado para el período de enero de 2006 a diciembre de 2014.

#### Agotamiento de Agua Subterránea

El subindicador de Agotamiento del Agua Subterránea se calculó considerando el potencial de abatimiento de los acuíferos. Para la región del Corredor de Conservación, fueran utilizadas estimaciones del agotamiento de los acuíferos en la región calculados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) a partir de información sobre los pozos subterráneos de monitoreo, su ubicación y tasas de extracción. Para el ISA, fueran consideradas las informaciones disponibles para los años 1998 y 2012, y incluyen las áreas que presentan abatimientos en los acuíferos Cretácico, Cuaternario y Terciario dentro de la cuenca del río Bogotá. Las áreas afectadas por abatimiento se encuentran descritas en los planos de dicho estudio. Con estas estimaciones, el indicador de agua subterránea se calculó como la proporción del área de acuífero en la cuenca donde se ha detectado agotamiento y el total del área de la cuenca de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$GwSD = \left( 1 - \frac{\sum a}{A} \right) * 100$$

donde,  $a$  es el área donde se identificaron problemas de agotamiento, y  $A$  y el área total de la subcuenca estudiada. Las áreas afectadas por abatimiento se encuentran descritas en los planos de dicho estudio.

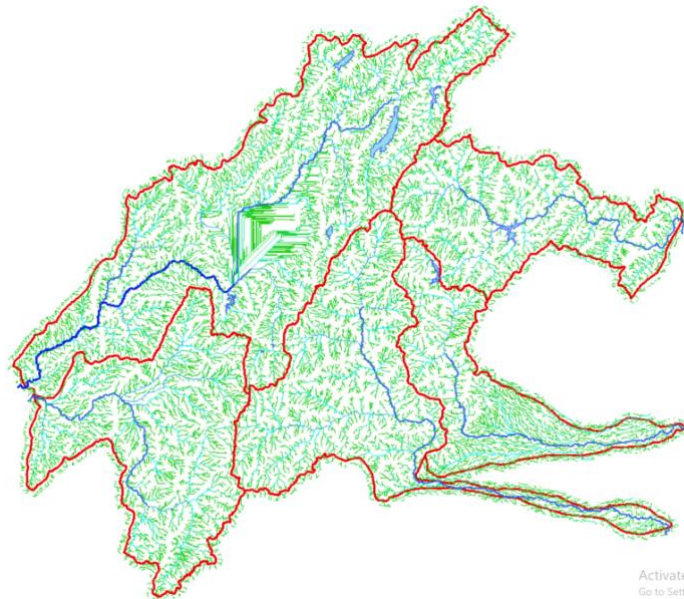
#### Calidad del Agua

Para el cálculo del Índice de Calidad del Agua se utilizó una modificación del método del índice de calidad del agua del Consejo Canadiense del Ministerio de Medio Ambiente (CCMW, 2001). Este Índice incorpora tres elementos: 1) alcance - el número de variables que no cumplen los objetivos de calidad del agua; 2) frecuencia - la cantidad de veces que no se cumplen estos objetivos; y 3) amplitud - la extensión por la cual los objetivos no se cumplen. El índice produjo un número entre 0 (la peor calidad del agua) y 100 (la mejor calidad del agua) que se utiliza como puntaje del ISA. Para las cuencas de Bogotá y Sumapaz, se

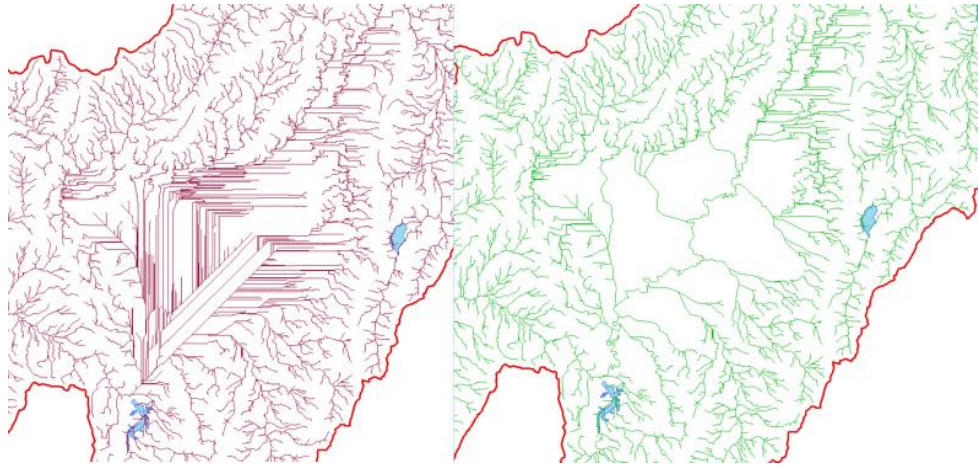
utilizaron datos para 6 parámetros de calidad del agua (demanda biológica de oxígeno, oxígeno disuelto, nitratos, ortofosfatos, sólidos suspendidos totales, coliformes totales) para un periodo de 5 años (2012-2016) para Bogotá y 3 años (2015-2017) para el río Sumapaz. Se utilizaron un total de 41 estaciones de monitoreo sobre el río Bogotá (CAR – Campañas de Monitoreo 2012 – 2016) y 17 estaciones en la cuenca del río Sumapaz (CAR – Campañas de Monitoreo 2015 – 2017). Los umbrales se derivaron de la regulación colombiana (Acuerdo Número 43 del 17 de octubre de 2006) y la literatura científica (Allan y Castillo 2007). Fue necesario utilizar la literatura científica, pues la regulación trae umbrales que son muy altos para condiciones naturales de algunos parámetros (e.g., nitrato). La puntuación final para la cuenca es una media geométrica ponderada entre los valores obtenidos para cada estación de monitoreo, usando la longitud del canal (CAR 2016) como ponderación.

### Conectividad del Flujo

El índice de conectividad dendrítica (DCI) (Cote et al., 2009) fue utilizado para evaluar la fragmentación de la red fluvial causada por las presas. El DCI se basa en las obstrucciones presentes en los ríos y arroyos para determinar cuánto la red de drenaje está fragmentada. En otras palabras, el DCI mide la obstrucción del paso en una cuenca. Matemáticamente, el DCI es la razón entre la longitud de los fragmentos de los canales (es decir, la red no obstruida entre dos obstrucciones) y la longitud total de la red de drenaje. Dos tipos de datos son necesarios para el cálculo del DCI: red de drenaje y ubicación de las obstrucciones. La red de drenaje fue desarrollada a partir del Modelo Digital del Terreno de 12.5 metros de resolución de la misión satelital ALOS-PALSAR de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (Figura 18). En total se descargaron 17 imágenes para obtener un modelo digital del terreno (DEM) de las 5 subzonas hidrográficas del estudio. El modelado de la red de drenaje fue preferido debido a la incompatibilidad del shapefile de drenajes oficial de la CAR para el análisis. Una vez modelada la red de drenaje completa, se corrigieron los drenajes de la zona central de la cuenca del río Bogotá manualmente para reflejar la realidad del sistema (Figura 19).



**Figura 18. Red de drenaje modelada.**



**Figura 19. Corrección cuenca media río Bogotá.**

### Modificación del canal

La Modificación del Margen fue evaluada a través de la pérdida de vegetación riparia como una aproximación para la modificación del margen de los ríos. El uso del suelo para la zona ribereña se extrajo del mapa de uso de la tierra del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC 2012, 1:100.000) aislando la información en un búfer de 30 m a lo largo de toda la red de drenaje. Se asignó un puntaje para cada clase de uso de la tierra, que va desde 0 - casi ninguna modificación a 1 - modificación completa (por ejemplo, rectificación del canal y canales artificiales). Específicamente para la cuenca del río Bogotá, se utilizaron los siguientes puntajes: 0 para casi ninguna modificación visible; 0.25 para ambientes naturales transformados, y 0.5 para ambientes caracterizados por un mosaico de cultivos agrícolas y ambiente natural, y áreas completamente agrícolas. Adicionalmente se identificaron cambios significativos a partir del análisis de imágenes satelitales de las cuencas de interés. El puntaje de la cuenca es una media geométrica ponderada, utilizando la longitud de los cauces calculadas a partir de la red de drenaje generada y ajustada como descrito arriba. Para la red de drenaje de cada subzona, se calculó un buffer de 30 metros, de acuerdo con la normatividad existente de rondas hídricas en Colombia, lo que corresponde al área mínima protegida por ley para todos los ríos del país.

### Naturalidad de la Cobertura Terrestre

El subindicador de la Naturalidad de la Cobertura Terrestre fue calculado utilizando los tipos de cobertura del suelo en el mapa de uso del suelo del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC 2012, 1:100.000). Para todas las cuencas de estudio, las clases de uso del suelo recibieron puntajes que van de 0 a 100 según los siguientes criterios: 100 corresponde a vegetaciones naturales; 90 para ambientes naturales transformados; 70 para ambientes caracterizados por un mosaico de cultivos agrícolas y ambiente natural; 50 para áreas completamente agrícolas; y 5 a zonas completamente artificiales, por ejemplo, urbanas. La naturalidad se calculó en una base por píxel (resolución de 30 m) y luego el valor medio es la puntuación de la cuenca. La función estadística zonal del software ArcGIS se usó para calcular los puntajes de cada una de las subzonas hidrográficas.

### Especies de Interés

Las especies de interés miden el grado de amenaza de las especies de ambientes acuáticos (peces, anfibios, crustáceos, moluscos, insectos y plantas). Como no hay datos de monitoreo continuo de especies para el Corredor de Conservación, este subindicador representa la proporción de especies con algún tipo de amenaza en relación con la diversidad total de especies ya observadas. Esta proporción se pondera de acuerdo con la clasificación de la IUCN para cada especie, es decir, amenazada, amenazada,

vulnerable, vulnerable y casi amenazada. Los datos de especies de interés fueron obtenidos de la Lista Roja de la IUCN con información espacial para anfibios, reptiles, crustáceos, moluscos, insectos, y plantas (<http://www.iucnredlist.org/technical-documents/spatial-data>).

### Especies Invasoras

Este subindicador mide la predominancia de especies invasoras. El puntaje es directamente proporcional al número total de especies invasoras o indeseadas presentes en el área de estudio, según la siguiente ecuación.

$$I_{IN,i} = \begin{cases} 1 - \frac{n_{IN,i}}{10}, & \text{for } 0 \leq n_{IN,i} \leq 8 \\ 0.1, & \text{for } n_{IN,i} \geq 9 \end{cases}$$

donde  $n_{IN,i}$  es el número de especies invasoras e indeseadas en la cuenca, en el tiempo  $t = i$ .

Para la cuenca del río Bogotá se utilizaron los estudios de especies invasoras realizados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca donde se identificaron especies de peces, moluscos, y anfibios presentes en la cuenca. Es importante destacar que la puntuación encontrada no refleja la dinámica temporal de especies invasoras, lo que sería ideal para proveer una visión más robusta de ese subindicador.

### SERVICIOS ECOSITÉMICOS

Para los indicadores de Servicios del Ecosistema de Suministro y Regulación y Soporte, los puntajes se calcularon en función de factores espaciales, temporales y de magnitud de una variable particular. El enfoque analítico utilizado para ISA se basa en el método utilizado en el Índice Canadiense de Calidad del Agua (Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente, 2001). Cuando los datos estaban disponibles, intentamos calcular los tres factores (descritos a continuación) para cada indicador en el componente de Servicios Ecosistémicos.

F1 mide el alcance espacial del sistema para proporcionar el servicio ecosistémico:

$$F_1 = \left( \frac{\text{Número de unidades espaciales que no cumplieron con la demanda al menos una vez}}{\text{Número total de unidades espaciales}} \right) * 100 \quad (\text{ec. 1})$$

*Nota: la unidad espacial se define como las unidades de ubicación (por ejemplo, municipio y subcuenca) para las cuales hay datos disponibles.*

F2 mide una dimensión temporal para evaluar con qué frecuencia el sistema no puede proporcionar el servicio ecosistémico:

$$F_2 = \left( \frac{\text{Número de instancias donde no se cumplió con la demanda}}{\text{Número total de instancias}} \right) * 100 \quad (\text{ec. 2})$$

*Nota: la instancia se define como la cantidad total de unidades espaciales por el número total de períodos de tiempo para los cuales hay datos disponibles.*

F3 mide la magnitud de la desviación cuando el servicio no se cumple (ecuaciones 3-6).

$$F_3 = \left( \frac{nse}{nse+1} \right) * 100 \quad (\text{ec. 3})$$

$$nse = \frac{\sum_{i=0}^n Ex_i}{\text{Número total de instancias}} \quad (\text{ec. 4})$$

Cuando el objetivo no está alejado de esta meta, la excursión (Ex) en la ecuación 4 puede definirse como:

$$Ex_i = \left( \frac{\text{objetivo}_i}{\text{valor de la instancia}_i} \right) - 1 \quad (\text{ac.5})$$

De forma alternativa, cuando el objetivo no supera la meta, la excursión puede definirse como:

$$Ex_i = \left( \frac{\text{valor de la instancia}_i}{\text{objetivo}_i} \right) - 1 \quad (\text{ac.6})$$

Usase la media geométrica para sumar los puntajes para obtener el puntaje del Indicador de Servicio del Ecosistema (ESI) de acuerdo con las siguientes reglas:

Regla # 1: si solo es capaz de determinar F1 (evidencia baja):

$$ESI_1 = 100 - F_1 \quad (\text{ec. 7})$$

Regla # 2: De lo contrario, si es capaz de determinar tanto F1 como F2 (evidencia media):

$$ESI_2 = 100 - \sqrt{F_1 * F_2} \quad (\text{ec. 8})$$

Regla # 3: De lo contrario, si es posible determinar los tres factores (evidencia alta):

$$ESI_3 = 100 - \sqrt{F_1 * F_3} \quad (\text{ec. 9})$$

### Confiabilidad del Suministro de Agua Relativo a la Demanda

La estimación de la oferta y la demanda se obtuvo a partir de los Estudios Regionales del Agua (ERAs) desarrollados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca en el año 2017. Estos estudios se realizaron a nivel de cuencas de tercer orden del río Bogotá. Los ERAs calculan el balance hídrico entre la demanda y la oferta hídrica natural de cada subcuenca, obteniendo el déficit de suministro potencial natural propio de la cuenca con respecto a la demanda total de los municipios dentro de la misma cuenca hidrográfica. Se asumió un objetivo de atender el 100% de la demanda como objetivo.

#### Resultados del balance hidrico para las diferentes regiones hidrografica

	TOMINE	SISGATIBITOC	SOACHA	CHICU	FRIO
	% Suministrado	% Suministrado	% Suministrado	% Suministrado	% Suministrado
ENERO	100%	100%	25%	22%	4%
FEBRERO	100%	100%	14%	17%	18%
MARZO	100%	100%	23%	53%	37%
ABRIL	100%	100%	44%	100%	100%
MAYO	100%	100%	71%	100%	100%
JUNIO	100%	100%	64%	100%	51%
JULIO	100%	100%	37%	79%	23%
AGOSTO	100%	100%	25%	57%	25%
SEPTIEMBRE	100%	100%	22%	97%	44%
OCTUBRE	100%	100%	39%	100%	100%
NOVIEMBRE	100%	100%	77%	100%	100%
DICIEMBRE	100%	100%	60%	100%	23%

### Regulación de Sedimentos

Actualmente, las estimaciones de los sedimentos atrapados por la erosión y la deposición en el canal no están disponibles. Sin embargo, los cambios en la erosión impulsados por el cambio en el uso de la tierra pueden modelarse para la cuenca y usarse como indicador. Para ello, fue necesario mapear el potencial de erosión en las cuencas y determinar un umbral para niveles mínimos aceptables de erosión, de esta manera estimar con qué frecuencia y en qué medida la erosión del suelo supera este umbral. Se utilizó el mapa de erosión generado por el IDEAM, "Zonificación de los Suelos por Grado de Erosión, Línea base 2010-2011" donde a partir de este se definieron las áreas erosionadas por cada uno de los municipios. El umbral seleccionado corresponde a un máximo de 20% del área total del municipio con erosión.

### Regulación de la Calidad del Agua

El subindicador de Regulación de la Calidad del Agua se refiere a la capacidad del ecosistema de moderar las concentraciones de contaminación en relación con los diferentes destinos y usos que pueda existir para el agua. Por ejemplo, diferentes fragmentos de una cuenca pueden tener funciones diferentes, lo que puede implicar, en patrones de calidad del agua diferenciados para cada uno de los fragmentos. Los datos son los mismos que fueran utilizados para el indicador del Índice de Calidad del Agua del componente de Vitalidad del Ecosistema, pero solamente para el periodo de 2013-2015 para Bogotá y 2015-2017 para Sumapaz. Los umbrales se derivaron de la regulación colombiana (Acuerdo Número 43 del 17 de octubre de 2006) para las diferentes clases. Cada clase corresponde a objetivos de calidad enfocados en los usos del agua de cinco diferentes tramos del río Bogotá. La clase I y II corresponde a valores de parámetros enfocados en usos del agua para consumo humano y agrícola. La clase III corresponde a valores de calidad de embalses, lagunas y humedales. La clase IV a usos agrícolas con restricciones y pecuario. La clase V usos para generación de energía y uso industrial.

### Regulación de Inundaciones

La ocurrencia mensual de inundaciones de 42 municipios dentro de la cuenca Bogotá y de 9 municipios en la cuenca Sumapaz para el periodo de 2010-2018 se utilizó para estimar, dónde en la cuenca y con qué frecuencia se experimentaron inundaciones. Estos datos fueron obtenidos a partir de información de la Dirección de Gestión del Riesgo de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR.

### Conservación y Patrimonio Cultural

Este subindicador fue evaluado determinando el porcentaje de la longitud de la red de drenaje dentro de áreas protegidas. El objetivo es tener, por lo menos, el 17% de la red de drenaje dentro de áreas protegidas, que es el límite establecido por la Meta de Aichi para la Diversidad Biológica. Para el cálculo de ese subindicador, se utilizó la longitud del río dentro del sistema de áreas protegidas y la longitud de los arroyos que formaron los límites de las áreas protegidas. Estos se compararon con la longitud total del río dentro de las 5 cuencas usando la siguiente fórmula:

$$PoR = \frac{0.5 * IL}{RL}$$

donde PoR es el porcentaje de longitud del río protegido; IL, la longitud de los ríos dentro de las áreas protegidas considerando un buffer de 100m; y RL es la longitud total de los ríos dentro de las cuencas. Con el objetivo global de humedales y vías fluviales mínimas en áreas protegidas establecido en el 17% en virtud del Convenio sobre la diversidad biológica de Aichi para la diversidad biológica 11 (<https://www.cbd.int/sp/targets/>), el valor se escala utilizando una función asintótica:

$$CS = 117 \frac{PoR}{PoR + 17}$$

Se utilizaron áreas de conservación declaradas por el Gobierno Nacional (Parques Nacionales Naturales de Colombia, PNN) y datos de redes de flujo (CAR - Geodatabase Río Bogotá 2016 y Red de Drenaje Generada y Ajustada por CI) para calcular el subindicador.

## GOBERNANZA Y PARTES INTERESADAS

Los indicadores de Gobernanza y Partes interesadas fueron determinados por el método de investigación, que consiste en la aplicación de un cuestionario de percepción con 51 preguntas, utilizando una escala de 5 puntos. Los cuestionarios de percepción fueron aplicados en el primer encuentro con las partes interesadas en Junio de 2018. En total, 60 actores participaron, representados sectores del gobierno, de la sociedad civil, academias, industrias y ONG, con conocimientos sobre las cuestiones de gobernanza en el área de estudio. Las puntuaciones de cada pregunta fueron entonces agregadas en valores medios dentro de módulos, donde cada módulo estaba relacionado con cada subindicador e incluía de 3 a 6 preguntas. Los valores medios se normalizaron a una escala de 0 a 100.

## PONDERACIÓN

La evaluación de la prioridad relativa que las partes interesadas dan a los indicadores y subindicadores de los componentes de Servicios Ecosistémicos y Gobernanza y Partes interesadas fue realizada a través del proceso analítico de jerarquía (SAA, 1990). Este método fue aplicado en el primer encuentro con las partes interesadas, donde los participantes pudieron realizar una serie de comparaciones pareadas y luego evaluar la fuerza de sus preferencias.

## PARTE II: MÉTODOS PARA ESCENARIOS FUTUROS

### MÉTODOS PARA MODELO PARA ESCENARIOS DE CAMBIO DE USO DE LA TIERRA

#### Información y suposiciones

El cambio en el uso de la tierra se modeló utilizando el Modelador de Cambio de Terreno IDRISI (Clark Labs). Se utilizaron dos conjuntos de datos de cobertura terrestre para calibrar el modelo, cobertura de 2000-02 y 2010-12 (IDEAM, 2012); las áreas etiquetadas como "nubes" se reclasificaron según la clase predominante de cobertura de la tierra circundante y se verificaron en forma cruzada con los datos de 2005-2009. Los conjuntos de datos originales incluían más de 40 clases de uso de la tierra con una gran cantidad de detalles (por ejemplo, tipos específicos de cultivo). Estas clases se condensaron en 19 clases totales, consistentes entre períodos de tiempo, para reducir la complejidad del modelo. Estos dos conjuntos de datos determinaron la "demanda" de diferentes usos de la tierra entre 2000 y 2012 en la Bogotá metropolitana. Para evaluar los factores geográficos que influyeron en el cambio de uso del suelo durante ese período, utilizamos datos de la red de carreteras (IGAC, 2014), pendiente y elevación y proximidad a áreas urbanas y tierras agrícolas.

#### Resumen de los cambios observados y configuración del modelo

Entre 2000 y 2012, hubo una tendencia general de pérdida y degradación de los bosques. La gran mayoría de la degradación se produjo en tierras clasificadas como Mosaico, una mezcla de bosques y tierras cultivadas, que en 2012 se habían convertido a Pastos y, por lo tanto, se deforestaron, especialmente en toda la cuenca del río Bogotá. En menor medida, muchas áreas clasificadas en 2000 como Bosque Denso fueron identificadas en 2012 como Bosque Fragmentado.

Modelar este tipo de cambios en el futuro es, por lo tanto, sencillo. En el escenario Business as Usual (BAU), la "demanda" de más pastos, bosque fragmentado y urbano se extrapolaron de la tendencia observada durante los últimos 12 años. Las probabilidades de transición, es decir, la probabilidad de que cualquier parcela de tierra dada experimente un cambio de un tipo de uso de la tierra a otra, se calcularon para todas las transiciones pertinentes, en función de la tendencia histórica y la influencia que tienen las variables espaciales de: proximidad a las carreteras, pendiente, y otros factores encontrados en las transiciones observadas. El modelo luego asigna la tierra de acuerdo con el presupuesto de demanda para 2035, seleccionando entre los sitios de mayor probabilidad para cada transición.

Para crear el escenario de "Zonificación", se utilizó la zonificación desarrollada en la estrategia del Corredor de Conservación para el 2035, la cual se incorporó como una restricción para guiar la asignación de tierras del modelo. Si bien la demanda de tierra se mantuvo igual que en el escenario BAU, esta vez el

modelo dio prioridad a la conservación de bosques y páramos. El plan de zonificación incluyó tres niveles de prioridad (baja / media / alta), que se reflejaron cuantitativamente en el modelo. En otras palabras, el modelo no protege automáticamente todo en el Corredor, sino que prioriza los cambios de acuerdo con el nivel de prioridad de las áreas designadas de medias o alta.

## **MÉTODOS PARA MODELO PARA ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

Para efecto de este trabajo se aplicó el modelo de circulación global (GCM) CSIRO-MK3.0 (Gordon et al. 2002), que corresponde a un modelo acoplado oceánico-atmosférico que contiene una representación completa de los cuatro componentes principales del sistema climático (atmósfera, superficie terrestre, océanos y hielo marino). En la forma utilizada es tan completa como cualquiera de los modelos acoplados globales disponibles en todo el mundo. Se optó por este modelo ya que es utilizado en varios reportes, y la Tercera Comunicación Nacional de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático hecho por el Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales (IDEAM, 2017).

Posteriormente, la escala del GCM fue reducida utilizando un método estadístico, denominado, "Statistical Downscaling Model (SDSM)" (Wilby y Dawson, 2007) para obtención de las proyecciones futuras. El proceso de reducción de escala do modelo global (GCM) necesita de una calibración del modelo SDSM. Para ese proceso fueran utilizados datos históricos de reanálisis (ERAINTERIM) una resolución de 0.25°x0.25°. Una vez hecho lo anterior, se calculó la proyección en porcentaje de cambio a partir de los datos históricos diarios de precipitación y temperatura obtenidos de dos fuentes: estaciones climatológicas locales (ALA, ANA, PEAM y SENAMHI), Global Land Data Assimilation System (GLDAS) una resolución horizontal de 0.25°x0.25°. Los datos de GLDAS fueran necesarios porque las series temporales de las estaciones climatológicas muchas veces contenían con datos faltantes. Los datos históricos fueran representaron el periodo de 1981-2010 para proyectar escenarios para el periodo de 2011-2040

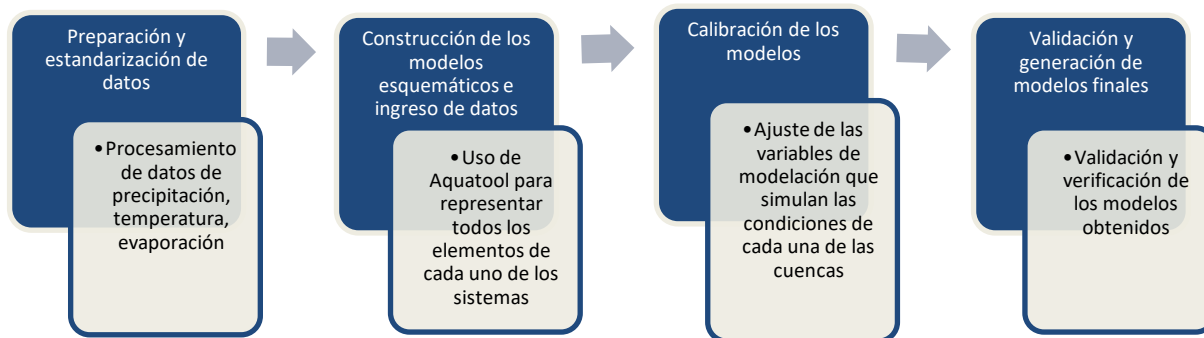
## **PARTE III: MÉTODO PARA MODELO HIDROLÓGICO & MÉTODOS PARA PROYECCIONES DE ESCENARIOS FUTUROS HIDROLÓGICOS**

Para obtener la oferta hídrica futura de las dos zonas estratégicas de abastecimiento de la cuenca alta del río Bogotá y zona Chingaza, se utilizaron tanto los correspondientes modelos hidrológicos calibrados generados con el programa Aquatool, así como escenarios de cambio de uso de la tierra y de cambio climático. Al constituirse como un Sistema de Soporte de Decisiones (SSD), los modelos desarrollados en Aquatool permiten responder preguntas específicas relacionadas con cambios en variables hidrológicas, climatológicas y antrópicas asociadas a las cuencas hidrográficas, facilitando el uso de datos de manera interactiva (Andreu, Capilla, & Sanchis, 1996).

En la siguiente se muestran los pasos que se llevaron a cabo para la modelación hidrológica de las zonas estratégicas de la Cuenca Alta del Río Bogotá y Zona Chingaza, indicando los datos y software usados para la obtención de resultados.

El proceso se realizó de manera similar para las dos zonas modeladas y constó de cuatro etapas: 1) Procesamiento y homogenizaron de los datos necesarios como insumo para los dos modelos generados; 2) construcción de los modelos en Aquatool (Andreu *et al.*, 1996) a partir de modelos esquemáticos que buscaron representar de la mejor manera los sistemas a simular; 3) calibración de cada uno de los modelos ajustando las variables de modelación; 4) Validación, proceso en el que se verificó que los modelos representaran las condiciones hidrológicas de la cuenca a partir de los datos históricos.





Teniendo en cuenta esto, a cada uno de los modelos calibrados (Cuenca Alta del Río Bogotá y Zona Chingaza), se le realizaron modificaciones asociadas a variables de cambio climático y de cambio en el uso de la tierra. Con ello se buscó abordar cambios tanto temporales, como espaciales que tienen una implicación directa sobre la oferta hídrica. Los escenarios generados incluyeron dos tipos de variaciones según se muestra en el esquema que se muestra a continuación:

- **Escenarios de cambio de uso de la tierra:**
  - a) Business as usual (BAU) en el cual se refleja la probabilidad de que se mantengan tendencias en la cobertura vegetal tal como se ha dado en los últimos años, el análisis se basa en las tendencias históricas observadas en los mapas de uso de la tierra del IDEAM (Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) de los periodos 2000-2002 y 2010-2012.
  - b) Zonning: En el cual se potencian los programas de zonificación e infraestructura verde para preservar la cobertura natural del suelo e incentivar la restauración.
- **Escenarios de cambio climático**, los cuales hacen referencia a proyecciones de temperatura y precipitación asociadas a caminos representativos de concentración (RCP) respecto a emisiones de CO<sub>2</sub> y a forzamiento radiativo (W/m<sup>2</sup>) (IPCC, 2018):
  - a) RCP6.0: Vía de estabilización intermedia en la que el forzamiento radiativo se estabiliza aproximadamente en 4.5 y 6.0 W/m<sup>2</sup>
  - b) RCP8.5: Es el escenario más drástico en la cual el forzamiento radiativo alcanza más de 8.5 W/m<sup>2</sup> en 2100 y continúa aumentando durante cierto tiempo.

Para el caso de los escenarios de cambio climático, se utilizaron datos de precipitación y temperatura históricos que fueron ingresados para la calibración de cada modelo: 1994-2015 para la Cuenca Alta del Río Bogotá y 2009-2015 para la Zona Chingaza. Dichos datos fueron sustituidos por las proyecciones de las mismas variables para el periodo de 2016-2040 y 2016-2022 respectivamente. Esto se hizo bajo los dos escenarios de cambio climático descritos, relacionados con la concentración de radiación y emisiones: RCP6.0 y RCP8.5.

Por otro lado, para el cambio de uso de la tierra se generaron escenarios para un período comprendido entre 2016-2025. Para incluir estos cambios en los modelos, se sustituyó en cada subcuenca el valor de Hmax obtenido en la calibración por el valor de la siguiente correspondiente a la ponderación de la nueva cobertura vegetal para cada escenario.

**Parámetros para humedad máxima (Hmax), de acuerdo a los escenarios futuros de cambio de uso de la tierra.**

Modelo	Subcuenca	Hmax BAU	Hmax Zonning
Cuenca Alta del	1	166.15	175.36
	2	136.21	136.69

Río Bogotá	3	146.28	146.28
	4	151.92	148.57
	5	159.82	172.75
	6	153.86	166.75
	7	159.35	165.86
	8	156.94	161.18
Zona Chingaza	1	219.97	224.95
	2	215.22	218.19
	3	210.94	216.26

Además de evaluar las variaciones asociadas al cambio climático y cambio de uso de la tierra por separado, se analizaron también las implicaciones en la oferta hídrica de las diferentes combinaciones de estas variables. Es decir que en los modelos base se sustituyeron al mismo tiempo las series proyectadas de precipitación y temperatura asociadas con el cambio climático y los nuevos valores de Hmax según las coberturas proyectadas.

# REFERENCIAS

## VITALIDAD Y SERVICIOS

1. Estudio de caracterización hidrogeológica de la Cuenca del río Bogotá. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR – Hidrogeocol. 2016.
2. Campañas de Monitoreo 2012-2016 Río Bogotá. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. 2016
3. Campañas de Monitoreo 2015-2017 Río Sumapaz. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. 2016
4. Cobertura de la tierra 2010-2012. Sistema de Información Ambiental de Colombia IDEAM. 2012
5. UICN 2018. The UICN Red List of Threatened Species.  
<https://www.iucnredlist.org/resources/spatial-data-download>
6. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). Evaluación regional del Agua- ERA, Cuenca Alta Río Bogotá. 2017.
7. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). Evaluación regional del Agua- ERA, Cuenca Alta Río Bogotá. 2017.
8. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). Evaluación regional del Agua- ERA, Cuenca Media Río Bogotá. 2017.
9. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). Evaluación regional del Agua- ERA, Cuenca Baja Río Bogotá. 2017.
10. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). Evaluación regional del Agua- ERA, Cuenca río Sumapaz. 2017.
11. Mapa Erosión 100k 2010-2011. IDEAM 2012.
12. Acuerdo Número 43 del 17 de Octubre de 2006. Objetivos de Calidad 2020. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). 2006.

## GOBERNANZA

1. BEJARANO MORA, Patricia. Corredor de Conservación Chingaza – Sumapaz – Guerrero-Guacheneque: Una estrategia para el ordenamiento y manejo ambiental del territorio. Conservación Internacional Colombia y Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP (2011). Bogotá, Colombia. 184 páginas.
2. CABALLERO FERNÁNDEZ, G. y otros. La importancia de los actores interesados de la Organización: Un análisis empírico aplicado a la empleabilidad del alumnado de la Universidad Española. En: Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa Vol. 13, No. 2 (Abril de 2007). Universidad de Vigo, España. Pág. 13 32.
3. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN – DNP. Guías para la Gestión Pública Territorial: Elementos Básicos del Estado Colombiano. DNP y ESAP. Bogotá, D.C. 2011. 135 páginas.
4. Fichas de caracterización territorial. D.N.P. (2016). Base de datos formato Excel. Bogotá, D.C.
5. GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA- SECRETARÍA DE PLANEACIÓN. Estadísticas de Cundinamarca 2011 a 2013. Gobernación de Cundinamarca (2014). Bogotá, D.C. 510 páginas.

6. MINISTERIOS DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE - MADS. 2010. Política Nacional para la gestión integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE). MADS, Bogotá, D.C. 118 pp.
7. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico - GIRH 2010 – 2022. MADS, Bogotá, D.C. 124 pp.
8. RODRIGUEZ, Octavio et al.. Estrategia de Interlocución Social, Información y Comunicación para la gestión de proyectos socioambientales del Corredor de Conservación 2018 -2019. Conservación Internacional Colombia. Bogotá, D.C. 50 pp.
9. Documento de Identificación y Caracterización de Actores Sociales: Las partes de interés del Corredor de Conservación Chingaza- Sumapaz – Guerrero – Guacheneque – Cerros Orientales. Bogotá, D.C (Colombia). C.I. Colombia. 2018. 113 páginas.
10. SGUERRA, Sandra et al. Corredor de Conservación Chingaza – Sumapaz – Guerrero: Resultados del Diseño y Lineamientos de Acción. Conservación Internacional Colombia y Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP (2011). Bogotá, Colombia.184 páginas.

## MODELO HIDROLOGICO

1. Andreu, J., Capilla, J., & Sanchis, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision support system for water resources planning and operational management. Valencia: Journal of Hydrology.
2. Campos, D. F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP).
3. CAR. (2014). Evaluación Regional del Agua-ERA. Cuenca Alta del Río Bogotá. Bogotá.
4. CAR. (2006). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá. Bogotá.
5. Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1996). Hidrología aplicada. Bogotá: McGraw Hill.
6. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal). (2012). Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia, 2010-2011. Bogotá: Misión BID - Cepal.
7. Conservación Internacional Colombia; Acueducto, agua y alcantarillado de Bogotá. (2014). Corredor de conservación. Chingaza-Sumapaz-Guerrero-Guacheneque-Cerros Orientales. Bogotá.
8. Dee, Dick, Fasullo, John, Shea, Dennis, y otros. (12 de Dec de 2016). Atmospheric Reanalysis: Overview & Comparison Tables. Obtenido de Climate Data Guide: <https://climateguide.ucar.edu/climate-data/atmospheric-reanalysis-overview-comparison-tables>
9. ESRI. (2016). ArcGIS. ArcGIS Desktop 10.5.1 . Redlands, CA.
10. Estrela, T. (1992). Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos. (CEDEX, Ed.) Centro de Estudios Hidrográficos y Experimentación de Obras Públicas.
11. Estrela, T., Cabezas, F., & Estrada, F. (1999). La evaluación de los recursos hídricos en el libro blanco de agua en España. En Ingeniería del Agua (Vol. 6, págs. 125-138).
12. Témez, J. R. (1977). Modelo Matemático de transformación "precipitación-escurrentía". Madrid: Asociación de Investigación Industrial Eléctrica.
13. Thiessen, A. H. (1911). Precipitation averages for large areas. Weather Rev , 39, 1082-1084.
14. Thornwhite, C. (1948). An approach toward a rational classification of climate (Vol. 38). Geogr.
15. Universidad Politécnica de Valencia. (5 de Noviembre de 2016). AQUATOOL. Obtenido de Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente:: [http://www.upv.es/aquatool/es/software\\_es.html](http://www.upv.es/aquatool/es/software_es.html)
16. Universidad Politécnica de Valencia. (2014). Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos. En A. S. Javier Paredes Aquiola. Valencia.

17. Universidad Politécnica de Valencia. (2018). Manual de usuario para el calibrador EvalHid. Valencia.
18. Vargas, O., & Pedraza, P. (2003). El Parque Nacional Natural Chingaza. Bogotá: COLCIENCIAS, Unidad de Parques Nacionales; Acueducto de Bogotá.

## ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO

1. Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
2. EAAB, & CI. (2012). Corredor de Conservación Chingaza - Sumapaz - Guerrero - Guacheneque - Cerros Orientales: Una Estrategia para el Ordenamiento y Manejo Ambiental del Territorio. Bogotá, Colombia.
3. ESRI (2011). ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
4. IDEAM. (2017). Tercera Comunicación Nacional de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Retrieved from [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co);
5. INECC. (2014). Actualización y divulgación de los nuevos escenarios de cambio climático aplicados a México para fortalecer las capacidades nacionales. México, D.F.
6. 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.). Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2559.2002.1340a.x>
7. Marengo, J. A., Chou, S. C., Torres, R. R., Giarolla, A., Alves, L., & Lyra, A. (2014). Working Paper Climate Change in Central and South. <https://doi.org/10.1039/c5ra24162f>
8. MINAM. (2018). El Clima está Cambiando: Escenarios climáticos futuros en el Perú.
9. MINAM. (2016). El Perú y el Cambio Climático, Tercera Comunicación del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Retrieved from <http://unfccc.int/resource/docs/natc/pernc3.pdf>
10. Rui, H., & Beaudoin, H. K. (2018). README Document for GLDAS Version 2 Data Products. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 1–32. [https://doi.org/http://hydro1.sci.gsfc.nasa.gov/data/s4pa/GLDAS/GLDAS\\_NOAH10\\_M.2.0/doc/README\\_GLDAS2.pdf](https://doi.org/http://hydro1.sci.gsfc.nasa.gov/data/s4pa/GLDAS/GLDAS_NOAH10_M.2.0/doc/README_GLDAS2.pdf)
11. Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
12. Thiessen, A. H. (1911). Precipitation averages for large areas. *Weather Rev*, 39, 1082-1084.
13. Trzaska, S., & Schnarr, E. (2014). A Review of Downscaling Methods for Climate Change Projections. *Review*, (September), 1–42. <https://doi.org/10.4236/ojog.2016.613098>
14. Wilby, R. L., & Dawson, C. W. (2007). SDSM 4.2— A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, User Manual. Department of Geography, Lancaster University, UK, (August), 1–94.

# NOTA FINAL

El equipo de Conservación Internacional (CI) fue responsable de recopilar y organizar los datos necesarios para los análisis de todas las sesiones en este informe, calcular los indicadores de Índice de Salud de Agua, realizar el análisis de los escenarios de cambio de uso de la tierra y los impactos de futuras situaciones en los indicadores, así como crear el presente informe. El equipo del Instituto Tecnológico de Monterrey fue responsable de desarrollar los escenarios de cambio climático, el modelo hidrológico, el análisis relacionado con los impactos de los escenarios futuros sobre hidrología, y buscar datos adicionales cuando los disponibles de fuentes públicas compartidos por CI no eran suficientes para llevar a cabo los análisis.





ÍNDICE DE SALUD  
DEL AGUA