

**IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CUERPOS  
SUPERFICIALES DE AGUA DULCE DE LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA.**

**HALISON DANIXA VALDERRAMA NITOLA**

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO**

**CÉSAR RENÉ BLANCO ZÚÑIGA**

**INGENIERO CIVIL M. Sc. Ambiental**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TUNJA**

**2021**

**IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CUERPOS  
SUPERFICIALES DE AGUA DULCE DE LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA.**

**HALISON DANIXA VALDERRAMA NITOLA**

**Trabajo de grado en modalidad monografía presentado como requisito para  
optar al título de**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO**

**CÉSAR RENÉ BLANCO ZÚÑIGA**

**Ingeniero civil M. Sc. Ambiental**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TUNJA**

**2021**

La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería reside en ella misma, por lo tanto, no responde por las opiniones expresadas en este trabajo. Se autoriza la reproducción parcial o total indicando su origen

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma del director del trabajo de grado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Tunja, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, 2021

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis papás y mi hermana, a cada miembro de mi familia y amigos; que mediante su apoyo y entrega hicieron posible cumplir con mis responsabilidades académicas a diario. A Athena por su presencia y por alegrar mis días.

A mis docentes, por marcar con su enseñanza mi camino y hacerme ir más allá de las barreras que me establecía. Porque gracias a ello sé que no hay límite para aprender.

A mis compañeros durante esta etapa, porque sin su apoyo, su conocimiento y su compañía permanente, cada obstáculo hubiese sido más difícil de superar.

A la vida, por permitirme materializar este objetivo.

A Deiby, porque durante años ha sido mi motor, mi fuerza, mi compañía incondicional y mi motivo para llegar a este punto. Porque ha creído en mí como nadie y ha estado presente en cada escalón de este proceso, ayudándome a lograr cada cosa que me he propuesto.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>18</b>
<b>3. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 CONTEXTO MUNDIAL .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 CONTEXTO NACIONAL.....</b>	<b>20</b>
<b>4. MARCO DE REFERENCIA .....</b>	<b>22</b>
<b>4.1 MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>22</b>
4.1.1 Calidad del agua.....	22
4.1.2 Características del agua .....	22
4.1.3 Uso eficiente del agua .....	22
4.1.4 Cuerpo de agua.....	23
4.1.5 Clasificación ecológica de los organismos de agua dulce.....	23
4.1.6 Recursos naturales. ....	24
4.1.7 Efectos adversos del cambio climático.....	24
4.1.8 Cambio climático .....	25
4.1.9 Cambio climático abrupto .....	25
4.1.10 Cambio climático asegurado .....	25
4.1.11 Emisiones.....	25
4.1.12 Efecto invernadero .....	26
4.1.13 Efecto radiativo.....	26

4.1.14 Fuente.....	26
4.1.15 Eutrofización.....	26
4.1.16 Turbidez.....	27
4.1.17 Sedimento.....	27
4.1.18 Salinidad .....	27
4.1.19 Oxígeno disuelto.....	27
<b>4.2 MARCO LEGAL.....</b>	<b>28</b>
<b>4.3 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>31</b>
<b>5. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>33</b>
5.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	33
5.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	33
5.3 HIDROGRAFÍA.....	34
5.4 CLIMA.....	37
5.5 IMPORTANCIA AMBIENTAL DE LA REGIÓN CARIBE.....	38
<b>6. CUERPOS SUPERFICIALES DE AGUA DULCE EN LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA. ....</b>	<b>40</b>
6.1 ECOSISTEMAS MARINOS Y COSTEROS.....	40
6.2 ESTUARIOS Y DELTAS.....	41
6.3 MANGLARES .....	41
6.4 LAGUNAS COSTERAS.....	42
6.5 CIÉNAGAS O LAGOS DE PLANOS INUNDABLES DE ZONAS BAJAS .....	42
6.6 LLANURA DE INUNDACIÓN .....	43
6.7 RÍOS .....	44
<b>7. CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONES DE CUERPOS DE AGUA DULCE SUPERFICIALES DE LA REGIÓN CARIBE.....</b>	<b>45</b>
<b>8. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA .....</b>	<b>48</b>
<b>9. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES EN LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA. ....</b>	<b>49</b>
9.1 AUMENTO DE TEMPERATURAS .....	50

9.2	SEDIMENTOS.....	52
9.3	TOXICIDAD DE CONTAMINANTES PRESENTES EN AGUA. ....	53
9.4	OXÍGENO DISUELTO.....	54
9.5	VIENTO .....	55
9.6	AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR .....	56
9.7	ESTRATIFICACIÓN.....	58
9.8	AFECTACIONES BIOLÓGICAS .....	59
9.9	INCREMENTO DE CIANOBACTERIAS .....	60
10.	AFECTACIONES PROVENIENTES DE LA REGIÓN ANDINA .....	65
10.1	ESCENARIO 1. AUMENTO DE LAS PRECIPITACIONES .....	68
10.2	ESCENARIO 2. DISMINUCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES .....	75
11.	IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS ANTROPOGÉNICOS Y SU APOORTE A LA AFECTACIÓN PRODUCIDA POR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN CUERPOS DE AGUA DULCE SUPERFICIALES DE LA REGIÓN CARIBE .....	79
11.1	IMPACTOS GENERADOS POR EL TURISMO.....	82
11.2	IMPACTOS GENERADOS POR RESIDUOS PLÁSTICOS.....	83
11.3	IMPACTOS GENERADOS POR LA MINERÍA.....	84
11.4	IMPACTOS GENERADOS POR INFRAESTRUCTURA .....	85
11.5	IMPACTOS GENERADOS POR MALA DISPOSICIÓN DE RESIDUOS.....	85
11.6	IMPACTOS GENERADOS POR ASENTAMIENTOS HUMANOS .....	86
12.	ESQUEMA DE INTERCONEXIÓN .....	89
13.	CONCLUSIONES .....	90
	BIBLIOGRAFIA .....	91
	ANEXOS .....	108

## LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Principales sistemas de humedales de la Región Caribe .....	35
Tabla 2. Número de humedales por departamento.....	43
Tabla 3. Afectación de ecosistemas marino-costeros/impactos y sector vinculado.	81

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
A. Coberturas de suelo en la Región Caribe(a); Caribe terrestre (b)) .....	108
B. Imagen satelital de los cuerpos superficiales de agua dulce de la Región Caribe colombiana) .....	108
C. Zonificación hidrográfica de Colombia (área Caribe a) y área Magdalena-Cauca b)).....	108
D. Escenarios de cambio climático en la Región Caribe Colombiana (precipitación y temperatura)) .....	108
E. Erosión hídrica potencial en ladera para Colombia.....	108
F. índice de regulación hídrica para Colombia.....	108
G. Zonas susceptibles a inundación en Colombia.....	108
H. Variaciones espaciales de salinidad en la Ciénaga Grande de Santa Marta. a) junio 2019; b) octubre 2019; c) marzo 2019.....	108
I. Esquema: Identificación de impactos del cambio climático en cuerpos superficiales de agua dulce de la Región Caribe colombiana.....	108

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo hace uso de la recopilación de información a nivel mundial, nacional y regional para realizar una identificación de los impactos del cambio climático sobre los cuerpos de agua dulce superficiales presentes en la Región Caribe colombiana. Lo anterior, con el fin de describir las características particulares de cada uno de los cuerpos de agua dulce a analizar, evidenciando sus funciones y su altísima importancia ambiental, tanto para la región y sus pobladores, como para el normal funcionamiento de los complejos sistemas hídricos que recorren el territorio nacional.

A continuación, y con base en una robusta búsqueda bibliográfica, se analizan investigaciones que tienen lugar en otros contextos, pero que pueden ejemplificar y demostrar los impactos en cuerpos de agua con similares características. Teniendo en cuenta los escenarios de cambio climático propuestos por entidades nacionales e internacionales, se asumen los cambios en parámetros climáticos allí consignados y se identifican aquellos impactos que pueden tener lugar sobre los cuerpos de agua dulce superficiales, bajo las condiciones particulares de la región.

Sin embargo, en la búsqueda de profundización y una verdadera identificación de impactos; se analizan las interconectividades que existen entre regiones del país (y su codependencia bajo ciertos parámetros climáticos), así como la incidencia del hombre y sus actividades sobre el funcionamiento de sistemas hídricos en zonas tan pobladas.

De este modo, el documento no solo logra la identificación de los impactos del cambio climático sobre los cuerpos de agua analizados para esa Región, sino que genera una serie de conexiones que demuestran lo esencial de generar medidas tanto particulares, como generalizadas dentro del territorio nacional.

Por último, y buscando mostrar las relaciones entre los impactos bajo diferentes escenarios, se hace uso de un esquema que reúne los resultados de la investigación y que permite, la información sea condensada para su mejor entendimiento.

# 1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

## 1.1 JUSTIFICACIÓN

La investigación nace de la necesidad de regionalizar la problemática del cambio climático, en un territorio con condiciones climáticas adversas, pero con gran importancia ambiental y enorme productividad a nivel nacional. Teniendo en cuenta el gran número de cuerpos de agua dulce superficiales que pueden verse afectados con cambios en parámetros como precipitación, temperatura, caudal de grandes ríos o aumento del nivel del mar, y entendiendo su importancia ambiental, social y económica; se busca aportar positivamente a las estrategias que se lleven a cabo para salvaguardar estos ecosistemas ante escenarios ambientales adversos.

La identificación de impactos del cambio climático enfocada en las características y funcionalidades de cada cuerpo de agua en la Región, es un punto de partida para lograr comprender mejor las dinámicas y relaciones que existen entre sí mismos, los territorios, los diferentes escenarios a los que pueden estar sometidos, así como la trascendencia a nivel social de dichas problemáticas, tanto en causas como en consecuencias.

Por otro lado, el fenómeno del cambio climático debe ser estudiado para cada uno de los elementos naturales existentes, pues sus efectos, aún bajo modelos de aproximación, pueden cambiar categóricamente con una pequeña variación en los parámetros analizados. Teniendo en cuenta esto, esta investigación se desarrolló mediante el análisis de diferentes escenarios y su respectiva respuesta al fenómeno; logrando abarcar mayor información y describiendo mayor cantidad de impactos bajo diferentes condiciones. Esto, por su parte, aporta mayor conocimiento y una visión más amplia sobre lo que debe tenerse en cuenta a la hora de proponer estrategias de adaptación sobre cualquier cuerpo de agua que se requiera estudiar.

La complejidad del cambio climático, no sólo por todas las causas de las que depende, sino también por sus incalculables y variados impactos; hace que sea un tema con el que la población colombiana no está verdaderamente familiarizada. Sin embargo, comprender que el papel que juega el ser humano dentro de este fenómeno es decisivo tanto para generar impactos, como para reducirlos mediante

la realización de sus actividades cotidianas; tiene mucho que ver con el acceso que se tenga a información puntual, verídica y de fácil entendimiento. Por esa razón, los resultados de este trabajo de grado buscan exponer las relaciones permanentes entre impactos en cuerpos de agua dulce superficiales, con el fin de demostrar que depende uno del otro y que su aumento o disminución va a tener repercusiones en cada uno de los elementos que conforman un sistema hídrico.

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El fenómeno del cambio climático, ampliamente estudiado por diversos investigadores a raíz de los graves impactos ambientales alrededor del mundo; se convierte en una problemática de alta relevancia para la supervivencia de todas las especies, debido a su incapacidad de afrontar los efectos adversos de este fenómeno con respecto a la velocidad con que las está afectando, tal y como lo describe (CORNELIUS, 2015); además de esto, (URBAN, 2015) advierte que el fenómeno de cambio climático acelera de manera considerable la extinción de una de cada seis especies en el mundo, siendo América del sur la región con el riesgo más grande de extinción según este estudio; esto pone en grave riesgo la biodiversidad de la región y del mundo. Las implicaciones de este fenómeno se han estudiado a fin de analizar consecuencias más allá de las ambientales, en diferentes territorios y comunidades. Tal y como lo afirma (DIFFENBAUGH & BURKE, 2019), el cambio climático tiene un papel protagónico en el aumento de la brecha económica y social entre países cuya tasa de actividad económica e ingresos percibidos estimados, dista notablemente de aquellos con un desarrollo educativo e industrial mayor, lo que le permite concluir al autor que hay un 90% de posibilidades de que el cambio climático haya contribuido al aumento de la desigualdad entre países ricos y pobres. Esto afectaría con mayor rigor a territorios y comunidades en situación de vulnerabilidad, donde aún no es posible brindar un acceso total a servicios básicos.

De igual manera, este fenómeno ha demostrado lo implacable de sus consecuencias en innumerables especies, afectando su rango de distribución, en un escenario donde además se prevé que se intensifiquen para muchas plantas y animales diseminados, lo que genera riesgos asociados en los ecosistemas, tal y como lo afirman (WARREN et al., 2018). Este tipo de riesgos pueden estar asociados con la pérdida de resiliencia de los ecosistemas (pérdida en su capacidad de adaptación) a causa del aumento en la variabilidad climática y los gases de efecto invernadero; sobreexposición a temperaturas y concentraciones de CO<sub>2</sub> sin precedentes, que disminuirán la biodiversidad y pueden perturbar el

funcionamiento normal de los ecosistemas, afectando la oferta de sus servicios; alteraciones geográficas, de extensión y de composición de ecosistemas; cambios en perturbaciones o calamidades naturales (aumento de incendios, sequías e inundaciones) y, finalmente, la pérdida inminente de especies producto del desajuste de sus ciclos biológicos, relaciones de competencia nuevas y estrés directo. (KAESLIN et al., 2013). Además de lo anterior, este nuevo escenario mundial pone en grave riesgo la supervivencia humana al afectar de manera directa el ciclo hidrológico, lo que, según (ONU & UN-WATER, 2019), “provoca fenómenos meteorológicos extremos, reduce la capacidad de previsión de la disponibilidad de recursos hídricos, disminuye la calidad del agua y constituye una amenaza al desarrollo sostenible, la biodiversidad y el disfrute de los derechos humanos al agua potable y el saneamiento en todo el mundo”. Debido a la estrecha conexión que hay entre el clima y el ciclo hidrológico; siendo el incremento de la temperatura y la variación en la precipitación, efectos esperados a mediano y largo plazo (MARTINEZ & PATIÑO, 2013); se hace necesario plantear nuevos retos para la protección, gestión, distribución y uso eficiente del agua en Colombia y el mundo.

Sin duda, una de las mayores preocupaciones radica en las afectaciones que este fenómeno tiene sobre los cuerpos de agua dulce, donde ocurren diversos procesos que son esenciales para la vida humana, lo cual debe ser ampliamente estudiado con el fin de identificar los impactos y buscar estrategias de mitigación y adaptación de manera urgente. Tal y como lo afirman (SADOFF & MULLER, 2010), el agua es el medio principal a través del cual el cambio climático hará sentir sus efectos sobre las personas, los ecosistemas y las economías.

En Colombia, como en el mundo, se han evidenciado en los últimos años problemáticas asociadas al desabastecimiento de agua, así como la afectación de organismos acuáticos por causas, muchas veces, de absoluto desconocimiento. En Australia, en el año 2013, se presentó una fuerte oleada de calor que afectó aguas marinas y costeras, específicamente estuarios, en la zona meridional del país. Este fenómeno fue inmediatamente asociado con la masiva mortandad de peces en el golfo de Spencer, que se dio por la proliferación de algas nocivas producto del aumento de las temperaturas del agua, abundante turbulencia en la columna de agua, gran cantidad de detritos muertos; lo que también generó cambios en la distribución de especies de flora y fauna fuera de sus zonas normales (ROBERTS et al., 2019). Los episodios de inundación en este país también desencadenaron problemas de hipoxia en estuarios, provocando la muerte masiva de peces en estos cuerpos de agua. Los patrones de precipitación, las condiciones climáticas previas y la respuesta del cuerpo de agua a estos factores de estrés, son determinantes a la

hora de analizar estas situaciones y prevenir episodios futuros (Wong et al., 2018). Esta es una evidencia de las afectaciones que pueden ocasionar las variaciones de los parámetros climáticos a causa del cambio climático, en cuerpos superficiales de agua dulce en el mundo.

En el caso de la Región Caribe colombiana, se han presentado diversos episodios de mortandad de organismos acuáticos, relacionados con las posibles afectaciones de eventos climáticos que cambian radicalmente las características físicas, químicas y biológicas de cuerpos de agua. Un ejemplo de esto, fue la mortandad de peces ocurrida en el año 2019 en la ciudad de Santa Marta, sector “Las iguanas”, donde cerca de una tonelada de peces fueron encontrados muertos, y según investigaciones, se produjeron a raíz del aumento de temperaturas y bajos niveles de oxígeno disuelto en este cuerpo de agua; lo que asocian al recrudescimiento del fenómeno del niño. Este es un canal que permite el desplazamiento de embarcaciones, pero que además, es parte de la Reserva Natural de iguanas, un lugar creado para la conservación de la fauna de la ciudad (PERIÓDICO “EL CALLEJERO,” 2019). En el año 2015, situaciones similares lamentables se presentaron en la misma ciudad, esta vez en la Ciénaga Grande de Santa Marta, en el sector Caño Grande-Pajarales. Los estudios realizados evidencian gran contaminación por microorganismos fecales, altísima presencia de fitoplancton, presencia de cianobacterias y algas toxigénicas que pueden modificar trascendentalmente los parámetros físicos, químicos y biológicos del cuerpos de agua, originando la mortandad de más de 3 toneladas de peces de hasta 5 especies distintas y afectando directamente a residentes y pescadores que usan este cuerpo de agua como su principal suministro para actividades diarias, tal y como lo informaron medios de comunicación y expertos. Las razones, coinciden con afectaciones a la calidad de los cuerpos de agua, específicamente por variaciones de temperatura, oxígeno disuelto o afloramiento de algas nocivas. Los informes muestran que los parámetros de calidad se ven afectados por las condiciones climáticas presentes en ese contexto (INVEMAR, 2015). Fueron encontradas altas concentraciones de clorofila, una relación directamente proporcional con el crecimiento de fitoplancton (CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE, 2014). Esto desencadena una baja presencia de nutrientes inorgánicos en la columna de agua, y valores altos de pH. Por su parte, (NEBEL & WRIGHT, 1999), afirman que estos florecimientos de algas en un cuerpo de agua aumentan tanto el oxígeno disuelto como el detritus en horas diurnas, cuando no hay suficientes nutrientes en la columna de agua para mantener la población, razón por la cual se experimenta un aumento de la demanda bioquímica de oxígeno para su degradación. Es importante resaltar que este fenómeno de mortandad de peces se dio en una época climática

particular, pues, después de que se presentaron fuertes sequías debido al fenómeno del niño que afectaba dicha Región, hubo una presencia de fuertes vientos y lluvias en los días inmediatamente anteriores al fenómeno que afectó los organismos acuáticos, potenciando el lavado de los suelos salinos y la producción de sedimentos que pudieron modificar las características del cuerpo de agua (INVEMAR, 2015).

La corporación autónoma regional del Magdalena, afirma que los fenómenos climáticos son causantes de estas situaciones recurrentes, debido a que las sequías en ciertos periodos del año, disminuyen el caudal de los cuerpos de agua a niveles extremos, lo que “descompone” los sedimentos y materia orgánica, que, al llegar las torrenciales lluvias, son arrastrados y rápidamente colmatan las aguas disminuyendo la calidad de las mismas, y afectando a los organismos que allí habitan (MORALES, 2017). En este mismo año, se presentó una situación similar en el Banco, Magdalena, en el corregimiento de Barranco de Chilloa. Según entrevistas y medios de comunicación, fueron encontradas cuatro variedades de peces muertos, y CorpaMag apunta a dos posibles causas. La primera, relacionada a malas prácticas pesqueras y sus instrumentos; y la segunda, relacionada con eventos climáticos que afectan directamente la calidad del cuerpo de agua (SEMANA SOSTENIBLE, 2020).

En Cartagena, en los años 2019 y 2020, se presentaron situaciones de mortandad de peces en el sector “El Laguito”, y según medios de comunicación, fueron 4 de estos en medio de un año. Aunque las autoridades ambientales tomaron muestras para su análisis, las causas de estos episodios son aún desconocidas. Sin embargo, la hipótesis a la que apuntan los expertos, es a una falta de oxígeno que afecta peces jóvenes, y señalan como solución la instalación de aireadores para recuperar concentraciones óptimas de oxígeno, así como el bombeo de agua de otras ciénagas (SEMANA SOSTENIBLE, 2019). En este caso, muchos ambientalistas han sentido su voz de protesta a raíz de los informes de las autoridades y al poco y simplista análisis, que no permite conocer a ciencia cierta las afectaciones, y por tanto, proponer un plan de adaptación y protección acorde a las necesidades integrales del ecosistema (BATISTA, 2020).

Lo anterior, sumado a muchos otros casos de afectaciones a cuerpos de agua dulce en esa región, ampliamente documentados por los medios de comunicación, permite suponer que el Caribe colombiano está siendo altamente afectado por factores climáticos y actividades humanas, hecho que denota la alta vulnerabilidad de esta región a procesos de cambio climático; tal y como lo muestran informes y documentos científicos a cargo de entidades ambientales nacionales. Las

proyecciones realizadas por instituciones nacionales, muestra una disminución de la precipitación media en cerca del 27% del territorio nacional a largo plazo, además de un incremento de la temperatura en varios departamentos de la Región Caribe (IDEAM et al., 2015). Se hace entonces prioritaria la búsqueda e identificación de impactos y estrategias de manera detallada, a partir de información en el corto, mediano y largo plazo, que aporten de manera positiva a los planes de adaptación y mitigación al cambio climático en el país y en la región, y que logren una preparación eficiente en los próximos años para cualquier escenario posible, interconectando factores, aspectos y consecuencias ambientales, sociales y económicas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.2 OBJETIVO GENERAL**

Identificar los impactos del cambio climático en cuerpos superficiales de agua dulce en la región Caribe colombiana.

### **2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar impactos antropogénicos que tienen incidencia en la degradación cuerpos superficiales de agua dulce en la Región Caribe colombiana.
- Determinar el impacto que tiene el cambio climático en la degradación de ecosistemas de agua dulce en la Región Caribe colombiana.
- Proyectar consecuencias socio económicas y ambientales producto de la degradación de los ecosistemas de agua dulce en la región Caribe colombiana.
- Esquematizar la interconexión de los impactos bajo diferentes escenarios de cambio climático.

### 3. ESTADO DEL ARTE

#### 3.1 CONTEXTO MUNDIAL

Una investigación llevada a cabo por (CAMARGO & ALONSO, 2007), explica detalladamente los efectos adversos que tienen las emisiones incontroladas de nitrógeno a la atmósfera. Debido al proceso de deposición de dichas emisiones, tanto en el suelo como en cuerpos de agua; el documento analiza los fenómenos que puede experimentar este ecosistema cuando los niveles de compuestos nitrogenados aumentan considerablemente, describiendo procesos como acidificación, eutrofización y crecimiento de algas y microorganismos tóxicos que afectan la calidad del agua, y que, además, plantean la necesidad de controlar y regular las emisiones de nitrógeno, para disminuir los efectos adversos sobre los cuerpos de agua.

Este estudio de caso llevado a cabo en el Río Magdalena, en México, realiza una recopilación y recolección de datos de características físico químicas de los tramos estudiados, por parte de (MONTES et al., 2013) en época de lluvias y sequías. De esta manera los investigadores plantean cuatro escenarios con el fin de comparar el comportamiento de parámetros como OD, DBO, nitrógeno total y amoniacal (considerando temperatura y caudal del río), para evidenciar las implicaciones del cambio climático sobre las condiciones normales del ecosistema. Su trabajo permite concluir que el OD es un parámetros sensible a variaciones de temperatura, caudal y materia orgánica en el río; razón por la cual estos cuerpos de agua deben ser analizados a profundidad y de manera continua, a sabiendas de las condiciones climáticas futuras.

(WEISS et al., 2018), llevaron a cabo una investigación en cuatro embalses en Alemania, con el fin de observar el comportamiento de las concentraciones de CO<sub>2</sub>, con respecto al pH del agua. Además, usando dos especies de crustáceo "Daphnia", quisieron evaluar el comportamiento de los organismos de agua dulce cuando se presentan cambios en las características físicas y químicas, al aumentar el CO<sub>2</sub>. Así, pudieron evidenciar que este aumento a concentraciones futuras esperadas, afecta la capacidad de este organismo para detectar a sus predadores. Este contaminante puede afectar todos los niveles tróficos al alterar la comunicación química entre organismos. Además de lo anterior, este estudio comprobó que en ausencia de señales de depredadores, los organismos estudiados no desarrollan características morfológicas evolutivas que les permiten

defenderse. Todo esto permite concluir lo propensos que son estos ecosistemas a la acidificación, y los estragos ambientales que este fenómeno puede ocasionar.

En esta investigación realizada por (PALAU et al., 2020), se evidencian las contribuciones negativas y positivas, que, según la literatura, tiene los embalses para el ambiente. Se centran en el papel que cumplen estos en el ciclo del carbono, usando para ello un estudio de caso de un embalse representativo en España. Debido al cambio climático, el ciclo del carbono se ve alterado en su tiempo de residencia en los sumideros, además de generar un aporte natural significativo a los gases de efecto invernadero, debido a los procesos físicos, químicos y biológicos que allí ocurren. El estudio plantea la necesidad de realizar un balance completo de carbono a la hora de estudiar un embalse, teniendo en cuenta tanto los sedimentos como el ecosistema terrestre usado para su construcción. Sus resultados detallan la necesidad de proteger estos ecosistemas debido a su gran capacidad para retener carbono, y su reducida contribución real al cambio climático.

(Zhang et al., 2015), desarrollan un estudio que tiene lugar en el lago Qiandaohu, en China. Su propósito es evaluar el efecto del cambio climático en dicho ecosistema, basado en datos de años anteriores. Allí, se realizan análisis para la toma de profundidades de temperatura, materia orgánica, y OD, en un periodo de tiempo comprendido entre enero del 2010 y marzo de 2014. Los valores de estratificación de OD, en su punto más bajo, tienen relación directa con el aumento de temperatura en esa zona. En aquellas zonas con los niveles más bajos de estratificación marcada de OD, se encontró una alta carga de materia orgánica, y fue evidente la reducción de la calidad del agua. Estas afectaciones se conectan directamente con los procesos de eutrofización que han aumentado en la zona, lo que expone la necesidad de desarrollar planes de gestión y protección de cuerpos de agua que son suministro para comunidades.

### **3.2 CONTEXTO NACIONAL**

Este estudio llevado a cabo por (VIDAL et al., 2013), expone las características que presentan los humedales altoandinos en el territorio nacional, las cuales deben ser priorizadas al momento de proponer y ejecutar planes de adaptación en los territorios circundantes a estos ecosistemas. Se analizan los resultados para precipitación y temperatura proporcionados por el IDEAM para estas zonas, mostrando un aumento progresivo de esta última, lo que motivaría la desaparición de cuerpos de agua de deshielo y aumentaría el riesgo de aridez e incendios. Además de lo anterior, el estudio agudiza la preocupación sobre los humedales ubicados en zonas donde el balance hídrico (ya sea por característica

geomorfológicas, por escasez de masas glaciares o por tamaño reducidos de las cuencas), es negativo; lo anterior, debido a que este factor genera una tensión hídrica la mayor parte del año, y los hace más vulnerables al cambio climático.

En el siguiente estudio enfocado en el país y su vulnerabilidad al cambio climático, se detallan las características primordiales que pueden determinar graves afectaciones al ecosistemas, tales como temperatura, pH, eutrofización, cambios en su nivel de agua y en el nivel freático, tasa de retención de carbono; así como actividades antrópicas que han generado, con el pasar del tiempo, daños irreparables. También reafirma la necesidad de ampliar estudios sobre cuerpos de agua dulce, cuya importancia ambiental es enorme, y que los gobiernos enfoquen sus esfuerzos de inversión en la gestión, protección y planes de mitigación de estos ecosistemas al cambio climático(CÁCERES, 2019).

## **4. MARCO DE REFERENCIA**

### **4.1 MARCO CONCEPTUAL**

#### **4.1.1 Calidad del agua**

La calidad del agua puede considerarse como una medida de la idoneidad del agua para un uso particular basado en características físicas, químicas y biológicas seleccionadas. Para determinar la calidad del agua, los científicos primero miden y analizan las características del agua, como la temperatura, el contenido mineral disuelto y la cantidad de bacterias. Las características seleccionadas se comparan con los estándares numéricos y las pautas para decidir si el agua es adecuada para un uso particular (CORDY, 1965).

La calidad del agua puede definirse como las características químicas, físicas y biológicas del agua, generalmente con respecto a su idoneidad para un uso determinado.

El agua tiene muchos usos, como por ejemplo para la recreación, la bebida, la pesca, la agricultura y la industria. Cada uno de estos usos designados tiene diferentes normas químicas, físicas y biológicas definidas necesarias para apoyar ese uso (Roy, 2018).

#### **4.1.2 Características del agua**

Término usado para identificar elementos, compuestos, sustancias y microorganismos presentes en el agua para consumo humano (Resolución 2115, 2007).

#### **4.1.3 Uso eficiente del agua**

Incluye cualquier medida que reduzca la cantidad de agua que se utiliza por unidad de cualquier actividad, y que favorezca el mantenimiento o mejoramiento de la calidad de agua.

El uso eficiente del agua es cualquier reducción o prevención de pérdida del agua que sea de beneficio para la sociedad. Visto de esta manera, el uso eficiente del recurso es de suma importancia para la conservación. Al mismo tiempo, la definición de la conservación sugiere que las medidas de eficiencia deben tener

sentido social y económico, además de reducir el uso del vital líquido por unidad de actividad(TATE, 2009).

#### **4.1.4 Cuerpo de agua**

Un cuerpo de agua es cualquier extensión que se encuentran en la superficie terrestre (ríos y lagos) o en el subsuelo (acuíferos, ríos subterráneos); tanto en estado líquido, como sólido (glaciares, casquetes polares); tanto naturales como artificiales (embalses) y pueden ser de agua salada o dulce. Los cuerpos de agua dulce pueden ser: ríos, lagos, lagunas y acuíferos (AGUA.ORG, n.d.).

#### **4.1.5 Clasificación ecológica de los organismos de agua dulce**

Las condiciones físicas y químicas dominantes en los medios acuáticos determinan el tipo de organismos que viven en ese medio. Se han propuesto varias clasificaciones ecológicas de los organismos acuáticos; la más aceptada hoy día es la que presentamos a continuación:

- a. Plancton. Comprende los organismos que viven suspendidos en las aguas y que, por carecer de medios de locomoción o ser estos muy débiles, se mueven o se trasladan a merced de los movimientos de las masas de agua o de las corrientes. Generalmente son organismos pequeños, la mayoría microscópicos.
- b. Necton. Son organismos capaces de nadar libremente y, por tanto, de trasladarse de un lugar a otro recorriendo a veces grandes distancias (migraciones). En las aguas dulces, los peces son los principales representantes de esta clase, aunque también encontramos algunas especies de anfibios y otros grupos.
- c. Bentos. Comprende los organismos que viven en el fondo o fijos a él y por tanto dependen de éste para su existencia. La mayoría de los organismos que forman el bentos son invertebrados.
- d. Neuston. A este grupo pertenecen los organismos que nada o “caminan” sobre la superficie del agua. La mayoría son insectos.
- e. Seston. Es un término adoptado recientemente y se aplica a la mezcla heterogénea de organismos vivientes y no vivientes que flotan sobre las aguas.
- f. Perifiton. Organismos vegetales y animales que se adhieren a los tallos y hojas de plantas con raíces fijas en los fondos (EDUCACIÓN AMBIENTAL EN LA REPÚBLICA DOMINICANA, 2020).

#### **4.1.6 Recursos naturales.**

Los recursos naturales hacen referencia a bienes que son de origen natural, que no se encuentran alterados por la actividad humana, de los cuales las sociedades se valen mediante su explotación para lograr su bienestar y desarrollo, son valiosos para las sociedades porque contribuyen a su sustento, la actividad humana es la que explota a estos recursos de forma intensa, sin embargo, solo las regulaciones pueden llevar a controlar y evitar la sobre-explotación de los mismos. Existen dos tipos de recursos naturales, los renovables y los no renovables(EQUIPO EDITORIAL ETECÉ, n.d.).

##### **Recursos renovables.**

Son aquellos que tienen un proceso por el cual se regeneran o renuevan con cada ciclo nuevo, aunque aun así el uso excesivo de estos puede llevar a extinguirlos, algunos ejemplos típicos de estos son: los bosques, el aire, el viento, la radiación solar o la producción agrícola(EQUIPO EDITORIAL ETECÉ, n.d.).

##### **Recursos no renovables.**

Son limitados en cantidad, en algunos casos estos tienen también un ciclo de renovación pero que no llega al ritmo de extracción o explotación de los mismos. Se trata de recursos naturales que no pueden ser producidos, ni reproducidos por el humano a un cierto nivel que sostenga la tasa de consumo igualmente algunos ejemplos típicos de estos son: el carbón, metales, el gas natural o el petróleo (EQUIPO EDITORIAL ETECÉ, n.d.)

La humanidad ha venido disponiendo de cuantos bienes ha encontrado en la naturaleza, utilizándolos en mayor o menor medida y empleando unos u otros según las tecnologías disponibles para su aprovechamiento y transformación, recientemente tras la revolución industrial, el desarrollo tecnológico y la desmedida demanda de bienes procedentes de la transformación de los recursos naturales, que son desechados con gran celeridad, se ha producido un uso desmedido, o bien un despilfarro (P. CASTELLANOS, 2007).

#### **4.1.7 Efectos adversos del cambio climático**

Cambios en el medio ambiente físico o en la biota resultantes del cambio climático que tienen efectos nocivos significativos en la composición, la capacidad de recuperación o la productividad de los ecosistemas naturales o sujetos a

ordenación, o en el funcionamiento de los sistemas socioeconómicos, o en la salud y el bienestar humanos (ONU, 1997).

#### **4.1.8 Cambio climático**

Cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables (ONU, 1997).

#### **4.1.9 Cambio climático abrupto**

Cambio a gran escala en el sistema climático que tiene lugar en algunos decenios o en un lapso menor, persiste (o se prevé que persista) durante al menos algunos decenios y provoca importantes perturbaciones en los sistemas humanos y naturales (IPCC & PLANTON, 2013).

#### **4.1.10 Cambio climático asegurado**

Debido a la inercia térmica del océano y a ciertos procesos lentos de la criosfera y de las superficies terrestres, el clima seguiría cambiando aunque la composición de la atmósfera mantuviera fijos sus valores actuales. Los cambios en la composición de la atmósfera ya experimentados conllevan un cambio climático asegurado, que continuará en tanto persista el desequilibrio radiativo y hasta que todos los componentes del sistema climático se ajusten a un nuevo estado. Los cambios de temperatura sobrevenidos una vez que la composición de la atmósfera se ha estabilizado se denominan variación asegurada de temperatura a composición constante o simplemente calentamiento asegurado. El cambio climático asegurado conlleva también otros cambios, por ejemplo del ciclo hidrológico, de los fenómenos meteorológicos extremos, de los fenómenos climáticos extremos y del nivel del mar. Con emisiones constantes aseguradas se llegaría a un cambio climático asegurado resultante de mantener constantes las emisiones de origen antropógeno, y con emisiones nulas aseguradas se llegaría a un cambio climático asegurado resultante de fijar a cero las emisiones (IPCC & PLANTON, 2013).

#### **4.1.11 Emisiones**

Liberación de gases de efecto invernadero o sus precursores en la atmósfera en un área y un periodo de tiempo especificados (ONU, 1997).

#### **4.1.12 Efecto invernadero**

Efecto radiativo infrarrojo de todos los componentes de la atmósfera que absorben en el infrarrojo. Los gases de efecto invernadero y las nubes y, en menor medida, los aerosoles absorben la radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra y por cualquier punto de la atmósfera. Esas sustancias emiten radiación infrarroja en todas las direcciones, pero, a igualdad de condiciones, la cantidad neta de energía emitida al espacio es generalmente menor de la que se habría emitido en ausencia de esos absorbentes debido a la disminución de la temperatura con la altitud en la troposfera y el consiguiente debilitamiento de la emisión. Una mayor concentración de gases de efecto invernadero aumenta la magnitud de este efecto, y la diferencia generalmente se denomina efecto invernadero intensificado. La modificación de la concentración de los gases de efecto invernadero debida a emisiones antropógenas contribuye a un aumento de la temperatura en la superficie y en la troposfera inducido por un forzamiento radiativo instantáneo en respuesta a ese forzamiento, que gradualmente restablece el balance radiativo en la parte superior de la atmósfera.(IPCC & PLANTON, 2013).

#### **4.1.13 Efecto radiativo**

Repercusión en el flujo de la radiación o el índice de calentamiento (por regla general, en el flujo descendente en la parte superior de la atmósfera) causado por la interacción de un determinado elemento con los campos de radiación infrarroja o radiación solar mediante absorción, dispersión y emisión, en relación con una porción idéntica de atmósfera que carezca de ese elemento. Cuantifica la repercusión del elemento en el sistema climático (IPCC & PLANTON, 2013).

#### **4.1.14 Fuente**

Cualquier proceso o actividad que libera un gas de invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de invernadero en la atmósfera(ONU, 1997).

#### **4.1.15 Eutrofización**

La eutrofización se define como un proceso de deterioro de la calidad del recurso agua, se origina por el enriquecimiento de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, condicionando la utilización de estos y ejerciendo grandes impactos ecológicos, sanitarios y económicos a escala regional (LEDESMA et al., 2013).

#### **4.1.16 Turbidez**

La turbiedad en el agua es causada por materia suspendida y coloidal tal como arcilla, sedimento, materia orgánica e inorgánica dividida finamente, plancton y otros microorganismos microscópicos. La turbiedad es una expresión de la propiedad óptica que causa la luz al ser dispersada y absorbida en vez de transmitida sin cambios en la dirección del nivel de flujo a través de la muestra: en otras palabras, es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la suspensión (CARPIO, 2007).

#### **4.1.17 Sedimento**

Llámesese sedimento a un depósito de materia sólida en la superficie terrestre transportado por cualquier agente natural (aire, agua, gravedad) en condiciones normales de la superficie terrestre y cuyo origen depende, en gran medida, de las condiciones físicas y químicas presentes en la transición suelo-atmósfera y suelo-agua (PÉREZ, 2011).

#### **4.1.18 Salinidad**

La salinidad es una medida de la cantidad de sales disueltas en agua. La salinidad y la conductividad están relacionadas porque la cantidad de iones disueltos aumentan los valores de ambas. Las sales y también otras sustancias afectan la calidad del agua potable o de riego. También influyen en la biota acuática y cada organismo tolera una gama de valores de conductividad. La composición iónica del agua puede ser crítica (CALIFORNIA WATER BOARDS, n.d.).

#### **4.1.19 Oxígeno disuelto**

El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno gaseoso que está disuelto en el agua. El oxígeno libre es fundamental para la vida de los peces, plantas, algas, y otros organismos; por eso, desde siempre, se ha considerado como un indicador de la capacidad de un río para mantener la vida acuática. Medidas de oxígeno disuelto menor a 3ppm, generan situaciones de hipoxia. Mientras que las medidas menores a 2ppm, son consideradas situaciones de anoxia (UNIVERSIDAD COMPLUTENSE, 2015).

El oxígeno disuelto (OD) es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios así como para otras formas de vida aerobia. No obstante, el oxígeno es

ligeramente soluble en el agua; la cantidad real de oxígeno que puede estar presente en la solución está determinada por a) la solubilidad del gas, b) la presión parcial del gas en la atmósfera, c) la temperatura, y d) la pureza del agua (salinidad, sólidos suspendidos). La interrelación de estas variables debe ser consultada en textos apropiados para conocer los efectos de la temperatura y la salinidad sobre la concentración de OD. Las concentraciones de OD en aguas naturales dependen de las características fisicoquímicas y la actividad bioquímica de los organismos en los cuerpos de agua. El análisis del OD es clave en el control de la contaminación en las aguas naturales y en los procesos de tratamiento de las aguas residuales industriales o domésticas (IDEAM, 2004).

## **4.2 MARCO LEGAL**

**CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (1992):** lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.

**IPCC 1988 (Grupo Intergubernamental de expertos sobre Cambio Climático creado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)) :** creado para facilitar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta.

**PROTOCOLO DE KIOTO SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO (1997):** disminuir el cambio climático antropogénico, cuya base es el efecto invernadero. Las partes deben cumplir con el compromiso de limitar y reducir emisiones, junto a medidas puntuales que promuevan el desarrollo sostenible.

**CONVENIO SOBRE LA DIVERSIDAD BIOLÓGICA (1992):** busca establecer la relación entre el cambio climático y la biodiversidad en los siguientes aspectos:

- Incremento en la velocidad de pérdida de la biodiversidad.
- Impacto del cambio climático en los bosques nublados, bosques tropicales, bosques secos, arrecifes coralinos, manglares, y humedales interiores.
- Pérdida y retirada de los glaciares, afectando descarga y suministro de agua.
- Impactos por inundación y sequía.

**LEY 99 DE 1993:** Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.

**LEY 164 DE 1994:** Por medio de la cual se aprueba la "Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecha en Nueva York el 9 de mayo de 1992.

**Ley 629 de 2000:** Por medio de la cual se aprueba el "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997.

**PRIMERA COMUNICACIÓN NACIONAL ANTE LA CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO:** Colombia presentó la Primera Comunicación Nacional ante la CMNUCC, como un ejercicio coordinado por el IDEAM, en el que participaron entidades públicas y privadas que le dieron su aprobación. A partir de las proyecciones para el año 2050, que generó esta Primera Comunicación, de un aumento en la temperatura media anual del aire para el territorio nacional entre 1°C y 2°C y de una variación en la precipitación entre  $\pm$  15%, de la desaparición del 78% de los nevados y el 56% de los páramos y de un ascenso del nivel del mar de aproximadamente 40 cm. en la costa Caribe y de 60 cm. en la costa Pacífica, se concluyó que el país es altamente vulnerable a los efectos del Cambio Climático, a pesar de emitir únicamente el 0,25% de las emisiones globales de dióxido de carbono.

**SEGUNDA COMUNICACIÓN NACIONAL ANTE LA CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO:** presenta el documento de inventario nacional de fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero para los años 2000 y 2004 cuyo cálculo se determinó con base en la información disponible, utilizando las metodologías aprobadas por la Conferencia de las Partes de la CMNUCC.

**DECRETO 2811 DE 1974:** CÓDIGO NACIONAL DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES Y DE PROTECCIÓN AL MEDIO AMBIENTE.

**LEY 1931 DE 2018:** por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático.

**DECRETO N° 269 DE 2015:** establece la Política Nacional de Cambio Climático.

**CONPES 3242:** Estrategia Nacional para la venta de servicios ambientales de Mitigación de Cambio Climático , cuyo objetivo es promover la participación competitiva de Colombia en el mercado de reducciones verificadas de emisiones de gases de efecto invernadero, mediante el establecimiento y consolidación de un marco institucional nacional.

**RESOLUCIÓN 2733 DE 2010:** Por la cual se adoptan los requisitos y evidencias de contribución al desarrollo sostenible del país, se establece el procedimiento para la aprobación nacional de programas de actividades (PoA- por sus siglas en inglés) bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y se reglamenta la autorización de las entidades coordinadoras.

**RESOLUCIÓN 2734 DE 2010:** Por la cual se adoptan los requisitos y evidencias de contribución al desarrollo sostenible del país y se establece el procedimiento para la aprobación nacional de proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que optan al Mecanismo de Desarrollo Limpio – MDL y se dictan otras disposiciones.

**ESTRATEGIA COLOMBIANA DE DESARROLLO BAJO EN CARBONO:** identificar y valorar acciones que estarán encaminadas a evitar el crecimiento acelerado de las emisiones de GEI a medida que los sectores crecen, 2) desarrollar planes de acción de mitigación en cada sector productivo del país, y 3) crear o promover las herramientas para su implementación, incluyendo un sistema de monitoreo y reporte.

**REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PROVENIENTES DE LA DEFORESTACIÓN Y DEGRADACIÓN DE BOSQUES:** mecanismo internacional en construcción por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático - CMNUCC, cuyo objetivo es ayudar a que las emisiones de dióxido de carbono producidas por la deforestación y degradación de bosques [selvas], se reduzcan, para así atenuar el Cambio Climático.

**PLAN NACIONAL DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO:** su objetivo es reducir el riesgo y los impactos socio-económicos y ecosistémicos asociados a la variabilidad y al cambio climático en Colombia.

**CONPES 3700:** estrategia institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia.

**CONFERENCIA MUNDIAL SOBRE LA ATMÓSFERA CAMBIANTE:** implicaciones para la seguridad mundial: Creación del Panel Intergubernamental sobre el

Cambio Climático (IPCC). Inicialmente compuesto por 300 científicos de todo el mundo, encargados de revisar las causas del cambio climático y sugerir posibles soluciones.

### **4.3 MARCO TEÓRICO**

La metodología del trabajo de grado busca el análisis de información secundaria con el fin de generar conocimientos mediante la comprensión de estudios, la recopilación de resultados y la adaptación de los mismos a condiciones de tipo particular. Por tanto, se hace uso de investigación de tipo descriptiva, con el fin de trabajar sobre conocimientos generados a partir de profundos estudios, analizar las variables que pueden explicar de manera detallada los fenómenos, y generar una interpretación correcta producto del análisis de datos.

En cuanto a los métodos de investigación usados, esta monografía se desarrolla a partir de la recolección de datos, por lo cual se hace uso de los estudios de caso y de la investigación/acción, que implica la reflexión relacionada con el diagnóstico producto del análisis de escenarios, su interconexión genera el planteamiento de hipótesis y la intervención, mediante la propuesta de un esquema que aporte de manera significativa a los estudios sobre el problema de investigación.

La metodología para este proyecto estuvo determinada por un proceso que inició con el acercamiento al problema de investigación, identificando los vacíos de conocimiento en esta área, seguido de la pregunta de investigación que permitió el planteamiento del problema y su justificación. Los objetivos se plantearon para darle un enfoque a la investigación y lograr obtener fuentes de datos e información precisas. Una vez analizadas, se planteó el diseño y tipo de investigación, seleccionando aquella información y actores dentro del planteamiento, que pudieran analizarse, particularizando el estudio. Se realizó una recolección de información, datos y estudios de caso que permitieran un acercamiento a las condiciones locales propuestas, a continuación, se hizo un análisis y se procedió a estructurar el documento en base a estos conocimientos. Esto permitió identificar diferentes interconexiones mediante el análisis de diversos escenarios, logrando una serie de resultados que aportan al problema de investigación. Por último, y buscando una mejor presentación e interpretación de los resultados, se diseñó un esquema que permitiera la recopilación de la investigación.

Las variables que se analizaron en esta investigación son de tipo discreto. Si bien son variables que pueden cuantificarse mediante un valor numérico, este estudio trata de estimar los grados de afectación de dichas variables, en la medida que

sufren alteraciones otros parámetros interconectados a ellas. Estas son: alteraciones sobre parámetros de calidad de cuerpos de agua; fluctuaciones de parámetros climáticos, cambios en procesos físicos y químicos de cuerpos de agua, incidencia de fenómenos climáticos sobre cuerpos de agua, afectación de la región Andina sobre la región Caribe, incidencia de actividades antropogénicas sobre afectaciones en cuerpos de agua, afectaciones socio-económicas producto del fenómeno del cambio climático.

Enfoque cualitativo de investigación: Se guía por áreas o temas significativos de investigación. Sin embargo, en lugar de que la claridad sobre las preguntas de investigación e hipótesis preceda a la recolección y el análisis de los datos (como en la mayoría de los estudios cuantitativos), los estudios cualitativos pueden desarrollar preguntas e hipótesis antes, durante o después de la recolección y el análisis de los datos (HERNANDES et al., 2014)

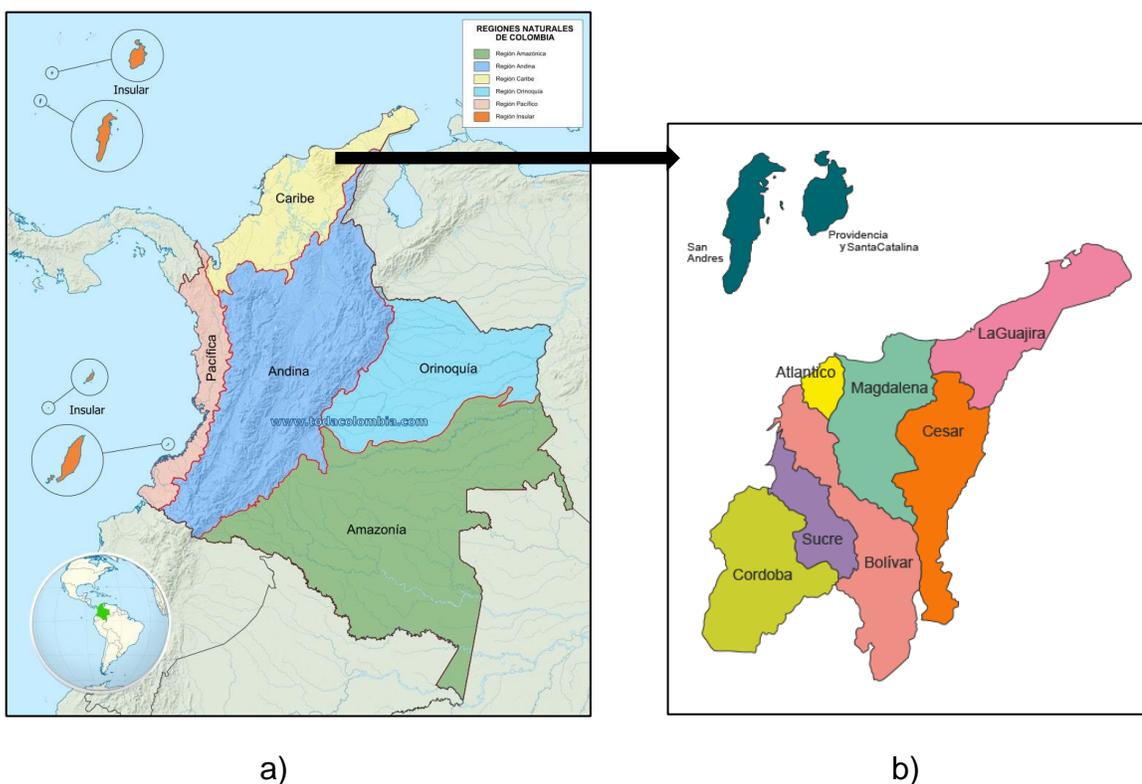
Enfoque racionalista-realista: el conocimiento se concibe como explicación verosímil y provisional de un mundo al que se accede mediante referencias intersubjetivas. En el enfoque racional-realista se entiende como método válido la construcción teórica a partir de conjeturas amplias y universales de las que se deducen los casos particulares (DE BERRIOS & BRICEÑO DE GOMEZ, 2009).

Paradigma desarrollista sustentabilista: ve en los recursos y en los problemas del medio ambiente una severa restricción al crecimiento económico, pero al mismo tiempo estiman que es posible un compromiso, con el auxilio de una definición adecuada de las restricciones que deberán respetarse y de un uso hábil de los instrumentos económicos de estímulo. Las consideraciones éticas intrageneracionales e intergeneracionales se toman en cuenta de manera equilibrada (PÉREZ, 2011).

## 5. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 5.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Figura 1. Ubicación geográfica de la Región Caribe Colombiana



Fuente:

Nota: Mapa regiones naturales de Colombia a), (TODA COLOMBIA, 2019)  
Departamentos que conforman la Región Caribe, (OBSERVATORIO DEL CARIBE  
COLOMBIANO, n.d.-a) b)

### 5.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Región Caribe corresponde a la porción noroccidental del país y abarca los ámbitos: continental, que alberga casi todos los ecosistemas presentes de las zonas tropicales, insular, que incluye el archipiélago oceánico de San Andrés y Providencia y las islas y archipiélagos de la plataforma continental, y marino, que

incluye las zonas poco profundas y los fondos oceánicos; estos, a pesar de sus obvias diferencias, comparten en gran medida una misma historia geológica, están decididamente marcados por la presencia y la influencia del mar Caribe y sometidos a procesos morfodinámicos, hidroclimáticos y ecológicos que interactúan muy estrechamente entre sí (DIAZ, 2014).

La región Caribe se encuentra localizada en la parte norte del país y actualmente está conformada por siete departamentos en su parte continental (La Guajira, Magdalena, Atlántico, Cesar, Córdoba, Sucre y Bolívar), y uno en su parte insular (San Andrés y Providencia), los cuales representan el 11.6% de los 1'141.748 Km<sup>2</sup> que comprende el total del territorio nacional (ROCA & PÉREZ, 2006). El área continental es de 132.218 km<sup>2</sup> y la zona insular registra 52,5 km<sup>2</sup> (OBSERVATORIO DEL CARIBE COLOMBIANO, n.d.-b).

En su aspecto físico, la región Caribe está constituida predominantemente por tierras bajas y planas, aunque parte del territorio se encuentra enmarcado por las estribaciones de las tres cordilleras, específicamente en Córdoba, Bolívar y Cesar. Adicionalmente, en la región se encuentra la Sierra Nevada de Santa Marta la cual se destaca por ser una de las mayores fuentes hídricas para los departamentos de Magdalena, Cesar y La Guajira (ROCA & PÉREZ, 2006).

La organización político administrativa la conforman 197 municipios, que hacen parte de los ocho (8) departamentos de la región; Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, La Guajira, Magdalena y Sucre, se localizan en el área continental, mientras que el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, constituyen la zona insular (OBSERVATORIO DEL CARIBE COLOMBIANO, n.d.-b).

### **5.3 HIDROGRAFÍA**

La región posee una gran cantidad de recurso hídrico, especialmente en la zona Sur, ya que tal y como lo afirman Meisel y Perez (2006), allí se localiza la subregión de La Mojana, una zona de humedales productivos que pertenece a la Depresión Momposina, y que tiene como función regular los cauces de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge, así como la de amortiguar las inundaciones de la zona. Al Norte de la región, en los departamentos de Bolívar, Magdalena y Atlántico, es posible encontrar un alto número de cuerpos de agua entre Ciénagas y Ríos de menos importancia (ROCA & PÉREZ, 2006). (Ver **ANEXO A**. Coberturas de suelo en la Región Caribe(a); Caribe terrestre (b)). La Ciénaga Grande de Santa Marta, es la que más se destaca debido a su gran extensión (450 km<sup>2</sup>), y su ubicación en el noroccidente del departamento del Magdalena dentro de la región conocida como Delta Exterior

del Río Magdalena. La fuente de abastecimiento de esta ciénaga son los ríos de la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, el Río Magdalena y el Mar Caribe (CONSEJO REGIONAL DE PLANEACIÓN DE LA COSTA ATLÁNTICA, 1992) (Ver **ANEXO B**. Imagen satelital de los cuerpos superficiales de agua dulce de la Región Caribe colombiana).

La región caribe presenta seis de los principales sistemas de humedales del país, tal y como se muestra a continuación:

Tabla 1. Principales sistemas de humedales de la Región Caribe

REGIÓN NATURAL	COMPLEJO	DESCRIPCIÓN
Caribe	Río Atrato	Ciénagas y bañados a lo largo de la depresión entre las serranías del Darién y de los Saltos al W y la de Abibe al E. Incluye el delta del Atrato, sus planicies inundables y las del Río León. Complejo de Ciénagas de Tumaradó, Perancho, La Honda, La Rica.
	Río Sinú	Conjunto de ciénagas, bañados y planicies aluviales abierto al mar a través de la desembocadura del Río Sinú en el Delta de Tinajones. Limitado al S por la Ciénaga de Betaneí, al W por los caños caños Viejo y Tigre, hasta la Ciénaga Grande de Loricá. AL E está limitado por el caño Aguas Prietas hasta el N de la Ciénaga Grande.
	Depresión Momposina	Conjunto de humedales formado en la confluencia de los ríos

		San Jorge, Cauca y Magdalena. Ocupa una extensión aproximada de 600,000 ha en donde se localizan los complejos cenagosos de Zapatosa, Ayapel, y San Marcos, ALN de la desembocadura del Río Cauca; incluye planicies inundables del Río Magdalena y grandes humedales permanentes.
	Bajo Magdalena Canal del Dique	Se extiende al N de la Serranía de María y desemboca al mar en las Bahías de Cartagena y Barbacoas. Corre a lo largo de la depresión que se encuentra en el límite sur de los Departamentos de Bolívar y Atlántico, la cual es irrigada por aguas del Río Magdalena.
	Delta Río Magdalena	Su principal cuerpo de agua es la Ciénaga Grande de Santa Marta y el complejo de ciénagas y caños de agua dulce asociados.
	Alto Río Cauca	ALN de los rápidos del Río Cauca al encañonarse luego de la desembocadura del Río Risaralda. Incluye las planicies aluviales

		del Cauca y sus principales afluentes y se extiende hacia el sur hasta Santander de Quilichao (Cauca). Humedales del Valle Geográfico del Río Cauca madre viejas y lagunas asociadas).
	Magdalena Medio	Limita al N con la Depresión Momposina, entre La Gloria (Cesar) y Gamarra (Santander), en la llanura aluvial comprendida desde este sector hasta los alrededores de La Dorada (Caldas) se encuentran la Ciénaga de Cachimbero, La Chiquita, El Encanto y Caño Negro.

**Fuente:** (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2002)

#### 5.4 CLIMA

Los aspectos climáticos de la Región Caribe Colombiana están determinados por su ubicación geográfica. Al estar ubicada en la franja tropical y recibir la influencia amortiguadora del mar, las oscilaciones de la temperatura promedio mensual en un mismo lugar son muy reducidas —menos de 2 °C—, menores que las variaciones de temperatura a lo largo del día, que pueden superar los 15 °C, por lo que el elemento meteorológico que mejor define el clima es la precipitación, que pueden oscilar entre los 200 y 2500 mm al año. El periodo de lluvias está marcado por perturbaciones atmosféricas generadas por los vientos débiles, lo que puede ocasionar borrascas y tormentas tropicales de mayor o menor intensidad, e incluso huracanes con repercusiones en toda la región. La distribución de las lluvias y precipitación anual en la región se ve afectada por la topografía que allí se presenta, aspecto que puede interactuar con la circulación atmosférica y generar grandes variaciones. En cuanto a la poca oscilación de las temperatura promedio en el año, muestran una variabilidad de acuerdo con la elevación del terreno

respecto al nivel del mar y, en menor proporción, con la distancia del mar o el grado de continentalidad del lugar. (DÍAZ, 2014).

El principal determinante de la estacionalidad climática en la región es la expansión y desplazamiento hacia el sur de la celda subtropical de alta presión atmosférica del Atlántico norte, con el simultáneo desplazamiento al sur de la Zona de Convergencia Intertropical —ZCIT—, lo cual sucede durante el invierno boreal, de diciembre a marzo y se manifiesta con la intensificación de los vientos alisios; también se produce el enfriamiento de la superficie del mar y la humedad del aire se reduce, por lo que durante ese lapso la región experimenta el periodo más seco del año. Con el inicio de la primavera boreal, a finales de marzo y comienzos de abril, la ZCIT inicia su desplazamiento gradual hacia el norte, a medida que la celda de alta presión del Atlántico norte se contrae y hace decrecer la intensidad de los alisios, con el consecuente calentamiento del mar y aumento de la humedad atmosférica (DÍAZ, 2014).

## **5.5 IMPORTANCIA AMBIENTAL DE LA REGIÓN CARIBE**

La región Caribe tiene una gran importancia ambiental en el país. Su posición geográfica, su extensión territorial, su amplia hidrografía, su inmensa biodiversidad y variedad ecosistémica y climática; evidencia una alta susceptibilidad ante cambios climáticos abruptos, y hace indispensable el estudio y el enfoque investigativo para la identificación de impactos y su pertinente mitigación.

La región Caribe colombiana cuenta con tres tipos de ecosistemas con una extensa biodiversidad. Ecosistemas de tipo terrestre, acuáticos marinos y acuáticos continentales, han sido identificados y dan cuenta de la enorme riqueza hídrica de la región, así como de su importancia ambiental. En cuanto a la vulnerabilidad o riesgo, es preciso detallar que aquellos ecosistemas con prioridad de conservación corresponden a humedales, lagunas, playones, marismas, manglares, y en general a aquellos que hacen parte de la categoría marinos (SIRAP & THE NATURE CONSERVANCY COLOMBIA, 2018), que hacen parte de los cuerpos de agua analizados dentro de este documento.

Las políticas gubernamentales colombianas y las estrategias de entidades ambientales nacionales se han quedado cortas en la planificación e identificación de impactos ambientales negativos sobre ecosistemas en la Región Caribe, y esta situación dificulta las futuras estrategias de adaptación cuyo objetivo expuesto en el plan de nacional de adaptación al cambio climático, propone: “incidir en los procesos de planificación ambiental, territorial y sectorial de tal manera que se

tomen decisiones de manera informada, teniendo en cuenta los determinantes y proyecciones climáticos, reduciendo así efectivamente la vulnerabilidad tanto en poblaciones, ecosistemas y sectores productivos y aumentando la capacidad social, económica y ecosistémica para responder ante eventos y desastres climáticos”(DNP et al., 2011). Los esfuerzos nacionales por lograr planes sectoriales, estrategias regionales e investigación alrededor de los impactos del cambio climático y sus consecuencias, puede apoyarse en avances significativos logrados en otros países cuyos territorios están estrechamente conectados con las características ambientales de la región caribe, y cuyo proceso de adaptación puede brindar una guía para generar metodologías y análisis precisos. Tal y como lo señala (RODRIGUEZ, 2013):

Los países del Gran Caribe cuentan con una gran diversidad de ecosistemas terrestres, marinos y marino-costeros. Estos incluyen algunos de los sistemas con mayor biodiversidad del planeta, como son los bosques tropicales, arrecifes coralinos y manglares, entre otros. Todos ellos, además, son de altísima productividad biológica y tienen gran importancia para las economías locales, pero están muy amenazados como resultado de los impactos ambientales resultantes de las decisiones y políticas de desarrollo y ocupación del territorio.

## 6. CUERPOS SUPERFICIALES DE AGUA DULCE EN LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA.

La evidente y enorme necesidad de realizar una identificación y caracterización de las consecuencias ambientales, sociales y económicas que puede tener el cambio climático en el mediano y largo plazo, con el fin de aplicar estrategias de mitigación eficientes; debe partir de la correcta clasificación de los cuerpos de agua dulce superficiales en la región, entendiendo sus diferencias, su importancia y su vulnerabilidad particular, y permitiendo que se comprendan a totalidad los enormes impactos que estos fenómenos climáticos generan sobre dichos ecosistemas. Es por esta razón que, en primer lugar, en este documento se describen las características de los cuerpos de agua dulce superficiales presentes en la Región, y expone las diferencias que hay entre cada uno de ellos.

Entre la clasificación de ecosistemas marinos, costeros y acuáticos continentales, la Región Caribe cuenta con una amplia diversidad de ellos. El documento se desarrollará no sólo alrededor de aquellos cuerpos de agua superficiales con agua netamente dulce, sino también debe incluir de aquellos ecosistemas que, a pesar estar sujetos a enormes procesos relativos al mar, tienen un aporte permanente de aguas dulces, al ser sistemas de tipo abierto.

Para efectos de una mayor comprensión sobre las dinámicas, funcionamiento y características de cada cuerpo de agua dulce superficial; así como una óptima identificación y caracterización de los mismos y sus diversos impactos, se hará una descripción de cada uno a continuación.

### 6.1 ECOSISTEMAS MARINOS Y COSTEROS

Debido a las diversas características de los cuerpos de agua en esta Región, que varían constantemente debido a las condiciones climáticas predominantes, tales como la precipitación o la temperatura, muchos de los ecosistemas descritos a continuación, pueden entrar en la categoría de **humedales**. Estos, según la “Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional, Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas”, son: “extensiones de marisma, pantanos, turberas, cuerpos de agua de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas, corrientes, dulces, salobres y saladas incluyendo las áreas de aguas marinas cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros”(UNESCO, 1994). En otras palabras, los humedales son todos los ecosistemas cuyo componente fundamental es el agua, y que en su alrededor

permite la formación de ambientes que pueden ir desde permanentemente inundados a normalmente secos, incluyendo toda la diversidad que allí habita (C. A. CASTELLANOS, 2001).

Este tipo de ecosistema depende de la influencia de la acción inundante del río que periódicamente desborda sobre los lagos de planos inundables. Los humedales conectados a un río han sido catalogados bajo la denominación de llanuras de inundación y están sujetos a fluctuaciones importantes en los niveles y a cambios pronunciados de sus fases terrestres y acuáticas (sistemas pulsantes). Estos sistemas mantienen una conexión permanente con el río y poseen una zona litoral móvil que se configura como zona de transición acuático terrestre. (Bayley, 1991).

Dentro de la clasificación de estos cuerpos de agua, también deben tenerse en cuenta los ecosistemas marinos y costeros, que por ubicación son altamente vulnerables a las variaciones oceánicas y de los cuerpos de agua dulce, ambos con aportes esenciales para su correcto funcionamiento; así como a impactos antropogénicos que generan enormes disturbios en estas zonas. (URIBE, 2020).

## **6.2 ESTUARIOS Y DELTAS**

En los primeros, se lleva a cabo la disolución del agua del mar a través del agua que drena la superficie terrestre, razón por la cual están altamente influenciados por las mareas. Los deltas, por su parte, son zonas de interacción entre procesos marinos y procesos fluviales, es decir, donde interactúan oleajes, mareas, corrientes, con sedimentos y agua dulce proveniente de la desembocadura de los ríos. En la Región, se encuentran cuatro estuarios propiamente dichos (MARÍN ZAMBRANA, 2000): las desembocaduras del Río Atrato (Golfo de Urabá) con un caudal promedio de 4155 m<sup>3</sup>/s; Río Sinú (Boca de Tinajones), con un caudal promedio de descarga de 407 m<sup>3</sup>/s; el Río Magdalena (Bocas de Ceniza), con un caudal promedio de descarga de 7018 m<sup>3</sup>/s (OJEDA et al., 2001); el Canal del Dique, que, siendo tributario del Río Magdalena, desemboca un caudal promedio de 397 m<sup>3</sup>/s, en las bahías de Barbacoas y Cartagena. (DIAZ, 2007)

## **6.3 MANGLARES**

Es un ecosistema característico de las regiones tropicales y subtropicales de la tierra, que presta enormes servicios ecosistémicos debido a su enorme biodiversidad, su amplia tolerancia a la salinidad, y su capacidad para exportar gran cantidad de materia orgánica; lo que hace de este ecosistema uno estratégico y altamente productivo (producción de materia orgánica en el tiempo), para las

comunidades colindantes (LEMA & POLANÍA, 2006). Este tipo de ecosistema puede clasificarse como boscoso y marino, debido a sus múltiples características, además de cumplir con funciones como: la formación de suelos, sitios de crianza, refugio, anidación, alimentación de diversas especies, enriquecimiento de aguas costeras, protección de la línea costera, sustento de pesquerías, producen oxígeno y asimilan CO<sub>2</sub> (POSADA & NIÑO, 2014). También, cumplen con servicios como: provisión de humedad a la atmósfera (enfriamiento natural), depósito de agua para evitar salinización de tierras de cultivo y filtro biológico para retener concentraciones abundantes de nutrientes, productos químicos y sales (CONAFAR, 2009). Según registros de entidades nacionales y regionales, la Región Caribe cuenta con 88.244 ha de manglar, para el año 2013 (POSADA & NIÑO, 2014).

#### **6.4 LAGUNAS COSTERAS**

Son cuerpos de agua permanente de baja profundidad, y no es posible diferenciar la zona litoral de la profunda (MARÍN, 2000). Están separadas del mar a través de una barrera que impide el oleaje, y pueden unirse al mismo mediante canales. La dirección del agua va en un solo sentido. Reciben constante flujo de sedimentos de ríos, así como agua marina. Son, además, exclusivos de la Región Caribe, con un número cercano a 58, y entre las de mayor importancia ecológica se pueden encontrar: La laguna o Ciénaga Grande de Santa Marta (la más grande del país), la de Tesca; lagunas al noreste de Barranquilla y Galerazamba; así como las ciénagas de Mallorquín, la Playa y Los Muertos. Lagunas costeras entre Riohacha y Manaure, así como en el Golfo de Urabá, Sabanilla y la Laguna del Águila. (OJEDA et al., 2001).

#### **6.5 CIÉNAGAS O LAGOS DE PLANOS INUNDABLES DE ZONAS BAJAS**

Son cuerpos de agua de poca profundidad, con una columna de agua igual o menor a los 10m. Presentan una conexión directa o indirecta con cuerpos de agua lóticos, tales como ríos o arroyos, que puede ser intermitente debido a las constantes fluctuaciones de dichos cuerpos por acción del régimen hidrológico (MONTOYA & AGUIRRE, 2009). Se diferencian de las lagunas, debido a que las ciénagas están ubicadas en planicies o llanuras de inundación, lo que determina su formación a partir de cambios en cuerpos de agua de mayor envergadura a los que están conectadas, además de ser ricas en materia orgánica y lodo.

Estos sistemas en el Caribe, pueden clasificarse en tres tipos de acuerdo a su funcionamiento. Las ribereñas, que son aquellas conectadas hidrodinámicamente a

grandes ríos; en segundo lugar, aquellas conectadas directamente al mar Caribe y en último lugar, los sistemas cerrados interiores, que presentan escasa o nula conectividad con sistemas acuáticos de mayor envergadura (RANGEL, 2012).

## 6.6 LLANURA DE INUNDACIÓN

Puede identificarse como una macro-unidad geomorfológica, que tiene diversos procesos de dinámica fluvial como la erosión, inundación, deposición (IDEAM, 2001). Están surcadas por un cauce principal que domina los procesos fluviales, y numerosos paleocauces que se encuentran total o parcialmente desactivados. En esta área tienen lugar la formación de humedales, ciénagas caños y pantanos, sometidos a regímenes de inundación, y que sirven como zonas de amortiguación de crecidas, sobre los cuales los rompederos o paleocauces generan procesos de sedimentación y colmatación (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2002).

Tabla 2. Número de humedales por departamento

DEPARTAMENTO	BAHÍAS	ESTUARIOS	LAGUNAS
La Guajira	4	-	13
Magdalena	11	1	12
Atlántico	-	1	8
Bolívar	2	-	8
Sucre	1	-	7
Córdoba	1	1	4
Antioquia	7	1	4
Chocó	5	-	2
San Andrés y Providencia	8	-	1

**Fuente:** (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2002)

Se entiende como presa a una barrera física construida sobre un río o arroyo, generando una acumulación de agua conocida como embalse, cerrando parcial o totalmente el cauce del cuerpo de agua intervenido. El embalse, por su parte, puede tener diversas funciones, entre las que se encuentran la producción de energía eléctrica, agua para riego, mejora de condiciones de navegabilidad, control y regulación de caudales, así como la prevención de inundaciones o de sequías (MADERA, 2014).

En el Caribe, por su parte, es posible encontrar un embalse llamado Urrá 1, ubicado en el departamento de Córdoba. La principal fuente de abastecimiento de este embalse es el Río Sinú y sus afluentes (Ríos Manso, Tigre, Verde y Esmeralda). Este embalse fue construido para la operación de la central hidroeléctrica de Urrá I,

y cumple funciones complementarias que van desde la amortiguación de crecientes en época de abundantes precipitaciones, hasta ser el impulso para el desarrollo cultural ambiental y social en inmediaciones al Río Sinú, tal como afirma la empresa Urrá S.A, quién está a cargo del proyecto hidroeléctrico (EMPRESA URRÁ S.A, n.d.).

## **6.7 RÍOS**

La mayoría de los ríos se forman por la excavación del terreno causada por la fuerza de la corriente. El agua lluvia busca las depresiones naturales y labra el terreno en sus áreas más vulnerables, hasta llegar a regiones de baja altura como llanuras. El objetivo de esos sistemas es encausar el agua proveniente de lluvias o deshielo. Los procesos físicos y morfológicos de los ríos están regidos por diversos factores, entre los que se encuentran el clima local, la naturaleza de la vegetación, el uso del suelo en el área que recorre, la intervención del hombre y sus actividades. El material de transporte de estos cuerpos de agua es conocido como sedimento, y su tamaño y volumen son decisivos en la morfología del río. Estos aportes sedimentarios están dados por la geología del terreno y la cobertura del suelo, pues ellos son los encargados de determinar el tipo de material arrastrado por las corrientes (IDEAM, 2013). (Ver **ANEXO C**. Zonificación hidrográfica de Colombia (área Caribe a) y área Magdalena-Cauca b)).

## **7. CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONES DE CUERPOS DE AGUA DULCE SUPERFICIALES DE LA REGIÓN CARIBE**

Cada uno de los ecosistemas anteriormente descritos, cumplen una serie de funciones que los hacen trascendentales para el desarrollo social y económico de la región, para el sustento de sus pobladores, y para el cuidado de la abundante biodiversidad característica de esta zona del país. Sus características hacen que estos ecosistemas acuáticos sean zonas esenciales para los habitantes del país, pues, por su estructura y productividad, mantienen condiciones ambientales esenciales para el desarrollo nacional.

Los ecosistemas acuáticos son sistemas abiertos, debido a que intercambian masa y energía con el medio en el que se encuentran. Este intercambio y las condiciones de su entorno, garantizan el correcto funcionamiento de los mismos. Cuenta con variables de tipo interno (tales como la presencia de fitoplancton, nutrientes almacenados, poblaciones de organismos acuáticos); así como variables externas, que dependen del medio (tales como flujos de agua correspondientes a afluentes o efluentes, temperatura, elevación sobre el nivel del mar, aporte de nutrientes y sustancias contaminantes, precipitación, viento, temperatura de agua y del aire, radiación solar, y usos antropogénicos) (JORGENSEN & VOLLENWEIDER, n.d.).

Estos ecosistemas tienen funciones estrechamente ligadas con las velocidades de cambio de los nutrientes o de los ciclos biogeoquímicos más relevantes. Estos procesos dependen de factores como morfometría, geología, mineralogía, las cargas provenientes de las cuencas de drenaje que los alimentan, los vertimientos puntuales o difusos, la biomasa total, la actividad metabólica, la diversidad de poblaciones de organismos acuáticos que allí habitan, así como por las relaciones biológicas entre estas, que controlan la ausencia o presencia de especies. Los nutrientes capaces de limitar la productividad de estos ecosistemas, son el nitrógeno y el fósforo (OJEDA et al., 2001). La Región Caribe cuenta con el 82% de las ciénagas del país, y todos estos cuerpos de agua cumplen funciones tales como el control de inundaciones, el estancamiento de grandes volúmenes de agua, la regulación de los caudales de los ríos, la retención de sedimentos y actividades de decantación y purificación de agua proveniente de las cuencas o vertimientos humanos (AGUILERA, 2011b), protección contra tormentas, control de la erosión, control de nitritos, favorecen la generación de vida silvestre, abastecimientos de agua y fuentes de energía, protegen las costas de forma natural y son un medio vital para el almacenamiento de carbono (MADS, 2016).

Los cuerpos superficiales de agua dulce de la Región Caribe comparten características que garantizan su correcto funcionamiento y su adaptabilidad a factores ambientales específicos de la zona donde se encuentran.

Los humedales del Río Sinú presentan una temperatura media de 28°C, que se ajusta a un clima trópico húmedo (IDEAM, 1998). Para el caso del complejo cenagoso del río Atrato, que comparte características de la Región Pacífica y Caribe, los estudios han demostrado que el clima de este sistema, una vez alcanza las llanuras del Caribe para desembocar en el mar, se ajusta a uno de características cálidas y húmedas. Además de evidenciar que la temperatura del complejo indica aguas cálidas entre los 27 y 29°C, con una permanencia que favorece el desarrollo de la biota acuática (Instituto de investigaciones ambientales del pacífico & MADS, 2018). El Complejo de humedales de la depresión Momposina alberga una enorme cantidad de estos ecosistemas y otros cuerpos de agua dulce, destacándose La Mojana, como una subregión con amplio recurso hídrico y que hace parte de la gran región del bajo Magdalena, donde también se conectan ríos como el Cesar, el Cauca y el San Jorge. En esta subregión, la temperatura de las zonas limnética y litoral de los humedales, se encuentra entre los 30°C y 32°C, lo que indica que su clima es tropical cálido y húmedo (LINARES et al., 2018). El complejo lagunar-estuarino del delta del Río Magdalena y el bajo Magdalena, están representados en su mayoría por la ciénaga Grande de Santa Marta, las ciénagas El Chino y Sevillano, el sistema lagunar de Pajarales y la Isla de Salamanca; convirtiéndose en el sistema delta-lagunar más grande del Caribe y de mayor productividad. La temperatura de sus aguas puede variar entre los 28°C y 30°C, lo que se ajusta a las condiciones climáticas cálidas del lugar donde se encuentra (ALVARADO et al., 2005). La característica común de todos los cuerpos superficiales de agua dulce de la Región Caribe, además de sus condiciones climáticas e hidrológicas ya descritas, radica en el enorme grado de cambio y transformación que están experimentando los ecosistemas, los cuales han favorecido su pérdida y degradación acelerada, posicionándolos en alto riesgo frente a los impactos del cambio climático en el mediano y largo plazo (ALVARADO et al., 2005). Por su parte, la temperatura del Canal del Dique se ajusta al clima de la zona, presentando temperaturas de 31 °C, según estudios de calidad de agua realizados en la zona (BRIEVA & RAMIREZ, 2020). La temperatura es un factor que permite el tratamiento de información generalizada sobre estos cuerpos de agua, así como la identificación de impactos del cambio climático y sus consecuencias en todos ellos. Estos cuerpos superficiales de agua dulce, están sometidos a un régimen de precipitación bimodal que comparten tanto la Región Caribe como la Región Andina, lo que desencadena que las épocas de inundaciones o sequía sean

experimentadas de manera general y más marcada, teniendo afectaciones similares en términos de épocas, sobre todos estos ecosistemas.(ARANGO et al., 2015).

Otra condición que comparten estos cuerpos de agua, es el tipo de suelos sobre el que se encuentran riveras de ríos, ciénagas y humedales. Estos son de tipo superficial, se ven afectados por inundaciones y encharcamientos prolongados, que en condiciones de mal drenaje limitan fuertemente las posibilidades agropecuarias (ROCA & PÉREZ, 2006).

El tipo de cuerpos de agua dulce superficiales que se pretenden estudiar en este documento, corresponden a aquellos que recorren la región Caribe, incluyendo los ríos que, aunque nacen en zonas montañosas, alimentan la llanura Caribe formando sistemas de humedales complejos, hasta desembocar en el mar. De acuerdo a sus grados de altitud, estos ecosistemas pueden clasificarse en:

- Ecosistemas acuáticos de montaña: con alturas mayores a 1000 metros, entre los que se pueden clasificar los Ríos Magdalena y Cauca, que, aunque nacen en la Región Andina, su recorrido por la Región Caribe los hace indispensables en la presencia de sistemas lénticos de menor envergadura, así como en el desarrollo y la productividad de la Región. En esta categoría también se deben nombrar los Ríos que nacen en zonas montañosas dentro del Caribe, como el Río César y el Río Ranchería, que nacen en la Sierra Nevada de Santa Marta. (OJEDA et al., 2001)
- Ecosistemas acuáticos basales: Con estos, se hace referencia a aquellos que tienen alturas por debajo de los 1000m. Estos se encuentran en los planos de inundación de los ríos, y su presencia depende del aporte de los cuerpos de agua lóticos anteriormente nombrados. En esta categoría entran todos los sistemas de humedales, ciénagas, caños, llanuras inundables y manglares ubicados en la Región Caribe, tales como los humedales de la Depresión Momposina, La Ciénaga grande de Santa Marta, los pertenecientes a los Ríos Atrato, Sinú, el Magdalena o el Cauca. (OJEDA et al., 2001)

## 8. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA

La región Caribe presenta precipitaciones entre los meses de mayo y noviembre, lo que coincide con la temporada de ondas del este y ciclones tropicales; siendo octubre y noviembre los meses con mayor volumen de precipitación. Los regímenes de precipitación marcan las épocas secas y lluviosas, que definen el tiempo de ocurrencia entre estos procesos junto a factores como latitud, distancia al mar y orografía (GUZMÁN et al., 2014).

El aumento de las temperaturas tiene una relación estrecha con la variabilidad en la precipitación. Este último factor climático ha sido especialmente estudiado debido a su enorme repercusión ambiental, social y económica. La modificación de caudales, a afectar a gran escala todos los usuarios del agua, específicamente aquellos que desempeñan actividades de agricultura, pues están sujetos a regímenes estacionales para lograr cosechar sus productos. Las intensas sequías e inundaciones generarán mayor vulnerabilidad sobre las poblaciones que ocupan territorios de alto riesgo y con condiciones climáticas adversas; además de generar problemas de salud pública por enfermedades transmitidas por agua, afectación de ecosistemas estratégicos y su consecuente impacto sobre el suministro de agua para consumo humano (SADOFF & MULLER, 2010).

Las instituciones nacionales, haciendo uso de información proporcionada por entidades a nivel mundial expertas en cambio climático, han generado documentos que describen al detalle las modificaciones que este fenómeno tendrá sobre valores de precipitación y temperatura a nivel regional y departamental, ofreciendo escenarios basados en modelos matemáticos, en diversos periodos de tiempo. Las proyecciones departamentales fueron divididas por intervalos de tiempo, desde el año 2011 hasta fin de siglo en el año 2100. Esto permite tener mayor veracidad en los datos y generar estrategias de mitigación particulares con predicciones en el corto, mediano y largo plazo. Los datos fueron obtenidos del informe de nuevos escenarios de cambio climático para Colombia (IDEAM et al., 2015), y organizados en una tabla para su mayor comprensión. (Ver **ANEXO D**. Escenarios de cambio climático en la Región Caribe Colombiana (precipitación y temperatura)).

## **9. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES EN LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA.**

Han sido varios los estudios enfocados en identificar los impactos del cambio climático en cuerpos de agua superficial en el mundo. Haciendo uso de diferentes metodologías, múltiples investigadores han logrado evidenciar las enormes afectaciones que ha tenido el cambio climático sobre los ecosistemas superficiales de agua dulce, así como en sus características y su calidad. La funcionalidad de estos ecosistemas, su compleja estructura, los enormes recursos y servicios ambientales que otorga, además de su inmensa biodiversidad; evidencian el alto valor de estos y su vulnerabilidad; lo que debe traducirse en la necesidad inmediata de protegerlos de impactos de origen humano y natural.

En la Región Caribe, la alta vulnerabilidad de estos ecosistemas preocupa a las entidades tanto locales como nacionales, debido a los enormes impactos que fenómenos climáticos extremos pueden generar, no sólo sobre los cuerpos de agua superficial, sino también sobre las dinámicas de desarrollo poblacional, características socio económicas y precarización de las condiciones de vida de comunidades en pobreza.

Los ecosistemas acuáticos superficiales, son altamente vulnerables a cambio climático no sólo por sus especiales características y funcionalidad, sino por los excesivos usos que se les ha dado por parte de la población, lo que ha modificado los procesos que allí tienen lugar, además de aumentar problemas de contaminación que repercuten sobre todos los organismos que dependen de los recursos que este ecosistema proporciona. Por lo tanto, identificar los impactos generados por cambio climático y aquellos de origen antropogénico, permite trazar una hoja de ruta particular que logre, en el corto plazo, establecer estrategias de protección y mitigación eficientes.

Su vulnerabilidad tiene que ver con las funciones que cumplen. Los manglares, ecosistemas cuya vegetación facilita la retención de nutrientes y la protección de especies de fauna; también pueden cumplir una función de trampa de contaminantes, alcanzando niveles peligrosos para los organismos que allí habitan. El aumento de la turbulencia, por diversos orígenes, permite la reincorporación de contaminantes al agua (NAVARRETE & RODRIGUEZ, 2014)

El avance de la frontera agrícola, así como la construcción de estructuras cercanas a los cuerpos de agua, ha generado una destrucción de especies de macrófitas, lo que no sólo afecta la enorme productividad de estos ecosistemas, sino que pone en

riesgo fuentes de alimentación, biomasa pesquera, integridad del hábitat, y genera riesgos enormes al cambio climático tanto para el sistema natural, como para la población que lo rodea, haciendo más fuertes las consecuencias de tormentas (URIBE, 2015). Por su parte, los organismos de flora y fauna que allí habitan, están condicionados a características o parámetros del cuerpo de agua para garantizar su supervivencia y reproducción, por tanto, cualquier cambio abrupto en las características de calidad de agua, sin importar su origen, afectan drásticamente las dinámicas y procesos naturales de estos seres (YAÑEZ & DAY, 2006).

Los ambientes sedimentarios en estos cuerpos de agua, permiten la estabilización de las condiciones requeridas para el equilibrio del ecosistema, siendo también esenciales en el intercambio de nutrientes entre cuerpos de agua interconectados, y garantizando los procesos hidrológicos naturales tales como el crecimiento de humedales, control de la turbidez en la columna de agua y hábitat para organismos de diversa índole. Por tanto, eventos climáticos severos pueden generar enormes problemáticas y perjudicar sus funciones. Sus bajos niveles de profundidad y sus condiciones estacionales, los hacen pasar por procesos naturales de eutrofización, por lo tanto, cualquier proceso que genera una carga de contaminación orgánica alta, incrementará este problema afectando los procesos químicos, físicos y biológicos que tienen lugar en el agua. Además de lo anterior, estos ecosistemas están a muy poca altura del nivel del mar, lo que puede generar intrusión salina en exceso, además de invadir parte de sus territorios con agua en estas condiciones (YAÑEZ et al., 2006).

Cualquiera de los procesos anteriormente nombrados, van a verse afectados a raíz del fenómeno de cambio climático, por lo cual es necesario realizar un análisis a partir de estudios con el fin de determinar de qué manera se verán reflejados estos cambios, y qué impactos pueden generar sobre los cuerpos de agua del Caribe.

## **9.1 AUMENTO DE TEMPERATURAS**

Una de las consecuencias más impactantes del cambio climático, serán los aumentos generalizados de temperatura alrededor del mundo. Para el caso de la Región Caribe, las temperaturas tendrán un comportamiento ascendente en todos sus departamentos (Ver: **ANEXO D**. Escenarios de cambio climático en la Región Caribe Colombiana (precipitación y temperatura)); afectando las condiciones y procesos naturales de los cuerpos de agua dulce superficiales.

La temperatura en cuerpos de agua dulce superficial como lagos y arroyos, está estrechamente ligada a la temperatura del aire, que, al aumentar, puede generar un

alto riesgo de anoxia en la columna de agua. Los cambios o variaciones en parámetros como nubosidad, radiación, viento y humedad, también puede generar impactos en sus procesos naturales (Mohseni et al., 1999). En el caso de ríos, se ha demostrado que la temperatura tiene una incidencia sobre el aumento de la demanda biológica de oxígeno, así como el incremento de sólidos en suspensión (WEBB & NOBILIS, 2007)

Un escenario de cambio climático para la Región Caribe, muestra un incremento en la temperatura, lo que, sin duda, afectará los perfiles de temperatura, la estabilidad térmica y los patrones de mezcla de los ecosistemas acuáticos (generando gradientes de temperatura que ralentizan este proceso), además de dificultar la distribución vertical del oxígeno y de los nutrientes (Nickus et al., 2010).

Varios experimentos han permitido modelar las condiciones de cambio climático en ecosistemas lénticos tales como lagos. El comportamiento del viento está estrechamente conectado con el aporte de energía de mezcla a la columna de agua, por lo tanto, un aumento de su velocidad media generará una mezcla uniforme. Los experimentos simularon este aporte de energía de mezcla en época seca con altas temperaturas, permitiendo obtener un aumento de temperatura en la columna de agua de 2,6°C, un escenario esperado tras los efectos del cambio climático. Los resultados arrojaron profundización de la termoclina de hasta 2m. Este cambio en los perfiles de temperatura, generó también una modificación en la estratificación del oxígeno al aumentarse de 1m de profundidad en condiciones iniciales, hasta 3,5m bajo el escenario climático simulado (Nickus et al., 2010). Otros estudios realizados para el mismo sistema acuático bajo estas condiciones de simulación, arrojan que el porcentaje de saturación de oxígeno una vez se realiza su estratificación, aumentó del 20% al 60%. Lo que arroja que los cambios relacionados con el oxígeno en la columna de agua pueden ser más relevantes en ciertos procesos, que incluso los cambios de temperatura generados por el cambio climático en ecosistemas superficiales de agua dulce. Un ejemplo es la relevancia de la saturación de oxígeno sobre los sedimentos epilimnéticos que se encuentran en la parte más superficial, pues sirven como sumidero de metilmercurio. Las concentraciones de oxígeno ideales para mantener esos sedimentos, tienen una gran relevancia sobre la disminución de metilmercurio en los peces que los usan como sustrato (Forsius et al., 2010)

La temperatura de los cuerpos de agua superficial que se alimentan de caudales provenientes de lugares montañosos, como es el caso de la Sierra Nevada de Santa Marta en la Región Caribe, está influenciada tanto por la temperatura del aire, como por la temperatura de los sistemas hidrológicos que generan un aporte

significativo de caudal, como aguas subterráneas, escorrentía superficial o deshielo. Este último, se ha acentuado en los últimos años considerablemente, pasando de tener 82,6 Km<sup>2</sup> de área glaciaria en el año 1850, a sólo 6,21 Km<sup>2</sup> en el año 2019, según información de (IDEAM, 2014). El aumento en la temperatura en cuerpos de agua, depende también de actividades antropogénicas que pueden eliminar la vegetación circundante, lo que reduce la sombra que esta podía ejercer sobre la superficie del agua y la hace más vulnerable a cambios bruscos de temperatura (Patra et al., 2015).

## **9.2 SEDIMENTOS**

El incremento de sedimentos en los cuerpos de agua superficiales, se traduce en un mayor aporte de carga orgánica que debe asimilar el sistema hídrico, pero que también conlleva una serie de consecuencias una vez esa carga supere la capacidad del sistema. Sin embargo, los sedimentos son fundamentales en la composición de ambientes acuáticos, pues estabilizan los cuerpos de agua y los sistemas ribereños. Cambios en sus tasas de transporte pueden transformar ecosistemas costeros, así como disminuir poblaciones de peces (Wang et al., 2010).

Si bien estos procesos pueden estar fuertemente influenciados por eventos climáticos naturales, estudios han demostrado que las actividades antropogénicas tienen un alto porcentaje en estas problemáticas. El aumento en la tasa y transporte de sedimentos, está directamente conectado a problemas de erosión en cuerpos de agua. Este es el caso de Río Magdalena, para el que se realizaron estudios que pretenden analizar el acelerado aumento de la erosión en esta cuenca, además de encontrar las causas por las cuales se presenta esta problemática. La erosión tiene causas tanto naturales como antropogénicas, que depende de escorrentía, precipitación y velocidad del viento y que, además, se definen por las tasas de denudación del suelo, que para el caso del Río Magdalena, sobrepasan el doble del promedio de la cuenca. Esta característica del suelo, puede verse incrementada por procesos antropogénicos tales como deforestación, agricultura, ganadería, minería y urbanización. El conjunto de todos estos procesos muestra un preocupante panorama donde la erosión crece sin control, y las tasas de seguimiento, al seguir el mismo patrón, amenazan la disponibilidad de agua en el Caribe (RESTREPO, 2005).

Los sedimentos sufren unos procesos físicos y químicos en cuerpos de agua, como lo son la mineralización, la amonificación, nitrificación y desnitrificación. La re-suspensión de los mismos, es decir, la reincorporación del sedimento del fondo al

cuerpo de agua, tiene un papel esencial en las tasas de mineralización (Wainright & Hopkinson, 1997). Este proceso libera enormes cantidades de carbono orgánico disuelto, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>, estos últimos, responsables del aumento del calentamiento global. Además, los estudios muestran el desplazamiento de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno ubicados en la profundidad de la columna de agua, hacia zonas más cercanas a la superficie, potenciando problemas de eutrofización (Xingcheng et al., 2018).

Esta re-suspensión de sedimentos puede alterar considerablemente la demanda de oxígeno, pues una presencia de sedimentos en toda la columna de agua, aumenta la respiración general de los organismos acuáticos presentes en el ecosistema, reduciendo los niveles de oxígeno disuelto (Wainright & Hopkinson, 1997); una situación que podría empeorar situaciones de hipoxia o eutrofización ya existentes.

### **9.3 TOXICIDAD DE CONTAMINANTES PRESENTES EN AGUA.**

Se espera que el aumento de temperatura en cuerpos superficiales de agua dulce, tenga un impacto sobre las concentraciones de contaminantes que son tóxicos para organismos acuáticos. Estas sustancias llegan a cuerpos de agua superficiales a través de vertimientos directos o indirectos generados por actividades antropogénicas en zonas cercanas. Son altamente tóxicas para organismos acuáticos, y su toxicidad puede incrementarse debido a variaciones en parámetros a raíz del cambio climático. Así lo muestra un estudio que evalúa la toxicidad del endosulfán, clorpirifos y fenol en varias especies de peces (dos de aguas cálidas). Los resultados arrojan aumentos en la toxicidad de los tres contaminantes a temperaturas de entre 30 °C y 35°C. También se relaciona la exposición de organismos acuáticos a contaminantes, con la reducción de su tolerancia térmica (Patra et al., 2015).

Esta toxicidad también puede estar ligada a la presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos en el agua, como es el caso de compuestos nitrogenados tales como el amoníaco, nitrito y nitrato, los cuales son formas iónicas de nitrógeno en diferentes momentos de su ciclo bioquímico. Su presencia está asociada a acidificación de cuerpos de agua por deposición de ácidos sobre su superficie, que es capaz de incrementar concentraciones de H<sup>+</sup>, lo que altera las condiciones de pH en el sistema acuático. Esta problemática puede generar drásticas disminuciones en especies de invertebrados y peces, así como alterar procesos microbianos importantes en el uso de nutrientes como sustrato; lo que afecta procesos biogeoquímicos y altera la toxicidad. El proceso de nitrificación puede verse

reducido, mientras que el de desnitrificación puede estar en aumento. Esto se traduce en una mayor cantidad de ion amonio o amoniaco, altamente tóxico para peces. Los organismos de agua dulce son más vulnerables a las concentraciones de nitrato, que los marinos (CAMARGO & ALONSO, 2007).

También se asocian con incrementos en procesos de eutrofización, al promover el desarrollo de productores primarios. Al descomponerse, disminuyen drásticamente las concentraciones de oxígeno disuelto, generando graves episodios de muerte masiva de organismos acuáticos (CAMARGO & ALONSO, 2007).

El cambio climático va a generar grandes emisiones de nitrógeno al ambiente, que, de no reducirse, tendrán graves efectos sobre los cuerpos de agua a nivel mundial.

#### **9.4 OXÍGENO DISUELTO**

Se ha evidenciado la manera como el cambio climático es capaz de afectar los procesos físicos que regulan las concentraciones de oxígeno disuelto en cuerpos de agua alrededor del mundo; así como incidir en procesos biogeoquímicos que requieren concentraciones de oxígeno tanto en la columna de agua como en sus sedimentos. En aguas estuarinas o costeras, con gran aporte de agua de mar, se han evaluado los cambios en procesos físicos y químicos en escenarios ambientales adversos, producto del cambio climático en el mediano plazo. Para esto, se deben tener en cuenta diversos parámetros que, al variar significativamente, disminuyen el oxígeno disuelto generando zonas de hipoxia y poniendo en riesgo la productividad de los ecosistemas. El aumento de la temperatura, el aumento del nivel del mar, la variabilidad en la velocidad del viento, el comportamiento y concentración de los sedimentos, la variación en los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno fósforo y azufre; además de la estacionalidad o periodos de sequía y lluvias en la región; impactan el comportamiento de las concentraciones de oxígeno en la columna de agua costera.

El aumento del nivel del mar incrementa la salinidad en toda la columna de agua en épocas de sequía, haciendo que el agua salobre se desplace hacia el interior del mar; mientras que el agua salina se concentra en el fondo, penetrando más en el estuario y generando estratificación. Esta última no sólo suprime la mezcla turbulenta, sino que afecta el suministro de O<sub>2</sub> disuelto en toda la columna de agua, incrementando los niveles de hipoxia en las zonas bajas (Ni et al., 2019). Además de esto, los problemas de hipoxia en los cuerpos de agua de las zonas costeras, está asociado a la eutrofización, la estratificación, y el afloramiento oceánico (J. Zhang et al., 2010). Las condiciones anóxicas en cuerpos de agua con poca

profundidad como lagos de planos inundables o ciénagas, que son abundantes en la Región Caribe; puede retornar a la atmósfera parte del CO<sub>2</sub> fijado, en forma de metano (CH<sub>4</sub>), un gas capaz de contribuir al efecto invernadero de 20 a 30 veces más que el CO<sub>2</sub>. Es importante resaltar que, condiciones adversas que transformen ecosistemas terrestres fijadores de carbono, pueden impactar también a los cuerpos de agua dulce superficiales. Estas afectaciones pueden arrastrar buena parte del carbono fijado a cuerpos de agua, generando una presión mayor sobre los mismos (PALAU et al., 2020).

El escenario de aumento del nivel del mar también demuestra tener relación con escenarios de ausencia de oxígeno; pues al aumentar el volumen de las aguas costeras por intrusión marina; el agua en condiciones hipóxicas es capaz de ocupar el nuevo espacio generado, incrementando el problema de bajos niveles de oxígeno en la columna (Ni et al., 2019). Para la región Caribe, a pesar de la falta de datos meteorológicos precisos que dificultan la medición, se esperaba un aumento del nivel del mar en la costa Caribe colombiana, de 3,58 mm/año (calculado para los años de 1952 a 1997) para el año 2006 (TORRES et al., 2006), lo que evidencia un serio impacto del cambio climático sobre cuerpos de agua costeros en la Región.

Los escenarios no son alentadores, pues el aumento de las temperaturas, generará una disminución en el oxígeno disuelto de arroyos y cuerpos de agua superficial que incluso, estaría por debajo del límite inferior para mantener la vida acuática (Ficklin et al., 2013). Los escenarios para la Región Caribe evidencian aumentos de temperatura en todos sus departamentos. La contribución humana juega un papel definitivo, pues aquellos cuerpos de agua con mejor manejo y protección, que además presenten bajos niveles de materia orgánica, tendrán menores caídas en la concentración de oxígeno disuelto; caso contrario ocurrirá con aquellos que tengan enormes concentraciones de materia orgánica, que podrán experimentar disminuciones de hasta el 90% en sus valores de oxígeno disuelto (Sullivan et al., 2010). Sin embargo, y como se explicará más adelante, los ecosistemas acuáticos en la Región sufren, entre otras cosas, de un aumento desmedido en las cargas de materia orgánica, producto de actividades humanas sin regulación.

## **9.5 VIENTO**

La circulación de los vientos en zonas costeras, puede verse afectada por cambios abruptos en la temperatura. Estos cambios en su intensidad pueden provocar modificaciones en las corrientes costeras, y, por ende, en cuerpos de agua dulce superficiales interiores, modificando el comportamiento del oxígeno disuelto. Este

factor, por sí sólo, puede crear difíciles situaciones de hipoxia en cuerpos de agua que presenten bajas concentraciones de oxígeno disuelto por causas naturales o antropogénicas (Chan et al., 2008).

La marea en zonas costeras depende de factores meteorológicos, uno de ellos tiene que ver con la acción del viento sobre el mar, que para el caso de la Región Caribe tiene una fluctuación de aproximadamente 20 cm. La energía del oleaje está directamente relacionada con la velocidad del viento, que se incrementa en la época seca y genera un aumento en el oleaje, provocando problemas de erosión sobre la costa, así como procesos de transformación (LIZARAZO & LOPEZ, 2007).

Los vientos alisios tienen una gran responsabilidad sobre las concentraciones de sólidos suspendidos en aguas superficiales en el Caribe, pues suelen presentarse en época seca (entre los meses de diciembre y abril), generando procesos de resuspensión de sólidos suspendidos y materia orgánica al incrementar el oleaje y las mareas (CIOH, 2018). Así lo evidencian estudios que muestran la carga de sólidos suspendidos en cuerpos de agua superficiales en varios municipios de la Región (INVEMAR et al., 2018).

## **9.6 AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR**

Los cambios en la precipitación afectan tanto el nivel del mar, como el nivel de los cuerpos superficiales de agua dulce, los cuales alimentan los estuarios. Estos últimos se caracterizan por parámetros como su salinidad fluctuante. Las disminuciones en la salinidad muestran una influencia sobre la vegetación en estos ecosistemas. Por ejemplo, para el caso de la Ciénaga Grande de Santa Marta, esta disminución ha potenciado una regeneración natural, así como el desarrollo de la cobertura vegetal de los manglares. Los estudios realizados por INVEMAR (2000) a comienzos de siglo, evidenciaban que la baja salinidad había generado la reproducción masiva de árboles adultos, además de especies de manglar dominantes con características especiales, como altas tasas de crecimiento y mayor tolerancia a la inundación (MARÍN ZAMBRANA, 2000).

Los aumentos en el nivel del mar (1 metro), traen consigo un aumento en las concentraciones de salinidad de estuarios, que se pueden ver intensificados con valores bajos de caudal. El estudio de Ross, et al. (2015); evidencia que para ese valor de aumento en el nivel del mar, las mayores concentraciones de salinidad se dan en la parte media del estuario, con cambios pequeños en este parámetro aguas arriba. Este estudio también permite observar cambios en la salinidad para situaciones de incremento y disminución de caudal, con un valor constante en el

nivel del mar. Se espera que la disminución del caudal del estuario (hasta en un 35%), genere un aumento en los valores de salinidad de 0 a 5,5; mientras que el incremento del caudal (hasta en un 35%), disminuirá a 3,7 el valor de salinidad. Esto permite concluir que sólo un aumento extremo en el caudal del estuario, dado por altas precipitaciones en la región, puede compensar el cambio de salinidad que va a producir el aumento del nivel del mar (Ross et al., 2015).

Modelos unidimensionales que buscan modelar las variaciones de salinidad en estuarios, no han tenido en cuenta los cambios en la salinidad con respecto a la profundidad de la columna de agua. Se asume que para aquellos estuarios que generalmente se encuentran bien mezclados, la estratificación de salinidad no es relevante (Savenije, 1993). Estudios realizados para otros estuarios, reafirman la hipótesis de que la salinidad aumentará en los mismos, en la medida que el nivel del mar aumente. (Hilton et al., 2008) encontraron un aumento de 0,5 de la salinidad media en la bahía de Chesapeake, a medida que el nivel del mar aumenta 0,2m.

Los aumentos en el nivel del mar también son causantes de alteraciones en parámetros físicos tales como tiempos de residencia, intercambios verticales y escalas de transporte dentro del cuerpo de agua costero. Estuarios con grandes tiempos de residencia, es decir, donde un porcentaje muy bajo de los nutrientes que ingresan ahí, son transportados fuera de este durante el año; son capaces de sufrir cambios en este parámetro al prolongarse por varios días producto del aumento en el nivel del mar. Este fenómeno se puede presentar con más severidad en la zona media del cuerpo de agua, que generalmente es donde más existen problemas de hipoxia debido a la dificultad para que el agua de esta parte específica se renueve. (Hong & Shen, 2012).

Un incremento en el nivel del mar trae como consecuencia un aumento en la fuerza de las mareas, que puede potenciar el intercambio vertical en la columna de agua, es decir, disminuye la estratificación pues genera condiciones de mezcla. Sin embargo, ese aumento también incrementa la cantidad de agua de mar que ingresa en la capa inferior del estuario, que al ser mayor, tiene más dificultades para su renovación. Además, este volumen de agua presenta variaciones en su densidad con respecto al resto de la columna, lo que hace que se encuentre por debajo de la pycnoclina, sometándose a la fuerza que esta ejerce y ralentizando aún más los procesos de transporte tanto verticales como de circulación lateral, esenciales para la renovación del agua de fondo. El intercambio vertical es el encargado del suministro de oxígeno disuelto por la columna de agua, es decir, que si dicho proceso sufre reducciones, también la sufrirá el suministro de oxígeno desde la superficie hasta el fondo, incrementando situaciones de hipoxia en la zona media

donde hay mayor profundidad, y aguas arriba del cuerpo de agua (Hong & Shen, 2012), en zonas donde hay alta carga orgánica y de nutrientes debido a la desembocadura de ríos o arroyos, o a vertimientos residuales.

A pesar de los efectos anteriormente descritos, (Du et al., 2018) concluyeron que los efectos del aumento del nivel del mar deben ser particularmente investigados y analizados para cada estuario en las regiones, pues dependen en mayor medida de factores como la longitud, la forma de sección transversal y el grado de convergencia del canal; características topográficas e hidrodinámicas que no pueden generalizarse al momento de implementar planes de adaptación al cambio climático.

## **9.7 ESTRATIFICACIÓN**

Se ha demostrado que el incremento en la temperatura, intensifica la estratificación vertical en cuerpos de agua dulce superficiales. Sumado a esto, el nivel del mar también puede reforzar problemas de estratificación en estos ecosistemas, aunque no en la misma proporción ni en la misma época. Por ejemplo, (Hong et al., 2020), realizan un estudio para determinar, entre otras cosas, la estratificación en la zona del delta del Río de las Perlas (China). Dichos resultados muestran un aumento en la estratificación en la zona de la bahía en temporada húmeda; mientras que al evaluarla en los afluentes aguas arriba, se encontraron variaciones que incrementaron este parámetro en periodos de transición climática. Esto es evidencia de que los cuerpos de agua costeros presentan consecuencias distintas en la estratificación, dependiendo de las condiciones hidrodinámicas en cada uno de ellos, así como de las características climáticas de la región donde estén ubicados.

La estratificación en estuarios, por ejemplo, está regulada por la salinidad (Ross et al., 2015). Las fuertes precipitaciones y el aporte de agua dulce a raíz de la escorrentía que transporta ríos, humedales o ciénagas conectadas a los estuarios, producen fuertes estratificaciones en las capas más cercanas a la superficie, controladas por la salinidad; lo que impide la mezcla vertical en la columna de agua. Esta situación genera un ambiente inactivo, lo que condiciona procesos de suministro de nutrientes desde la superficie hasta la zona más profunda y disminuye la productividad del sistema (Prasanna Kumar et al., 2002). La presencia y ausencia de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo en diferentes zonas marcadas por los estratos y la densidad, limita tanto el crecimiento de fitoplancton, como la variabilidad en los tamaños del mismo (Sarma et al., 2016).

## 9.8 AFECTACIONES BIOLÓGICAS

Los incrementos de temperatura afectan los procesos naturales de los organismos que habitan los ecosistemas acuáticos, dificultando sus mecanismos de adaptación a condiciones adversas de su entorno. Se han documentado aumentos de la demanda metabólica de oxígeno en peces y cangrejos, teniendo en cuenta el coeficiente de temperatura ( $Q_{10}$ ), que permite evaluar los cambios en la tasa metabólica de organismo en reposo con  $10^{\circ}\text{C}$  de aumento en la temperatura de su entorno natural (Halsey et al., 2015); mostrando un aumento exponencial de su metabolismo con el incremento de temperatura, lo que conduce a una menor disponibilidad de oxígeno y a una mayor demanda; un conjunto de procesos que pueden generar estrés y mortalidad, así como efectos irreversibles en el ecosistema (Altieri & Gedan, 2015). Este fenómeno podría agravarse con procesos naturales de productores primarios como macroalgas, que, mientras en el día son encargados de la producción de oxígeno en la columna de agua, en ausencia de luz solar se convierten en consumidores, crenado espacios de agua hipóxica, disminuyendo aún más la concentraciones de oxígeno disuelto (RAFFAELLI et al., 1998). Los cuerpos de agua ubicados en territorios con ambientes cálidos y con altas temperaturas, pueden ser más vulnerables a estos efectos y sufrir con mayor rapidez de estas problemáticas, como es el caso de los ecosistemas acuáticos en la Región Caribe.

Los procesos metabólicos microbianos tales como la descomposición, el consumo de oxígeno o el ciclo de nutrientes también se verán afectados por la temperatura, contribuyendo a la formación de zonas muertas. Las variaciones de temperatura pueden afectar de manera diferente a los microorganismos, evidenciando una mayor vulnerabilidad por parte de microorganismos heterótrofos que por parte de productores primarios (Lopez-Urrutia et al., 2006), aunque también se puede esperar que estas transformaciones en los procesos metabólicos de nutrientes de microorganismos, tengan un efecto positivo sobre la productividad de primaria, eliminando la limitación de nutrientes para dichos procesos. La liberación de nutrientes en procesos microbianos va a depender de la cantidad de sustratos, y la sensibilidad a la temperatura de procesos como nitrificación o desnitrificación (Matsui et al., 2013), por lo tanto, son las condiciones del sistema acuático, así como su nivel de eutrofización y la calidad de sus parámetros, lo que define que su vulnerabilidad a estos procesos.

La tolerancia a la desecación y a la inundación es determinante en la distribución de muchos organismos acuáticos. Los organismos bentónicos y algunos peces son

capaces de adaptarse a eventos de fluctuación en los niveles de agua, siempre y cuando sean predecibles; por lo tanto, un escenario de cambio climático con variaciones difíciles de estimar, hace a estos organismos especialmente vulnerables a estas condiciones. Estudios afirman que los invertebrados acuáticos son capaces de hacer coincidir la aparición de los adultos de su especie, con el inicio de la época seca. Soportan la sequía en forma de larva, y permanecen fisiológicamente inactivos o excavando en el sedimento para conseguir gradientes de humedad óptimos para su sobrevivencia (Leslie et al., 1997). Una serie de interacciones producto de las fluctuaciones en los regímenes de precipitación que pueden modificar los entornos estables, la superficie de sustrato desnudo expuesto en épocas de sequía, y las condiciones para la vegetación dentro y fuera de la columna de agua; hacen que estas variaciones y cambios en los niveles de agua del ecosistema puedan tener un impacto más crítico sobre la estructura y función que las comunidades de humedales aportan a la biodiversidad, comparado con los impactos de la temperatura (Abrahams, 2008).

## **9.9 INCREMENTO DE CIANOBACTERIAS**

Las cianobacterias son los organismos productores de oxígeno más antiguos de la Tierra, con restos fósiles que se remontan a, aproximadamente, 3.500 millones de años (Codd et al., n.d.) En la actualidad, las cianobacterias presentan notables adaptaciones ecofisiológicas, incluida la capacidad de prosperar en entornos acuáticos sometidos a cambios ambientales inducidos por el hombre y de forma natural, lo que les permite estar presentes en ecosistemas de agua dulce y salobre.

Su presencia y acelerada floración es preocupante debido a que pueden afectar el ecosistema de diversas maneras. Por ejemplo, su desarrollo masivo puede generar problemas de turbidez en aguas con eutrofización, lo que dificulta el crecimiento de macrófitos acuáticos fundamentales en la cadena trófica de los ecosistemas, afectando directa e indirectamente especies de invertebrados y peces (SCHEFFER, 1998). Además de eso, las cianobacterias pueden producir unas toxinas en forma de pépticos o alcaloides, que pueden convertirse en una enorme problemática de salud pública en aguas que sirven como suministro para diferentes poblaciones, tanto para actividades como agricultura, pesca, fines recreativos, como para consumo humano. Su ingesta, puede provocar graves problemas de salud en humanos y animales, tales como intoxicaciones graves, afecciones hepáticas, gastrointestinales, pulmonares y cutáneas; esto en el corto y mediano plazo. Sin embargo, también existen evidencias de exposiciones prolongadas o crónicas a

dichas toxinas, lo que en el largo plazo puede provocar cáncer primario de hígado y daño hepático crónico (SEDAN & ANDRINOLO, 2011).

Si bien la problemática de las cianobacterias es un tema que, según investigaciones internacionales, depende de muchos factores ambientales simultáneos, también es posible encontrar estudios que se centran en analizar cambios en parámetros ambientales producto de escenarios de cambio climático, sobre el comportamiento de dichos organismos en sistemas acuáticos superficiales. El aumento de temperatura ha demostrado favorecer el crecimiento de cianobacterias, pues, en conjunto, suelen presentar tasas de crecimiento óptimas a temperaturas superiores a los 25°C. Estas condiciones también les permiten ser más competitivas con productores primarios como diatomeas o clorofitas, alcanzando un dominio máximo cuando, tanto las temperaturas como los nutrientes son altos. Mientras que la tasa de crecimiento de estos organismos eucariotas disminuye, la de las cianobacterias logra alcanzar sus puntos óptimos (Elliott et al., 2006). Este parámetro también tiene un impacto directo sobre la viscosidad del agua, generando una reducción de la misma en la superficie de la columna de agua (VOGEL, 1994); lo que puede generar difusión de nutrientes hacia la superficie de la célula, proceso relevante cuando se trata de relaciones de competencia interespecífica por los nutrientes. Las cianobacterias tienen la habilidad de controlar su flotabilidad para disminuir su sedimentación, así que un escenario de disminución de viscosidad, se terminará por sedimentar fitoplancton más grande con nulos mecanismos de flotabilidad (como es el caso de las diatomeas), y generará un ambiente favorable para las cianobacterias bajo estas condiciones (Peperzak, 2003).

El aumento acelerado de las floraciones de cianobacterias, puede disminuir notablemente las concentraciones de oxígeno en horas de la noche, lo que puede desencadenar muerte repentina de peces, además de generar olores ofensivos debido a la producción de geosmina y otras sustancias mohosas (Uwins et al., 2007). Se espera además una afectación al paisaje y estética del ecosistema.

Como se vio anteriormente, los cambios en la concentración de carbono en el agua, afecta también el pH de las mismas, lo que tiene una repercusión sobre el comportamiento y afloramiento de cianobacterias. Se ha demostrado que, en lagos natural o artificialmente eutrofizados, como es el caso de la mayoría de cuerpos de agua en la Región Caribe, se presenta un descenso en las concentraciones de carbono orgánico disuelto en horas del día a raíz del proceso fotosintético (que requiere gran demanda de carbono), que da lugar a grandes floraciones de algas; lo que podría conducir a un fitoplancton limitado en carbono. Una hipótesis formulada por (Paerl & Huisman, 2009), afirma que dichas condiciones benefician notablemente a

las cianobacterias que habitan en la subsuperficie del cuerpo de agua, haciéndoles más fácil captar y aprovechar el carbono atmosférico que tiene fácil difusión en la superficie, minimizando las consecuencias de una limitada concentración de carbono que pueden existir en la columna de agua producto de estos procesos físicos. Varios estudios se enfocan en la producción de diversas especies de cianobacterias a diferentes concentraciones de CO<sub>2</sub>, sin embargo, es un tema que no se ha estudiado con la suficiente profundidad para lograr predecir el comportamiento de las algas a las condiciones cambiantes de este parámetro en escenarios de cambio climático.

Cada una de las cianobacterias puede tener una respuesta distinta al cambio climático, ya que las condiciones ambientales para su sobrevivencia, varían de acuerdo a sus necesidades particulares. Diversos estudios se han enfocado en analizar los impactos del cambio climático en diferentes especies de cianobacterias representativas de ambientes de agua dulce y somera (estuarios), mostrando el comportamiento de las mismas en diferentes condiciones, y permitiendo entender los riesgos asociados a los posibles cambios que pueden modificar sus procesos naturales. En el departamento de la Guajira, un estudio se enfocó en analizar las especies de cianobacterias predominantes en la desembocadura del Rio Ranchería, así como en campos de arroz ubicados en Fonseca. Se aislaron las siguientes cianobacterias: *Synechococcus*, *Oscillatoria*, *Anabaena* sp, *Microcystis* sp, *Oscillatoria amphibia*, *Oscillatoria limosa*(HERNANDEZ et al., 2018). La información proporcionada por entidades nacionales sobre la presión estimada de fósforo total en el país, permite también ubicar geográficamente los géneros de algas potencialmente tóxicos presentes en el país. De este modo, es posible observar que en la Región Caribe hay presencia de *Microcystis*, *Cylindrospermopsis*, y otros géneros entre los que pueden estar: *Anabaena*, *Lyngbya*, y *Oscillatoria*, estas dos últimas específicamente en ambientes marinos (SALOMÓN et al., 2020).

En el caso de *Anabaena*, es posible encontrarla alrededor del mundo sin distinción, prevaleciendo en cuerpos de agua dulce lénticos como lagos, embalses ríos y estanques. Es tolerante a bajas concentraciones de CO<sub>2</sub> y nitrógeno. La estratificación térmica producto de altas temperaturas, beneficiará este género gracias a su capacidad para controlar la flotabilidad en la columna de agua, permitiéndole acceder a suficiente luz para potencializar su crecimiento; lo que también puede deberse a su capacidad para regular su crecimiento y acceder a nutrientes(McCausland et al., 2005). *Anabaena* también ha mostrado mayores tasas de crecimiento y producción de toxinas, en condiciones de baja salinidad. Un mayor caudal en sistemas fluviales conectados a estuarios o a cuerpos de agua costeros con algún aporte de agua salada, pueden arrastrar y transportar las floraciones de

esta cianobacteria a las partes más salobres de dichos ecosistemas, agravando y expandiendo el problema (VINEY et al., 2007).

*Mycrocystis* es uno de los géneros de cianobacterias más comunes presente en cuerpos de agua dulce superficiales, encontrándose en cada continente, a excepción de la Atlántida. Puede producir toxinas potencialmente peligrosas. Su proceso de fotosíntesis y crecimiento, es óptimo sobre los 25° C, lo que evidencia que un aumento de temperatura del agua le permite competir con especies de algas eucariota en escenarios de cambio climático. La flotabilidad también es un factor que favorece este género en columnas de agua con estratificación térmica, produciendo vesículas de gas o burbujas que les facilitan mantenerse cerca de la superficie del cuerpo de agua, permitiéndole un dominio sobre otras especies (WALSBY et al., 1997). Contrario a las otras especies de cianobacterias, *Mycrocystis* presenta alta tolerancia a la salinidad, que puede ser producida por variaciones en los ciclos húmedos y secos, dándole una ventaja y permitiéndole aumentar su producción de toxinas (TONK, 2007). Los estudios que se han acercado a evaluar la reacción de estas cianobacterias en escenarios con concentraciones cambiantes de CO<sub>2</sub>, muestran que, dependiendo la cepa, el comportamiento puede ser favorable o desalentador, por esa razón no se puede generar una conclusión general sobre el correspondiente impacto (O'Neil et al., 2012). La concentración de nitrógeno total en agua, puede tener un impacto en la concentración microcistinas, pues son capaces de alcanzar sus máximos niveles a 1,5 y 4,0 mg/L de nitrógeno (Graham et al., 2004).

*Cylindrospermopsis* es una cianobacteria capaz de crecer sin fuentes externas de nitrógeno fijo. Presente en zonas tropicales y subtropicales, aunque ha aumentado su expansión a todos los continentes exceptuando la Antártida. Es capaz de producir una toxina conocida como cilindrospermosina (CYN), altamente tóxica y nociva (Graham et al., 2004). La temperatura juega un papel importante en el comportamiento de esta cianobacteria, pues se ha encontrado que para la especie *C. raciborskii*, los ambientes tropicales y subtropicales en épocas secas, la hacen crónicamente dominante, mostrando un crecimiento en su floración en temperaturas de entre los 20° C a los 35°C. Su tolerancia a la temperatura le permite invadir zonas templadas y dan cuenta de su potencial dominio en escenarios de cambio climático alrededor del mundo (Saker & Griffiths, 2000). En la Región Caribe, es de esperarse un aumento considerable en los afloramientos de este organismo, generando problemas de invasión. La estratificación es un factor común en el desarrollo y crecimiento normal de esta cianobacteria, aunque en cuerpos de agua con profundidad mayor a 15m, generando una ventaja competitiva debido a sus altas capacidades para sobrevivir en columnas de agua con bajas concentraciones

de P orgánico, además de su capacidad de foto-adaptación a la oscuridad y a fluctuaciones de luz, lo que demuestra que su proceso de crecimiento tiene bajos requerimientos de luz(O'BRIEN et al., 2009).

## 10. AFECTACIONES PROVENIENTES DE LA REGIÓN ANDINA

A pesar de que el presente documento se centra en los impactos del cambio climático sobre cuerpos de agua dulce superficiales ubicados en la Región Caribe, los procesos climáticos de otras regiones interconectadas, pueden generar consecuencias sobre estos sistemas hídricos, así como maximizar las afectaciones producto de dichas problemáticas globales. Los estudios que han evaluado los problemas de erosión en cuerpos de agua en el Caribe, han demostrado un gran porcentaje de responsabilidad de las actividades humanas en la Región Andina, que terminan generando consecuencias en estas zonas de menor altitud.

La región Andina de Colombia está conformada por los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, Cundinamarca, Huila, Norte de Santander, Quindío, Risaralda, Santander y Tolima. Esta región está conformada por la cordillera Central, que es la más alta de Colombia, dividiéndose en ramales y perdiendo altura una vez ingresa al Caribe. La cordillera Occidental es la más estrecha de las tres, tiene varios macizos separados, y es una barrera natural en la zona interior del país, cumpliendo la función de atenuar fenómenos climáticos provenientes de la región Pacífica. Además, esta hace parte de la estrella hidrográfica del Macizo Colombiano, lugar donde nacen los ríos de cordillera más importantes del país, que recorren cada una de las regiones y son pieza fundamental en la formación de cuerpos de agua altamente productivos y diversos. La cordillera Oriental, por último, es la más joven de todas, pero también la más ancha; se separa de la central justo en el punto donde nacen los ríos anteriormente descritos: en el macizo colombiano. Es el límite entre la región Andina y los llanos orientales (CORMAGDALENA, 2007).

La vertiente del Caribe comprende todas las cuencas Hidrográficas que vierten al Mar Caribe, por lo tanto, todos los cuerpos de agua lóticos (sistemas superficiales de agua dulce), que recorren la Región Caribe y que pueden verse afectados por las dinámicas en zonas aguas arriba. Esta Región es la más importante del país, pues en ella se localiza la mayor cantidad de población, además de presentar procesos de transformación más drásticos y con mayores consecuencias sobre los habitantes. Tiene una extensión de 363.878 Km<sup>2</sup>, y está formada por las cuencas del sistema río Magdalena-río Cauca; cuenca del Río Atrato, cuencas de la Sierra Nevada de Santa Marta y La Guajira; y la cuenca del Río Sinú. Sus ríos principales son: Magdalena, Cauca, Atrato, Ranchería, Cesar, San Jorge, Sinú, Chichamocha y Saldaña (F. SÁNCHEZ, 2013). Los ríos que discurren por esta región, tienen su origen en las cordilleras que conforman los andes colombianos, así como en ecosistemas estratégicos dentro de la misma. El Río Sinú nace en el nudo de

paramillo a una altura de 3400 m.s.n.m. en la cordillera occidental colombiana, con una longitud aproximada de 350 km (VALBUENA, 2017); mientras que el Río Atrato nace en el Páramo de Cerro Plateado, en un ecosistema altoandino de la cordillera occidental (WORLD WILDLIFE FUND, 2018). En el caso de la cuenca Magdalena-Cauca, abarca 256000 Km<sup>2</sup> que comprende el 24% de la extensión continental del país, y en ella habitan el 80% de la población total del mismo. Esta cuenca es el sistema de drenaje más importante de la Región Andina, y conecta directamente con la Costa Caribe, razón por la cual adquiere un enorme valor a la hora de identificar los impactos ambientales de dicha región, sobre los cuerpos de agua superficiales de la región Caribe. El eje orográfico que divide las cuencas del Magdalena y el Cauca, es la cordillera central. El nacimiento del río Magdalena es en la laguna de la Magdalena, ubicada en el páramo de las Papas en el macizo colombiano a 3.685 msnm, recorriendo 1550Km<sup>2</sup>; mientras que el Río Cauca, nace en el páramo de Sotará a 3900 msnm, tiene una longitud de 1180Km<sup>2</sup>, recorriendo el valle interandino entre las cordilleras Occidental y Central, hasta desembocar en el Magdalena, convirtiéndose en su principal afluente. El Río Magdalena recorre 19 departamentos y 724 municipios, teniendo una enorme importancia para el crecimiento y desarrollo del país, así como características específicas de acuerdo a su pendiente, lo que permite ser dividido en tres partes bien diferenciadas, desde El macizo colombiano donde nace, hasta su bifurcación en Bocas de Ceniza y el Canal del Dique, donde desemboca (CORMAGDALENA, 2007).

Su suave pendiente en la parte baja, le permite fluir por toda la llanura del Caribe, formando innumerables ciénagas y cuerpos de agua superficiales de poca profundidad, así como llanuras inundables que regulan las crecientes almacenando agua en periodos lluviosos y distribuyéndola paulatinamente a los ríos en tiempos secos. Las grandes cargas de sedimentos que arrastran los ríos y son depositadas en estas llanuras, las convierten en suelo altamente productivo, pero también, con alta vulnerabilidad a inundaciones y fenómenos climáticos adversos, donde la ausencia o presencia de precipitación en cada sector de la cuenca, es el factor de riesgo decisivo para los habitantes de las zonas más bajas. Los enormes sistemas de humedales que se forman en toda la cuenca, son además la fuente productiva de los pobladores de la misma, y de su protección depende tanto un mejor desarrollo para el país, como la posibilidad de salvaguardar recursos ambientales fundamentales que generarán procesos productivos sostenibles y que permitirán mejorar la calidad de vida de la población colombiana.

Es importante entender, entonces, que las variantes que el cambio climático ejerza sobre la Región Andina en cualquiera de sus parámetros, tienen una implicación directa sobre los parámetros ambientales específicos de la Región Caribe, y a su

vez, estos deben ser tenidos en cuenta a la hora de identificar, analizar o gestionar medidas o planes de mitigación para esta última zona territorial. Aunque los expertos han generado modelos de simulación sobre el comportamiento del cambio climático en el mundo, este fenómeno puede manifestarse con consecuencias diferentes a las proyectadas, y, por tanto, alterar también las acciones de adaptación. El Estudio Nacional del agua, en su edición 2010, resalta una alta incertidumbre en fenómenos como la escorrentía, para zonas como la Andina, Orinoquía y Amazonía, donde el 66% de los modelos de circulación global no coinciden con los cambios evidenciados (BEDOYA et al., n.d.). Además, la atribución de las variaciones de la precipitación mundial es realmente incierta, puesto que este parámetro está estrechamente ligado a pautas de variabilidad natural a gran escala (BATES et al., 2008)

Por esta razón, dentro de la identificación de impactos, se hace necesario analizar escenarios con marcadas diferencias en la precipitación, debido a que, como lo afirma Goudie (1993), los cambios en la precipitación conducen a modificaciones en la escorrentía que afectan a las pérdidas de humedad en la superficie, al porcentaje de cubierta vegetal y a variaciones de almacenamiento en los acuíferos (Goudie, 1993).

La variación de los patrones de precipitación modifica la escorrentía de los ríos y cauces que alimentan los cuerpos de agua costeros, generando épocas de sequía o de lluvias intensas, lo que cambia los procesos naturales que se llevan a cabo en los cuerpos de agua, a unos niveles preestablecidos en el tiempo, lo que también ha hecho que los organismos que allí habitan, se hayan adaptado a estas condiciones. Por lo tanto, variaciones extremas en este parámetro, van a tener una serie de repercusiones sobre el ecosistema (Wantzen et al., 2008)

Las fluctuaciones naturales del nivel del agua, son decisivas para un buen funcionamiento de ecosistemas de agua dulce de poca profundidad, que son especialmente sensibles a cualquier cambio en la cantidad y periodicidad del recurso hídrico (Coops et al., 2003).

Además, se busca lograr una visión menos sesgada que analice los impactos a los que pueden estar sometidos los cuerpos de agua de la Región, y así, contribuir eficazmente con las acciones de mitigación y adaptación que se pretendan tomar.

## 10.1 ESCENARIO 1. AUMENTO DE LAS PRECIPITACIONES

Como se describió anteriormente, las dinámicas de interconectividad entre las regiones del país, definidas por los cuerpos de agua que recorren los territorios que las componen, son un elemento clave a la hora de estimar los impactos reales que pueden desencadenar fenómenos climáticos abruptos.

El incremento en las precipitaciones en la Región Andina, históricamente hablando, ha exacerbado el nivel de los ríos que allí nacen y que recorren las cordilleras alimentando las llanuras en el país, y que, buscando desembocar en el mar, generan enormes sistemas de agua dulce superficial con enorme productividad, y cuya regulación depende de procesos que tienen lugar aguas arriba. Fenómenos climáticos que han tenido lugar en el país, generando enormes problemas ambientales y sociales al variar radicalmente los parámetros climáticos como precipitación, temperatura o vientos; han sido estudiados y analizados con el fin de determinar las posibles consecuencias de estas abruptas variaciones, así como la formulación de estrategias efectivas de prevención y mitigación de dichos eventos. El fenómeno de la Niña y El niño o ENSO, es un sistema de interacciones naturales entre el océano Pacífico ecuatorial y la atmósfera, que trastorna los patrones de precipitación tropical y de circulación atmosférica, que se presenta con una periodicidad de 3 a 7 años. La intensidad del fenómeno en curso es fundamental para relacionar su efecto sobre los componentes climáticos que afectan el balance hídrico (BEDOYA et al., n.d.). Estos fenómenos han tenido especial repercusión sobre la zona Caribe, pues afectan considerablemente los cuerpos de agua en esta región. Sus causas, características y consecuencias, permiten realizar una aproximación a los posibles impactos que tiene un aumento de la precipitación en la zona Andina, sobre los cuerpos de agua de la zona Caribe. El fenómeno de la niña, específicamente, presenta un aumento el volumen de precipitación en el país, lo que tiene una repercusión sobre los niveles de los ríos Magdalena y Cauca, que desembocan al mar Caribe.

El suelo y su cobertura, tienen un papel decisivo sobre el aumento de la precipitación en estas zonas altas. La labor que cumple en los procesos hídricos es esencial, pues los bosques son amortiguadores naturales de esorrentía que fluye en el ciclo hidrológico hacia los ríos y funcionan absorbiendo y almacenando excesos de precipitación en épocas húmedas. La deforestación en estas zonas genera un descubrimiento de la cobertura boscosa e impide que los anteriores procesos se realicen de manera efectiva, exponiendo la cubierta vegetal a la acción directa de la precipitación y los vientos. Además, la enorme intervención de

actividades antropogénicas sobre la cobertura vegetal en estos territorios, reduce también el efecto regulador del suelo sobre los ríos que nacen allí y fluyen hacia zonas de menor pendiente dentro del territorio nacional, aumentando drásticamente problemas de erosión en la ladera de las cordilleras, teniendo un efecto directo en el transporte de sedimentos de estos cuerpos de agua.

La erosión hídrica, que es la pérdida de la capa superficial de la corteza terrestre por acción del agua (precipitación, ríos, mar), se verá incrementada en la medida que el suelo, por actividades antropogénicas, experimente una alta degradación. Para el año 2020, el IDEAM, estimó un aumento de deforestación del 16,9% en la Región Andina y del 7,5% en la Región Caribe; y se estima, de la misma manera, que esta problemática seguirá en aumento, en la medida que las actividades de desarrollo de país avancen. Como se puede observar en el mapa de erosión hídrica potencial en ladera por subzona hidrográfica, incluido en el Estudio Nacional del Agua del 2018. (**ANEXO E: Erosión hídrica potencial en ladera para Colombia**); la erosión hídrica en la Región Andina presenta valores preocupantes que van desde los moderados hasta los muy severos, y que se encuentran dentro de las cuencas de los ríos que recorren el Caribe colombiano. En la zona Andina se advierten tasas de erosión cuyas pérdidas del recurso conllevan a implicaciones negativas en aspectos económicos, ambientales y productivos (JIMENEZ, 2020). En un aumento de las precipitaciones, las gotas de lluvia, ayudadas por la fuerza gravitacional, arrastran las partículas formando zanjas o cárcavas, e incluso causando movimientos en masa en los cuales se desplaza un gran volumen de suelo. Sin embargo, la erosión no sólo genera una pérdida del suelo, sino también de nutrientes, materia orgánica, retención de humedad, profundidad de los suelos, y, por ende, se genera una disminución de la productividad de los mismos (SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL DE COLOMBIA, 2016).

Los excesos hídricos en estas zonas montañosas, después de una pérdida de cobertura vegetal, no logran ser correctamente filtrados, ocasionando que procesos naturales se intensifiquen, como, por ejemplo, que la escorrentía se presente en pulsos, lo que genera inundaciones extremas aguas abajo, así como un incremento en la sedimentación transportada desde estas zonas erosivas (J. RESTREPO, 2015). Los ríos que circulan desde los Andes hasta el Caribe, son los encargados de realizar un transporte sedimentario por la cuenca hasta la zona costera y el mar. Dicho proceso se da a partir de características intrínsecas de la cuenca, como el área, el relieve o la temperatura. Tal y como lo afirman (Milliman & Syvitski, 1992) entre más grande sea la cuenca, es decir, entre mayor sea la zona montañosa que recorre, con altos picos y alturas, y presente temperaturas altas, como en el caso de la zona tropical donde está ubicada la Región Caribe colombiana; mayor será su

transporte de sedimentos. Los sedimentos de la erosión generan impactos adversos secundarios cuenca abajo por colmatación de embalses, cauces de los cuerpos de agua como ríos, ciénagas; inestabilidad de puertos y puentes, pérdida de navegabilidad en los ríos, reducción de la oferta pesquera en aguas dulces y marinas, entre otros. Además, los sedimentos pueden transportar algunos contaminantes derivados de los agroquímicos aplicados al suelo, como fósforo, nitrógeno y residuos de plaguicidas(SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL DE COLOMBIA, 2016). El incremento en el arrastre de contaminantes puede incrementar sus procesos de dilución en cuerpos de agua. Además, el aumento en caudales y su velocidad, va a reducir significativamente los tiempos de reacción de las corrientes y de los cuerpos de agua involucrados, alterando procesos de biodegradación (WHITEHEAD et al., 2009). La precipitación será determinante para determinar la capacidad de recuperación de oxígeno que tengan los cuerpos de agua superficiales (RANGEL, 2012).

El transporte de sedimentos también depende de la topografía del terreno por donde transita el río. Los procesos en zonas montañosas de la región Andina, tales como flujos de lodo y materiales, remoción en masa o derrumbes; requieren una gran cantidad de agua para llevarse a cabo, así es que, en escenarios con alto volumen de precipitaciones, es de esperarse que estos fenómenos se incrementen y afecten zonas bajas. Además de esto, las características de longitud y ángulo de las pendientes determinan la ocurrencia de estos fenómenos o procesos(J. D. RESTREPO, 2005).

Los análisis del comportamiento del Río Magdalena una vez atraviesa la zona montañosa y llega a la llanura de la Región Caribe, en época de altas precipitaciones aguas arriba, han mostrado un exceso de escorrentía generado en las partes alta y media de la cuenca en cuestión, que transita hasta la Región Caribe y sobrepasa los límites de amortiguación del suelo, lo que conlleva a grandes inundaciones en dichos sectores. La recurrencia de estos procesos hidrológicos, y la presión que se ejerce sobre esta zona, podría dificultar aún más su capacidad de amortiguación a raíz de un proceso de colmatación del suelo, es decir, cuando su permeabilidad original se reduce gracias a la obstrucción de los poros presentes en su estructura, que son ocupados por los materiales finos transportados por agua que se va infiltrando paulatinamente (J. D. RESTREPO, 2005). Los estudios realizados en el Río Magdalena, muestran con preocupación que tres cuartas partes de este cuerpo de agua sufren erosión, con datos de 1980-2000(el TIEMPO, 2015). Sin embargo, no se han llevado a cabo estudios que tengan en cuenta los porcentajes de deforestación desde el año 2010, con el fin de cuantificar los cambios en los niveles de erosión actuales.

La descarga de sedimentos en la desembocadura de un río es el reflejo de la suma de una serie de procesos erosivos y de deposición que ocurren en las partes alta y media de la cuenca hidrográfica. La erosión en la parte alta de la cuenca hidrográfica, para el caso de los ríos que nacen en la región Andina Colombiana, se da cuando el material es removido de las colinas y pendientes del terreno alto, a raíz de procesos de denudación del suelo, que aportan material sedimentario al sistema fluvial (HOVIUS, 1998). Las condiciones climáticas que deben tenerse en cuenta para la determinación de estos procesos de denudación del suelo, son la disponibilidad de agua y el rango de temperatura. Además de esto, es importante estimar la litología de la zona, así como la susceptibilidad del suelo a la erosión por acción del agua y del viento, que está dado por sus propiedades y estructura. El aumento de la sedimentación tiene grandes implicaciones sobre la estructura de los ríos, así como también de los cuerpos de agua lénticos ubicados en sus desembocaduras. En primer lugar, los sedimentos transportados pueden depositarse en ciertos tramos del cuerpo de agua, sofocando organismos briófitos reófilos, es decir, aquellos organismos con gran capacidad de adaptación a ambientes acuáticos con diversos gradientes ambientales (VASQUEZ & BENÍTEZ, 2015). Estos materiales también son capaces de inutilizar sustrato para ciertas especies dentro del río, por ejemplo, aquellas que necesitan aguas rápidas de gran ventilación y fondos de piedra limpios. También se pueden ver afectando ríos de bajo orden o pequeños tributarios de ríos como el Magdalena o el Cauca, pues su cauce puede verse bloqueado u obstruido, obligándolos a desviarse por nuevos cauces (WELCOMME, 1980). El río Magdalena y sus tributarios transportan las mayores cargas de sedimentos entre los ríos de Suramérica. Una enorme parte de estos sedimentos se deposita en la Depresión Momposina, donde los eventos de inundaciones son comunes en el año debido al aumento de las precipitaciones aguas arriba y al consecuente crecimiento de los caudales de los ríos (ANGARITA et al., 2016). Gracias a las propiedades del suelo y sus procesos de infiltración, las cuencas de estos grandes ríos tiene la capacidad de retener humedad, lo que permite que estas zonas y sus cuerpos de agua estén mejor preparados para eventos de posible sequía debido a que pueden tener mayores reservas en sus acuíferos subterráneos; pero también pueden ser decisivos en situaciones de altísimas precipitaciones, pues pueden retener mayor cantidad de agua, haciendo que estos territorios sean menos vulnerables a eventos de inundaciones. Para la región Caribe, sólo la zona del Bajo Cauca presenta capacidad de retención alta. Las áreas de Magdalena-Cauca y el resto de la zona Caribe tiene regulaciones bajas y muy bajas, empeorando en la Guajira (IDEAM, n.d.); (SÁNCHEZ et al., 2010). (Ver: **ANEXO F**: índice de regulación hídrica para Colombia).

Para el periodo 2071-2100, se espera que la precipitación aumente entre 10 a 30% en cerca del 14% del territorio nacional (Nariño, Cauca, Huila, Tolima, Eje Cafetero, occidente de Antioquia, norte de Cundinamarca, Bogotá y centro de Boyacá). Estos aumentos en las lluvias sumados a los cambios en el uso del suelo pueden incrementar la posibilidad de deslizamientos, afectación de acueductos veredales y daño de la infraestructura vial en áreas de montaña, así como de inundaciones en áreas planas del país (IDEAM et al., 2015). En el mapa de zonas propensas a inundaciones, se evidencia que la Región Caribe es susceptible a estos procesos, y que, además, ha sido afectada en épocas anteriores por los mismos. (Ver: **ANEXO G: Zonas susceptibles a inundación en Colombia**)

Los ríos reaccionan ante los cambios del caudal medio anual durante un período de ajuste al nuevo régimen, después de lo cual se estabilizan en una forma adaptada a las condiciones modificadas (WELCOMME, 1980).

A pesar del gran aporte sedimentario que puede darse por parte de grandes cuencas como la del Magdalena y el Cauca sobre la región Caribe, investigaciones que analizan el aporte de sedimentos en diferentes regiones, han encontrado que los factores que afectan las condiciones locales en zonas costeras, dependen, en mayor medida de los ríos de tamaño pequeño o mediano (RESTREPO-ÁNGEL et al., 2005). Razón por la cual, deben ser preservados dichos cuerpos de agua en las mejores condiciones posibles para garantizar una mejor adaptación al cambio climático en estas zonas.

En el caso de los sistemas de humedales (ciénagas, manglares, lagos, lagunas), que son alimentados por los ríos y que se encargan de regular sus cauces una vez los primeros convergen, experimentan también unos impactos cuando varía la precipitación, que modifica desde su morfología y parámetros físico –químicos, hasta su productividad. La parte norte de la Región Caribe, específicamente en los departamentos de Bolívar, Magdalena y Atlántico, presenta un gran número de ciénagas, humedales y ríos de menor envergadura, allí se destaca la Ciénaga Grande de Santa Marta, ubicada en el delta exterior del Río Magdalena, y sus fuentes de abastecimiento son los ríos de la vertiente occidental de La Sierra Nevada de Santa Marta, el Río Magdalena y el Mar caribe. La parte sur de la Región, tiene una gran provisión hídrica, que se concentra en la subregión de La Mojana, que es altamente productiva, su función es la de regular los cauces de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge y, además, pertenece a la Depresión Momposina (ROCA & PÉREZ, 2006). La zona de la Mojana, tiene unos suelos con características especiales que los convierten en zonas aptas para la producción agrícola. Pueden ir desde superficiales a profundos, de imperfecta a perfectamente drenados, pero son altamente fértiles en condiciones adecuadas de precipitación,

aunque también son propensos a inundaciones periódicas. El transporte de estos sedimentos por las cuencas que atraviesan la región Caribe, una vez son depositados en estos cuerpos de agua de poca profundidad, van a acelerar y recrudecer problemas de eutrofización ya existentes, afectando drásticamente los parámetros físicos, químicos y biológicos de estos cuerpos de agua dulce. Estos sistemas de humedales tienen capacidad para almacenar grandes volúmenes de agua, buscando acumular y devolver agua a los ríos en épocas de sequía.

Otro de los cuerpos de agua superficiales en la Región Caribe que puede verse afectado por el aumento de la precipitación, son los estuarios. Estos ecosistemas tienen un aporte de agua dulce por parte de ríos, arroyos, ciénagas o caños a los que están conectados, pero también reciben continuamente un aporte de agua salada por parte del mar, con quien tiene una relación bidireccional. Los estudios enfocados en analizar el estado de dichos ecosistemas, muestran cómo, para el caso de la Ciénaga grande de Santa Marta, quien por su parte norte conecta con el Mar Caribe, los meses con mayor precipitación varían considerablemente parámetros como la salinidad y transparencia del agua.

Los valores de salinidad para ecosistemas con entradas de agua dulce y salada, pueden variar de acuerdo al aumento de precipitación. La Ciénaga Grande de Santa Marta, para el año 2019, mostraba unos cambios significativos tanto en su salinidad, como en la transparencia de la columna de agua. Para el mes de junio del mismo año, época en la que finalizaba la primera temporada invernal del año y fue analizado el comportamiento de la ciénaga; los valores de precipitación de meses anteriores como abril y mayo fueron decisivos para los resultados encontrados, pues hicieron que el río Sevilla, que nace en la Sierra Nevada de Santa Marta, incrementara su caudal. Del mismo modo, el caño Clarín, que es el principal conector del Río Magdalena con la Ciénaga Grande de Santa Marta (EL HERALDO, 2015), presentó su primer pico máximo de nivel.

Si bien el departamento del Magdalena no tuvo altos valores de precipitación en este mes, la zona Andina y el resto de la Región Caribe sí presentaron lluvias (IDEAM, 2019c), lo que afectó directamente el caudal de los ríos que nacen en los Andes y recorren las llanuras del Caribe. Los incrementos de caudales y la poca precipitación en el departamento del Magdalena, generó en la Ciénaga un contraste de salinidad, presentando altos niveles en la zona noreste gracias al aporte de agua marina de La Boca de La Barra, que conecta con el Mar Caribe; que a su vez, fue predominante sobre el ingreso de agua dulce de ríos, caños y arroyos (RICAURTE et al., 2019). Vale la pena destacar que los análisis realizados muestran gráficamente un mayor incremento de la salinidad en la ciénaga, bajo las

condiciones anteriormente mencionadas, comparado con la época de sequía correspondiente al mes de marzo (Ver: **ANEXO H. Variaciones espaciales de salinidad en la Ciénaga Grande de Santa Marta a) junio 2019**), como se explicará más adelante.

Por otro lado, para el mes de octubre del año 2019, a mitad de la segunda temporada invernal en el país, los valores de precipitación aumentaron en cada región del país, con respecto a los análisis realizados en el mes de junio. En este punto, el aporte de agua dulce a la ciénaga vino de la zona este y oeste, tanto por los ríos Andinos, como por los que nacen en el Caribe. Estos aportes hídricos de cuerpos de agua dulce superficiales, generan una disminución considerable de la salinidad, cuyos valores más altos se concentran en la zona más cercana al mar. (Ver: **ANEXO H. Variaciones espaciales de salinidad en la Ciénaga Grande de Santa Marta b) octubre 2019**). Además de eso, la transparencia aumenta en zonas cercanas a la entrada de agua salina, mientras en las zonas de desembocadura de caños, ríos y arroyos; los valores de transparencia son bajos (RICAURTE et al., 2019).

Los altos valores de precipitación que generan inundaciones, cambian los parámetros o características de los estuarios, lo que puede disminuir la salinidad, el pH y el oxígeno disuelto; y aumentar la turbidez (Gillanders & Kingsford, 2002). Tal y como lo muestra el estudio realizado por (Göransson et al., 2013); es posible establecer una relación entre las épocas de fuertes precipitaciones que generan altos caudales de los ríos, con grandes valores de turbidez en los mismos. El valor de descarga del río se rige en su mayoría por los valores de precipitación en toda la cuenca, y no por la de tipo local, que parece no tener un impacto significativo. Este punto reafirma la necesidad de evaluar la incidencia de la Región Andina (como parte de las cuencas de los principales ríos que recorren el Caribe), a la hora de identificar los impactos que puede generar el cambio climático sobre los cuerpos de agua superficiales, así como proponer planes de adaptación.

Estas inundaciones se dan en llanuras donde generalmente, en época seca, los pobladores cultivan productos agrícolas. Estos eventos de altas precipitaciones pueden arrasar con este tipo de vegetación, comenzando un proceso de descomposición que incrementa la carga orgánica y consume el oxígeno disponible en los cuerpos de agua cercanos a los que son arrastrados dichos residuos, como estuarios, manglares o ciénagas. Esto puede potenciar problemas de hipoxia.

Las altas precipitaciones también pueden favorecer la escorrentía y el transporte de vertimientos de aguas residuales hacia cuerpos de agua costeros, lo que disminuye

las concentraciones de oxígeno disuelto gracias a los procesos de degradación de la materia orgánica proveniente de estos vertimientos, que consumen el oxígeno disponible (INVEMAR et al., 2018)

## **10.2 ESCENARIO 2. DISMINUCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES**

Según el documento de nuevos escenarios de cambio climático en Colombia en los periodos comprendidos de 2071-2100, se espera que la precipitación media disminuya entre 10 a 30% en cerca del 27% del territorio nacional (Amazonas, Vaupés, sur del Caquetá, San Andrés y Providencia, Bolívar, Magdalena, Sucre y norte del Cesar). Estas disminuciones sumadas a los cambios en el uso del suelo pueden acelerar e intensificar los procesos de desertificación y pérdida de fuentes y cursos de agua, para un contexto meramente regional (IDEAM et al., 2015).

Estas reducciones en las lluvias, van a generar una reducción en el caudal, disminuyendo también el lecho dentro del canal original, generando pérdidas en los hábitats de peces y otros organismos acuáticos, además de los consecuentes impactos sobre la salud humana, la producción agropecuaria y forestal, la economía y la competitividad regional (WELCOMME, 1980).

La disminución de la precipitación en la Región Andina tiene una implicación sobre los ríos cuyo origen radica en ecosistemas estratégicos pertenecientes a esta región, y que fluyen por la Región Caribe hasta desembocar en el Mar Caribe. Los cambios en las precipitaciones afectan los patrones de escorrentía de las aguas superficiales y quebradas, evaporación y evapotranspiración, generando una reducción de la oferta de este recurso y de su disponibilidad para los ecosistemas y usos humanos. La disminución en el caudal y su velocidad, genera mayores tiempos de residencia dentro del cuerpo de agua, así como de la capacidad de dilución, lo que puede traducirse en incremento en las concentraciones de contaminantes y de nutrientes presentes en el agua, creando un caldo de cultivo para la proliferación y generando una reducción sobre las concentraciones de oxígeno disuelto (WHITEHEAD et al., 2009). En esta época debe esperarse una mayor degradación de la materia orgánica, así como cambios más significativos en el caudal de los ríos, comparados con épocas de lluvias en el país; al realizar un análisis de los intervalos de variación en este parámetro bajo estas condiciones escenarios(MONTES et al., 2013)

Las mayores disminuciones de escorrentía pueden darse en cuencas donde las temperaturas aumenten entre 4°C y 5°C, y la precipitación disminuya hasta en un 20% comparada con los valores actuales. Las zonas del alto Magdalena, Cauca,

Caribe Litoral, Saldaña, Patía y Caribe Urabá presentan la mayor afectación para los periodos evaluados. La razón principal para que se obtenga este efecto está vinculada a las reducciones significativas en las precipitaciones sobre estas mismas zonas (BEDOYA et al., n.d.).

Una disminución en las precipitaciones para la Región Andina, tendrá también una disminución en la erosión hídrica y la pérdida de suelo. Sin embargo, este proceso debe ser respaldado por medidas eficientes de restauración forestal en dichas zonas, y deben ser puestos en marcha planes y estrategias de prevención de la deforestación, buscando salvaguardar estas importantes zonas. La ausencia de cobertura vegetal en la cuenca de un río, también puede verse asociada a falta de precipitación, es decir, que largos periodos de sequía en la zona Andina pueden afectar el caudal de los ríos que circulan hacia el Caribe, siendo además causante de problemas graves de erosión en la ladera, tanto de tipo hídrico como se explicó anteriormente, como de tipo eólico (ECHAVARRIA et al., 2020). Esta última está estrechamente ligada a la presencia de fuertes vientos que levantan y transportan partículas del suelo.

En época de estiaje, las ciénagas y humedales, presentan un comportamiento en el flujo de agua inverso, es decir, que este va de las ciénagas a los ríos, lo que debilita enormemente estos sistemas, afectando su productividad, los organismos que allí habitan, y los habitantes de las poblaciones ubicadas en zonas cercanas, pues estos desarrollan actividades económicas como la pesca o la agricultura, que dependen del suministro de agua que estas fuentes les provisionan. El transporte de sedimentos que obstaculizan y taponan el flujo normal río-ciénaga-río, altera considerablemente su capacidad de almacenamiento y dificulta los procesos de amortiguación de los ecosistemas en épocas de bajas precipitaciones (AGUILERA, 2011).

La Ciénaga Grande de Santa Marta, en este caso, fue monitoreada durante el mes de marzo del 2019, una época de ausencia de precipitaciones en toda la Región Caribe, con valores menores a los 5mm para la estación de Santa Marta, en el Magdalena (IDEAM, 2019a). Estas condiciones potenciaron un aumento en la salinidad debido a los bajos aportes de ríos y caños, lo que genera una predominancia en el aporte de agua de mar. La transparencia del agua fue menor en la desembocadura de ríos y caños, a pesar de que las pocas precipitaciones se traducen en bajo aporte de sedimentos por parte de las fuentes hídricas, (Ver: **ANEXO H.** Variaciones espaciales de salinidad en la Ciénaga Grande de Santa Marta c) marzo 2019). Sin embargo, esta turbidez puede ser producto de la poca profundidad del cuerpo de agua, que sumada a los fuertes vientos característicos

de esta época el año; deja en evidencia los sedimentos del fondo del ecosistema, así como la re-suspensión de los mismos por la columna de agua (RICAURTE et al., 2019). Este fenómeno impide el paso de la luz solar desde la superficie al fondo del cuerpo de agua, dificultando procesos fotosintéticos, los cuales se encargan de regular la concentración de oxígeno disuelto en el ecosistema. Esto podría generar zonas de hipoxia y grandes afectaciones sobre organismos acuáticos.

El análisis de la información de la salinidad para esta ciénaga bajo escenarios de altas y bajas precipitaciones podría evidenciar que, aunque las precipitaciones en la zona Andina aumenten incrementando el caudal de ríos aguas abajo; la ausencia de precipitaciones en la zona de ubicación geográfica de estos cuerpos de agua, generaría un inminente incremento de la salinidad gracias al mayor aporte de agua proveniente de mar. Esto puede explicarse enfocándose en el comportamiento de los ríos originarios del Caribe, como el “Río Frío”, que hace parte de la subzona hidrográfica de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Un estudio realizado para este cuerpo de agua, muestra cómo, bajo unas condiciones de sequía extremas en la Región, el río va a disminuir rápidamente su caudal para los escenarios anuales analizados; además de presentar una sequía hidrológica de hasta 9 meses, luego de culminada la sequía meteorológica. Entonces, un déficit de precipitaciones en la estación húmeda donde tiene lugar la mayor parte de la recarga hídrica de estos cuerpos de agua; va a afectar el volumen de almacenamiento de los cuerpos de agua y extender las condiciones de sequía hasta la siguiente estación seca (HOYOS et al., 2019); lo que haría perdurar las altas concentraciones de salinidad en estuarios a pesar del aporte de agua dulce por parte de ríos interconectados con la Región Andina.

Con respecto a la falta de precipitaciones, es importante resaltar que el aumento del nivel del mar puede intensificar el aumento abrupto de parámetros en cuerpos de agua costeros como estuarios. Teniendo en cuenta la relación entre el aumento de mar y la salinidad en estuarios ya descrita, (Hong et al., 2020) demuestran un mayor incremento de la salinidad en temporada con ausencia de precipitaciones, debido a que el mar tendrá un aporte más relevante sobre el estuario, afectando un área mayor. Además, se espera el incremento de este parámetro en afluentes ubicados aguas arriba del estuario, modificando las condiciones de calidad de estos cuerpos de agua dulces; logrando un desplazamiento de los hábitats característicos de zonas salinas, a ríos, ciénagas y arroyos. Gracias al menor aporte de agua dulce a los estuarios en época seca, la salinidad tiende a ser mayor en lugares superiores del estuario, afectando también a sus afluentes. Durante estas situaciones, los organismos acuáticos también deben migrar hacia zonas donde las condiciones

sean óptimas para su supervivencia, movilizándose río arriba (Gillanders & Kingsford, 2002).

Siguiendo entonces los escenarios de cambio climático para el Caribe, que muestran reducciones en la precipitación y aumentos en la temperatura, es de esperarse perjudiciales valores de salinidad en cuerpos de agua que mantienen una relación bidireccional con el mar, recibiendo y descargando agua de manera continua.

Un escenario donde la época seca sea prolongada, y esté seguida de precipitaciones rápidas e intensas, puede ser el causante de situaciones de hipoxia que generan muerte masiva de especies en los cuerpos de agua, como sucedió en un estudio publicado por (Wong et al., 2018). Para el caso de la Región Caribe, la muerte de peces también está asociada a situaciones en época de sequía, como la ocurrida en el complejo de Pajarales, en la Ciénaga Grande de Santa Marta; donde las altas concentraciones de oxígeno disuelto fueron asociadas con gran actividad fotosintética y alta productividad de fitoplancton, que en presencia de luz solar (día), libera oxígeno e incrementa la concentración de materia orgánica; pero en ausencia de luz (noche), el oxígeno es consumido generando condiciones subóxicas y anóxicas, con concentraciones de oxígeno disuelto menores a los 2 mg/L; además de modificar los valores de pH durante el día, gracias al consumo de dióxido de carbono que inhibe la formación de ácido carbónico, lo que favorece condiciones de basicidad en el agua. La suma de esta serie de procesos es capaz de afectar drásticamente a los organismos acuáticos que habitan en estos ecosistemas, como quedó demostrado en este episodio en el año 2015 (INVEMAR, 2015).

## **11. IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS ANTROPOGÉNICOS Y SU APOORTE A LA AFECTACIÓN PRODUCIDA POR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN CUERPOS DE AGUA DULCE SUPERFICIALES DE LA REGIÓN CARIBE**

Los cuerpos de agua superficiales han sido altamente alterados debido al uso permanente que se les da por parte de las comunidades, en actividades antropogénicas que pueden ir desde la alimentación, el cultivo, la ganadería, sanidad, recreación, hasta procesos productivos de toda índole (IDEAM, 2019b), lo que visibiliza una problemática que se ha acrecentado al punto de poner el riesgo las especies de fauna y flora que habitan en estos ecosistemas superficiales, los procesos hidrológicos que sustentan dichos sistemas e incluso, incrementar los impactos ambientales negativos de procesos climáticos tales como el cambio climático, y dificultando más el acceso a agua de calidad para consumo.

El ilimitado uso de agua de cuerpos superficiales, genera un factor de riesgo asociado a los vertimientos de tipo puntual o difuso con o sin tratamiento (IDEAM, 2019b). Estos últimos, producto una limitada gestión del recurso hídrico, así como de una pobre inversión estatal a nivel local, regional o nacional, que impide la construcción y puesta en marcha de procesos de tratamiento eficaces para agua residual, con el fin de salvaguardar la calidad física, química y biológica de los ecosistemas que, son a su vez, el destinatario final de incalculables volúmenes de agua con altas concentraciones de contaminantes. La ausencia de esta infraestructura se ha evidenciado en asentamientos humanos ubicados en la vía Ciénaga-Barranquilla (Tasajera, e Isla del Rosario), así como al interior de ella, en poblados como Bocas de Aracataca, Buena Vista y Nueva Venecia (AGUILERA, 2011a).

Aunque las actividades económicas en el Caribe colombiano que más han mostrado un crecimiento significativo por sectores, según estudios realizados en el año 2010, son: el sector industrial en el Atlántico y Bolívar, y el sector minero en Cesar, Córdoba y Bolívar; las comunidades asentadas en territorios del Caribe Colombiano aún hacen uso de los cuerpos de agua dulce superficial para actividades de tipo agropecuario, manteniendo una relevancia en la región a pesar de sus bajos niveles de crecimiento. El sector secundario presentó una mayor dinámica de crecimiento con un 4,7%, seguido del terciario con 4,5% y terminando con el primario con un crecimiento del 3,5% anual (DÍAZ et al., 2013). Esto, por su parte, demuestra que hay actividades que, aunque con pobre capacitación, tecnificación y mano de obra poco calificada (DÍAZ et al., 2013), siguen siendo prioritarias para ciertos sectores poblacionales; pero también, evidencia una

precarización de las condiciones laborales, sociales, económicas y ambientales que facilitan que los procesos productivos del sector agropecuario se realicen con calidad, y que aseguran un uso responsable de los recursos, así como una protección integral de los actores involucrados; imposibilitando un desarrollo sostenible y generando un impacto negativo sobre el ambiente.

Varios estudios realizados a lo largo de los años, muestran cómo y en qué medida han sido afectadas las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua dulce superficiales en diversos puntos de la Región Caribe colombiana. Este es el caso de las afectaciones registradas en el bosque de manglar en Puerto Colombia, un ecosistema clave para las dinámicas ambientales características de las costas, y su relación con los procesos acuáticos de la superficie. La construcción de estructuras flexibles cuyo objetivo es la protección de la costa a través del control de los cauces de los cuerpos de agua (espolones o espigones)(ACE GEOSYNTHETICS, 2020), han generado un problema de erosión, que, sumado al desplazamiento de islas de protección por acción de los vientos, ha dejado altamente desprotegido al bosque de manglar, reduciendo considerablemente su tamaño y alterando los procesos naturales que allí tienen lugar (H. SÁNCHEZ et al., 2016). Estas estructuras, aunque buscando proteger los cuerpos de agua donde son instaladas, así como las costas y territorios aledaños a las mismas; generan una problemática de acumulación de sedimentos por alteraciones del flujo fluvial, lo que impide su transporte natural a otros ecosistemas que deben ser alimentados por ciertas concentraciones necesarias para el normal funcionamiento y supervivencia de especies. Además de lo anterior, la rectificación de cauces de cuerpos de agua de mayor tamaño y la disminución de la cota de ríos o arroyos que suministran recursos a los ecosistemas de manglar; son características indispensables cuya ausencia termina provocando problemas de erosión, afectaciones paisajísticas, pérdida de la capacidad de autoregeneración, exposición directa a variaciones climáticas y condiciones marítimas extremas, e incluso, pérdida irreparable de especies que controlan tanto la carga contaminante que ingresa al mar producto de vertimientos residuales, como la protección de las poblaciones a procesos naturales que tienen lugar en el mar (H. SÁNCHEZ et al., 2016)(H. SÁNCHEZ et al., 2016).

Además de lo anterior, muchos otros impactos asociados a actividades antropogénicas en cuerpos de agua dulce, documentados por estudios en la región Caribe, se enfocan en actividades de tipo agropecuario, turístico, del sector de hidrocarburos y marítimo portuario, tal y como se puede ver a continuación.

Tabla 3. Afectación de ecosistemas marino-costeros/impactos y sector vinculado

	T	P	H	M
Quema y retiro de suelo vegetal/deforestación	X	X	X	X
obras de infraestructura que ocupan playa / pérdida vegetación, erosión costera, desecamiento de cuerpos de agua	X		X	X
Destrucción de áreas de manglar /desprotección ante olas, pérdida de fauna, desregulación climática	X	X	X	X
Construcción de canales y vías /Alteración de los sistemas de drenaje de los sistemas lagunares	X		X	X
Obras de dragado / desestabilización de hábitats costeros. Sedimentación	X		X	X
Derrame de sustancias tóxicas/muerte de especies, Afectación genética	X		X	X
Contaminación por aguas de lastre / arribo de especies invasoras	X	X		XX
Derrame de hidrocarburos (6) /muerte de especies, afectación genética	X	X	X	X
Exploración de hidrocarburos, Sísmica marina (7), /Contaminación acústica daño de sistemas de orientación de especies marinas	X	X	X	X
Sobrepesca /extinción de recursos pesqueros			X	
Ocupación ilegal de área protegida / desestabilización de hábitats	X	X		
Urbanización costera/ erosión pérdida de hábitats, aporte de escombros			X	
Capacidad de carga no respetada (8) / alteración de hábitats, compactación de suelo	X	X		
Construcción de espolones / sedimentación, represamiento de aguas	X		X	X
vertido de aguas residuales y de sentina/contaminación marina y fluvial	X	X	X	X
Apertura de bosque para visitantes/ compactación de suelos. Retiro de especies	X			X
Explosivos/ pérdida de especies, afectación del sentido de orientación en peces		X	X	
Deportes subacuáticos y visitas de turistas/disturbio de ciclos biológicos, retiro de especies	X	X		
Desviación y rectificación de cauces / afectación del régimen hídrico	X		X	
Extracción ilegal de flora y fauna / Agotamiento de recursos	X			
Acaparamiento y desviación de cauces hídricos / agotamiento del recuso, alteración de ciclos biológicos,	X			

erosión				
Uso de anticorrosivos para mantener estructuras submarinas/contaminación			X	X
Perturbación cultural a comunidades	X	X	X	X
Perturbación de ciclos biológicos de fauna y flora	X	X	X	X

**Fuente:** (DÍAZ CASTRO, 2015)

Esta división por sectores económicos permite establecer de mejor manera, tanto los impactos como su mitigación y control. Vale la pena destacar que el sector comercio, transporte, alojamiento y servicios de comida; tuvo un aporte de 0,9 puntos porcentuales en el crecimiento del 3,3% en el PIB del país para el año 2019 (DANE, 2020), lo que demuestra que sus actividades deben ser potenciadas con el fin de contribuir positivamente al desarrollo nacional. También es posible analizar un escenario desfavorable para llevar a cabo estas actividades turísticas a raíz de la pandemia producto del virus COVID-19, que llevó a los gobiernos a tomar medidas drásticas para restringir la movilidad y condicionar las aglomeraciones a partir del año 2020. En ese caso particular, El DANE (2021) arrojó cifras preocupantes sobre el decrecimiento económico del país en este periodo crítico, mostrando las graves consecuencias que acarrea que las actividades del sector, no se generen con normalidad. Para el año de 2020, tuvieron un retroceso en 15,1%, contribuyendo -3,0 puntos porcentuales a la desfavorable cifra de 6,8% de decrecimiento en el PIB del país (DANE, 2021).

### **11.1 IMPACTOS GENERADOS POR EL TURISMO**

A pesar del enorme aporte económico del sector turístico al desarrollo del país, este sector también ha demostrado sus impactos negativos sobre el ambiente. Y en la Región Caribe, el turismo es un pilar fundamental para el crecimiento de su economía. En su territorio se desarrollan diversos tipos de turismo, como el histórico, cultural, étnico, ecológico, de sol y playa; impulsados principalmente por su privilegiada ubicación geográfica, donde con 1600 km<sup>2</sup> de costa, se convierte en un atractivo turístico internacional obligatorio, teniendo como principales destinos Atlántico, Cartagena, Magdalena y San Andrés (AGUILERA et al., 2017). El uso de infraestructura fundamental para el desarrollo de actividades turísticas como alojamiento, vías de comunicación, alcantarillados, tratamiento de aguas residuales, suministro de energía y zonas deportivas, generan macro impactos sobre el ambiente, afectando directamente y de manera enorme los ecosistemas sobre los cuales se desarrollan dichas actividades. Las aguas superficiales costeras de la Región, se han visto modificadas en la ocupación o uso de suelo. Al buscar más territorio para la construcción de estructuras de alojamiento, se ocupan terrenos o

zonas inundables que son fundamentales para humedales, ciénagas o manglares, lo que modifica sus dinámicas hidrológicas por deforestación, pérdida de especies, modificación del régimen hidrológico, reducción de zonas de recarga hídrica, pérdida de vegetación y zonas de ribera y erosión; además la cercanía humana con estos frágiles ecosistemas es mayor en estos casos, posibilitando el aumento en los vertimientos directos sobre estos ecosistemas, los cuales tienen una enorme carga orgánica y plástica, que puede traducirse en problemas como eutrofización o presencia de plásticos (PICORNELL, 1993).

## **11.2 IMPACTOS GENERADOS POR RESIDUOS PLÁSTICOS**

El creciente uso de productos plásticos, por su parte, impacta directamente sobre cuerpos de agua superficial, creando un problema de contaminación por estos residuos. Estos, al ser depositados en dichas zonas, o arrastrados por corrientes provenientes de otros cuerpos de agua, se acumulan peligrosamente en el interior de los ecosistemas, y debido a su lenta biodegradación, pueden permanecer siglos afectando la salud de seres vivos. Varios estudios se han encargado de documentar las diversas afectaciones de los residuos sobre cuerpos de agua de gran importancia ambiental, mostrando que la contaminación por plásticos en el mar, repercute considerablemente sobre ecosistemas acuáticos en las costas, donde, por acción de la marea, las inundaciones o los vientos; estos residuos terminan enterrándose en los sedimentos de manglares, atrapados en ramas de especies de flora características, e incluso, siendo ingeridos u obstaculizando procesos naturales de especies de fauna que allí habitan (Ivar do Sul et al., 2014). Aquellos residuos o escombros que sufren enterramiento en sedimentos de manglares, sufren una degradación muy lenta, pero que terminará convirtiendo grandes trozos de plástico en partículas microscópicas que serán finalmente, ingeridas por el hombre (CASTAÑETA et al., 2020). Los mayores impactos de la acumulación de plásticos en cuerpos de agua superficial, así como de su posterior degradación a microplásticos, están ligados a sus capacidades para ser coctéles de sustancias tóxicas que pueden absorber, adsorber y liberar fácilmente. Según la literatura, estos objetos son capaces de interactuar con hidrocarburos, aditivos químicos, DDT y hasta metales pesados. Esta capacidad, también les permite comportarse como sustrato para microorganismos patógenos (CASTAÑETA et al., 2020). Su inevitable consumo por parte de organismos acuáticos, los convierte en un aspecto de contaminación que cambia los procesos físicos, químicos y biológicos de dichos organismos. Así lo muestran autores que, haciendo una evaluación y una recopilación de las consecuencias de la ingesta de microplásticos en peces, han demostrado que dichos elementos, dependiendo su tamaño, pueden encontrarse

en diversos órganos internos de organismos acuáticos, además de generar una mayor bioacumulación de metales pesados en el hígado de estos organismos al incrementar su concentración a través de procesos de sorción, produciendo estrés oxidativo y alterando procesos de respiración y acumulación. Algunas especies pueden mostrar consecuencias hepáticas meses después de ser expuestas. De manera preocupante, se encontró la presencia de microplásticos en heces de animales acuáticos, lo que confirma, no solo su enorme impacto negativo directo, sino su inevitable transferencia a través de niveles tróficos por vías indirectas (ESCOBAR et al., 2019).

### **11.3 IMPACTOS GENERADOS POR LA MINERÍA**

Actividades de minería y extracción de metales en el Caribe, han dejado enormes impactos sobre ecosistemas acuáticos. La problemática de acumulación de metales pesados en cuerpos de agua superficiales, está directamente derivada de este sector económico, que tiene gran representación en la Región con productos como carbón y ferroníquel originados en la Guajira, Cesar y Córdoba (DÍAZ et al., 2013), así como la extracción de oro y la quema de amalgamas, actividades características del sur de Bolívar, generando un impacto directo sobre los Ríos Magdalena y Cauca (CENTRO DE FORMACION DE LA COOPERACION ESPAÑOLA EN CARTAGENA DE INDIAS, 2011). Estudios enfocados en determinar el nivel de contaminación a causa de metales pesados en cuerpos de agua superficial en la Región Caribe, muestran preocupantes concentraciones en fuentes de agua de las que, generalmente, se suministran las comunidades aledañas. Este es el caso de la ciénaga de Ayapel, en donde se llevaron a cabo estudios sobre la presencia de mercurio en la población del municipio, al documentarse diferentes síntomas propios de una intoxicación derivada de este contaminante. Se hicieron análisis de cabellos de pobladores, así como de individuos de ciertas especies ícticas de este ecosistema, dando como resultado concentraciones promedio de 2,18  $\mu\text{g/g}$  (superior al límite de 1  $\mu\text{g/g}$  establecido por normas internacionales) (United States Environmental Protection Agency, 1997). En peces, por su parte, la concentración fue 0,743  $\mu\text{g/g}$ , lo que evidencia que, en poblaciones asentadas en riveras de cuerpos de agua dulce, el consumo recurrente de este tipo de animales, afecta directamente la salud de pobladores y pone en peligro su vida, lo que se traduce en un inmenso problema de salud pública que va en aumento (GRACIA et al., 2010). En la ciénaga de Zapatosa, ubicada entre los municipios de Chimichagua, Curumaní, Tamalameque y El Banco; y de importancia internacional pues en el año de 2018 fue declarado el humedal continental más grande de agua dulce del país (MADS, 2018), se han realizado estudios que, buscando complementar la

información sobre contaminación en cuerpos de agua dulce, realizaron mediciones de la concentración de mercurio en peces encontrados en dicho ecosistema. La Ciénaga pertenece al cauce el Río Magdalena, donde se realizan actividades permanentes de extracción y minería, tanto de manera legal como ilegal, lo que repercute directamente sobre todos los sistemas acuáticos que lo tengan como afluente. Los peces analizados fueron tomados en diversos puntos de la ciénaga, tanto próximos como alejados al Río Magdalena. Los resultados, por su parte, arrojan concentraciones de 1,3 µg/g en la estación más próxima, y 0,009 µg/g, en el punto más alejado. Además de lo anterior, el estudio asegura que todos los individuos muestreados presentaron concentraciones de mercurio (VANEGAS et al., 2010).

#### **11.4 IMPACTOS GENERADOS POR INFRAESTRUCTURA**

La pérdida de vegetación, retiro de especies, afectación a hábitats y procesos ecosistémicos, son, sin duda, de los mayores impactos a largo plazo producidos por el hombre. Las dinámicas poblacionales que van en aumento, han generado muchos de estos problemas, afectando las fuentes de agua dulce superficial de las que hacen uso y complicando el panorama ambiental de la Región. La Ciénaga de Mallorquín, en la jurisdicción de Barranquilla y Puerto Colombia, ha sido afectada desde hace décadas por problemas diversas actividades humanas. En un primer momento, la construcción de estructuras como tajamares, dificultaron drásticamente las dinámicas hidrológicas entre este cuerpo de agua y el Río Magdalena, restringiendo procesos hidrológicos y de transporte de sedimentos que modificaron el equilibrio del ecosistema y su función, pasando a ser una laguna costera. Por otro lado, el uso de territorios cercanos al cuerpo de agua como botaderos de residuos a cielo abierto, generó un enorme problema de contaminación en suelos, agua y aire, además de afectaciones a la salud de residentes. A pesar de la suspensión de su servicio, los planes de mitigación y restauración no han sido aplicados de manera eficiente (de LIMA et al., 2008).

#### **11.5 IMPACTOS GENERADOS POR MALA DISPOSICIÓN DE RESIDUOS**

Los enormes impactos de los botaderos de basura a cielo abierto en el recurso hídrico están ligados con la existencia de lixiviados, que son el líquido residual generado por la descomposición biológica de la parte orgánica o biodegradable de los residuos sólidos bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas y/o como resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación; que resultan teniendo movimientos verticales afectando acuíferos subterráneos, así

como movimientos horizontales, afectando la superficie que recorre, contaminando fauna y flora a su paso, hasta alcanzar una fuente de agua superficial(UAESP, n.d.). Acá, tienen lugar diferentes procesos que alteran las características de calidad, pues los lixiviados traen consigo altas concentraciones de materia orgánica y sustancias tóxicas. Estas, por su parte, incrementan la carga orgánica del agua, disminuyendo también las concentraciones de oxígeno disuelto y generando un aumento de nutrientes y presencia de elementos físicos de diversos tamaños, quienes alteran el aspecto del ecosistema, y pueden ser consumidos por los organismos que allí habitan(TICONA & MILAGROS, 2020). El país cuenta con 101 botaderos de residuos a cielo abierto, para el año 2018. La Región Caribe, por su parte, mantiene en funcionamiento 37 botaderos, a pesar de las recomendaciones normativas que proponen su cierre inmediato; por su parte, los Departamentos con mayor número de botaderos son: Bolívar con 22, Magdalena con 12, Cesar con 2, y, por último, La Guajira con 1 botadero (SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS Y DOMICILIARIOS & DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, 2018).

## **11.6 IMPACTOS GENERADOS POR ASENTAMIENTOS HUMANOS**

Las actividades cotidianas de la población circundante a cuerpos de agua dulce superficial, generan una gran cantidad de aguas residuales de diversa índole que, a falta de plantas de tratamiento y procesos adecuados, son vertidas directamente sobre los cuerpos de agua, impactando negativamente los procesos físicos, químicos y biológicos que allí tienen lugar, afectando las características de calidad del agua, así como su equilibrio ecosistémico. En el caso de la Ciénaga Mallorquín, se encontró una enorme contaminación producto de los vertimientos residuales domésticos de los municipios ubicados aguas arriba de dos arroyos que alimentan la ciénaga, y que, debido a su falta de tratamiento, han descargado enormes concentraciones de material orgánico, colmatando el sistema, inhibiendo sus procesos naturales de depuración, y aportando peligrosas cargas de contaminación microbiológica (de LIMA et al., 2008).

Los asentamientos humanos han impactado de diversas formas los cuerpos de agua superficial, comprometiendo no solo la extensión de los mismos sobre la superficie, sino también alterando el régimen hidrológico y procesos de recarga hídrica que dependen de una zona de protección donde ocurre infiltración. Esto, por su parte, está estrechamente ligado a los pocos o nulos controles en materia de ordenamiento territorial y protección del recurso hídrico, impidiendo una delimitación consecuente a las necesidades de la población, pero también, protegiendo los ecosistemas de la intervención directa y negativa de las comunidades. El avance

desproporcionado de las comunidades a la Ciénaga a través de la ganancia de terreno habitable con la adición de escombros y otros materiales, afecta de manera drástica el sistema acuático y sus procesos, generando deforestación, erosión, y vertimiento directo de agua residual sin tratamiento sobre los ecosistemas. Los pobladores que invaden estas zonas hacen uso de los mismos para actividades de tipo agrícola y pecuario sin regulación, generando un fenómeno de contaminación por productos agroquímicos u orgánicos tales como fosfatos o nitratos presentes en fertilizantes (eutrofización), así como la extracción indiscriminada de peces mediante prácticas inadecuadas, lo que impide su repoblación y la consecuente regulación del ecosistema; esto, sin duda, modificando la cadena trófica y el equilibrio del mismo (de LIMA et al., 2008). Así lo expone Cormagdalena (, cuyos estudios analizan la contaminación provocada en la Ciénaga Grande de Santa Marta a raíz de residuos agroquímicos (nutrientes y plaguicidas), que son provenientes de la vertiente occidental de la Sierra Nevada, corrientes de agua derivadas del Río Magdalena, y asentamientos humanos localizados en la ribera nororiental del complejo lagunar; sus impactos están relacionados con eutrofización que generó algunos casos de mortandad de peces y aumento de bacterias de origen fecal (MAVDT, 2017). En el caso de la Guajira, se han identificado diversas problemáticas por municipios específicamente con el recurso hídrico, ya que debido a sus condiciones climáticas y épocas de marcada sequía, la población ha vivido constantes dificultades en cuanto al abastecimiento de agua, siendo este un factor primordial en las dinámicas sociales del departamento. La comunidades, por su parte ha llevado a cabo enormes procesos de deforestación en las cuencas principales del territorio, lo que ha empeorado el desabastecimiento de agua, además de generar impactos sobre la estructura de estas, erosión, pérdida de biodiversidad, pérdida de suelos, expansión de la frontera agrícola, construcción de estructuras que modifican el cauce de los cuerpos de agua y su consecuente sobreexplotación, y una permanente contaminación y degradación de los recursos naturales (CORPOGUAJIRA, 2018). Las condiciones de pobreza de las comunidades que se ven obligadas a hacer uso de zonas de importancia ambiental para garantizar su supervivencia, construir una vivienda, o desarrollar actividades económicas diversas; deben ser seriamente evaluadas y requieren medidas de inversión estatal enfocadas tanto en solventar necesidades básicas y mejorar la calidad de vida de los pobladores, como también, buscando garantizar la protección y gestión de los bienes y servicios brindados por ecosistemas acuáticos de tanta relevancia en la Región, con lo cual se verán disminuidos considerablemente estos negativos impactos.

La variabilidad climática afecta seriamente el crecimiento económico de las regiones, así como prolongar la pobreza en poblaciones altamente vulnerables. Principalmente, la variabilidad hidrológica que está dada por los cambios en precipitaciones, tiene afectaciones directas sobre paisajes, producción agrícola, industrias que hacen uso del agua, y producción de energía eléctrica. Por esta razón, el cambio climático representa una amenaza al limitar el rendimiento estimado de los cuerpos de agua dulce superficiales para las poblaciones. Por lo tanto, cada una de las estrategias alrededor del análisis, la identificación de impactos, el uso de metodologías, la puesta en marcha de planes y estrategias alrededor del agua; deben tener como desafío inmediato el sostenimiento de la seguridad hídrica en un contexto de cambio climático, es decir, contemplando todas las posibilidades, escenarios y relaciones sobre las que este fenómeno tenga incidencia (SADOFF & MULLER, 2010).

## 12. ESQUEMA DE INTERCONEXIÓN

La investigación logró la identificación de los posibles impactos del cambio climático sobre los cuerpos de agua dulce superficiales de la Región Caribe; bajo escenarios proyectados para la variabilidad de parámetros climáticos regionales, permitiendo una visión más clara de las implicaciones sobre dichos ecosistemas. Sin embargo, durante la realización de este documento, se hicieron evidentes una serie de relaciones que tienen un enorme valor a la hora de identificar correctamente los impactos, pues comparten procesos que les hacen depender una de la otra. Dicho de otro modo, los ámbitos sociales, económicos, ambientales, geográficos y físicos están vinculados unos a otros, tanto en causas como en consecuencias.

Los impactos sobre cuerpos de agua dulce dentro de la Región Caribe van a depender de los impactos en otras regiones con las que tienen conexión directa; así como de la presión positiva o negativa que ejerzan las actividades humanas de diversa índole, sobre estos ecosistemas de manera directa o indirecta y en valores distintos.

Para lograr simplificar la información y mostrar de manera directa las interconexiones que permiten la correcta identificación de los impactos, se hace uso de un esquema que facilita la comprensión de la investigación, además de ser una herramienta útil que puede ser analizada y complementada por cualquier persona desee ahondar e investigar a fondo esta problemática.

(Ver: **ANEXO I**. Esquema: Identificación de impactos del cambio climático en cuerpos superficiales de agua dulce de la Región Caribe colombiana).

### **13. CONCLUSIONES**

El trabajo realizado evidenció la necesidad urgente de generar investigación con el fin de identificar los impactos que el cambio climático genera, no solo sobre los cuerpos de agua superficiales por regiones geográficas, sino sobre los bienes y servicios hídricos a nivel nacional.

La interconectividad entre zonas geográficas es un factor primordial a la hora de proponer planes de mitigación o adaptación al cambio climático; pues, como se demostró durante todo el documento, cada proceso aislado tiene un impacto a nivel general.

Tanto la identificación de impactos, como la puesta en marcha de soluciones adaptativas frente al cambio climático, requieren una caracterización de las condiciones geográficas, climáticas, topográficas, hidrológicas y socio-económicas; que conformen el contexto de cada cuerpo de agua dulce superficial que se requiera analizar. La razón, radica en la incertidumbre que aún existe frente a los posibles escenarios propuestos, la falta de investigación local alrededor de dichos sistemas hidrológicos y la adopción o aplicación de estrategias y metodologías diseñadas para sistemas con contextos diferentes.

Los entes nacionales deben generar un enfoque que busque disminuir y controlar al máximo cada uno de los impactos antropogénicos que tengan incidencia sobre el correcto funcionamiento de cuerpos de agua dulce superficiales. Se pudo evidenciar al realizar la investigación, que estos impactos producto de actividades antropogénicas, son decisivos a la hora de recrudecer los efectos del cambio climático sobre estos sistemas.

La Región Caribe será una región altamente afectada por las variaciones que el cambio climático traerá en el corto, mediano y largo plazo. Como fue evidente en el transcurso del documento, cualquiera sea el escenario de precipitaciones en la Región Andina, habrá repercusiones graves sobre los cuerpos de agua dulce superficiales en dicha zona, así como sobre los factores directa o indirectamente conectados a estos.

## BIBLIOGRAFIA

- Abrahams, C. (2008). Climate change and lakeshore conservation: a model and review of management techniques. In *Ecological Effects of Water-Level Fluctuations in Lakes*. Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9192-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9192-6_5)
- ACE GEOSYNTHETICS. (2020). *Protección de riberas y canales: Espigones*.
- AGUA.ORG. (n.d.). *Cuerpos de agua*.
- AGUILERA, M. (2011a). *Habitantes del agua: el complejo lagunar de la ciénaga Grande de Santa Marta* (Banco de la República, Ed.; Vol. 144).
- AGUILERA, M. (2011b). *La economía de las ciénagas del Caribe Colombiano*.
- AGUILERA, M., REINA, Y., OROZCO, A., YABRUDY, J., & BARCOS, R. (2017). Evolución socioeconómica de la región Caribe colombiana entre 1997 y 2017. *Revista Del Banco de La República*, 1078.
- Altieri, A. H., & Gedan, K. B. (2015). Climate change and dead zones. *Global Change Biology*, 21(4). <https://doi.org/10.1111/gcb.12754>
- ALVARADO, M., ARMENTERAS, D., DÍAZ, J., GARCÍA, C., GARZÓN, J., HERMELIN, M., LOPEZ, E., MARTINEZ, J., MIRANDA, J., RESTREPO, J., RODRIGUEZ, N., & ZAPATA, P. (2005). Ecosistemas naturales de la Cuenca del Río Magdalena. In Fondo editorial Universidad EAFIT & COLCIENCIAS (Eds.), *Los sedimentos del Río Magdalena: Reflejos de la crisis ambiental*.
- ANGARITA, H., DELGADO, J., WICKE, B., & ESCOBAR, M. (2016). *Biodiversidad, ecosistemas de humedal y riesgo de inundación: Implicaciones de la expansión hidroeléctrica en la cuenca del río Magdalena*.
- ARANGO, C., DORADO, J., GUZMÁN, D., & RUIZ, J. (2015). *Climatología trimestral en Colombia*. .
- BATES, B., KUNDZEWICZ, Z. W., WU, S., & PALUTIKOF, J. (2008). *EL CAMBIO CLIMÁTICO Y EL AGUA*.
- BATISTA, M. (2020, January 15). *En Cartagena los peces no solo se mueren por falta de oxígeno* .

- Bayley, P. B. (1991). The flood pulse advantage and the restoration of river-floodplain systems. *Regulated Rivers: Research & Management*, 6(2). <https://doi.org/10.1002/rrr.3450060203>
- BEDOYA, M., CONTRERAS, C., & RUIZ, F. (n.d.). *Alteraciones del régimen hidrológico y de la oferta hídrica por variabilidad y cambio climático.*
- BRIEVA, L., & RAMIREZ, L. (2020). Diagnóstico ambiental del Canal del Dique: determinación de la calidad del agua y generación de residuos sólidos. *GIPAMA*, 2, 72–79.
- CÁCERES, A. (2019). Estudio de los cuerpos lénticos en el escenario de cambio climático, una mirada a Colombia. *Revista Pertinencia Académica*, 3(3), 29–50.
- CALIFORNIA WATER BOARDS. (n.d.). *Folleto Informativo Conductividad Eléctrica/Salinidad* .
- CAMARGO, J., & ALONSO, A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Ecosistemas*, 6(2), 98–110.
- CARPIO, T. (2007). *Turbiedad por nefelometría (metodo b)* .
- CASTAÑETA, G., GUTIERREZ, A., NACARATTE, F., & MANZANO, C. (2020). Microplásticos: un contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición. *Revista Boliviana de Química*, 37(3).
- CASTELLANOS, C. A. (2001). Los ecosistemas de humedales en Colombia. *Revista Luna Azul*, 13, 1–5.
- CASTELLANOS, P. (2007). *Ecología aguas dulces: clasificación ecológica de los organismos de agua dulce* .
- CENTRO DE FORMACION DE LA COOPERACION ESPAÑOLA EN CARTAGENA DE INDIAS. (2011). *Biodiversidad y Turismo para un desarrollo sostenible.*
- Chan, F., Barth, J. A., Lubchenco, J., Kirincich, A., Weeks, H., Peterson, W. T., & Menge, B. A. (2008). Emergence of Anoxia in the California Current Large Marine Ecosystem. *Science*, 319(5865). <https://doi.org/10.1126/science.1149016>

- CIOH. (2018). *Épocas climáticas en el Caribe colombiano: época seca o época de verano*.
- Codd, G. A., Lindsay, J., Young, F. M., Morrison, L. F., & Metcalf, J. S. (n.d.). Harmful Cyanobacteria. In *Harmful Cyanobacteria*. Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3022-3\\_1](https://doi.org/10.1007/1-4020-3022-3_1)
- CONAFAR. (2009). *La reforestación de los manglares en la costa de Oaxaca, manual comunitario*.
- CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. (2014, November).
- CONSEJO REGIONAL DE PLANEACIÓN DE LA COSTA ATLÁNTICA. (1992). *El Caribe colombiano Realidad ambiental y desarrollo Consejo regional de Planeación de la Costa Atlántica CORPES*. undefined-275.
- Coops, H., Beklioglu, M., & Crisman, T. L. (2003). The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems – workshop conclusions. *Hydrobiologia*, 506–509(1–3). <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000008595.14393.77>
- CORDY, G. (1965). *General Interest Publication*.
- CORMAGDALENA. (2007). *Atlas Cuenca Del Río Grande De La Magdalena* (1st ed.).
- CORNELIUS, S. (2015, November 12). *El impacto del cambio climático sobre las especies*. WWF. <https://wwf.panda.org/es/?256070/El-impacto-del-cambio-climtico-sobre-las-especies#:~:text=Stephen%20Cornelius,Una%20de%20cada%20seis%20especies%20est%C3%A1%20en%20peligro,como%20consecuencia%20del%20cambio%20clim%C3%A1tico.&text=En%20estos%20casos%2C%2>
- CORPOGUAJIRA. (2018). *Plan integral de cambio climático del departamento de la Guajira. Formulación del plan integral del cambio climático (PICC), del departamento de la Guajira con implementación de medidas tempranas de adaptación Informe principal 2018-2030*.
- DANE. (2020). *Boletín Técnico. Producto Interno Bruto (PIB)*.
- DANE. (2021). *Boletín Técnico. Producto Interno Bruto (PIB). Producto Interno Bruto (PIB). IV trimestre 2020*.

- de BERRIOS, O., & BRICEÑO DE GOMEZ, M. (2009). Enfoques epistemológicos que orientan la investigación de 4to. nivel. *Visión General*.
- de LIMA, W., GÓMEZ, A., & RIPOLL, A. (2008). *Impacto ambiental por el crecimiento poblacional acelerado sobre la ciénaga de Mallorquín*.
- DÍAZ CASTRO, M. (2015). Afectación y protección de ecosistemas marino costeros en Colombia. *Revista VERBUM*, 10(10).
- DIAZ, J. M. (2007). *Deltas y estuarios de Colombia* (Banco de Occidente, Ed.).
- DIAZ, J. M. (2014). *Región Caribe de Colombia* (Banco de Occidente, Ed.).
- DÍAZ, M., ARANZA, Y., OROZCO, A., VEGA, J., & BARCOS, R. (2013). *Ensayos sobre economía regional: Composición de la economía de la Región Caribe de Colombia* (Centro Regional de estudios económicos, Ed.).
- DIFFENBAUGH, N. S., & BURKE, M. (2019). Global warming has increased global economic inequality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(20). <https://doi.org/10.1073/pnas.1816020116>
- DNP, IDEAM, & SNGRD. (2011). *Plan nacional de adaptación al cambio climático*.
- Du, J., Shen, J., Zhang, Y. J., Ye, F., Liu, Z., Wang, Z., Wang, Y. P., Yu, X., Sisson, M., & Wang, H. v. (2018). Tidal Response to Sea-Level Rise in Different Types of Estuaries: The Importance of Length, Bathymetry, and Geometry. *Geophysical Research Letters*, 45(1). <https://doi.org/10.1002/2017GL075963>
- ECHAVARRIA, F., MEDINA, G., & RUIZ, J. (2020). Efecto en la erosión hídrica del suelo en pastizales y otros tipos de vegetación por cambios en el patrón de lluvias por el calentamiento global en Zacatecas. *Rev. Mex. de Cienc. Pecuarias*, 11, 63–74.
- EDUCACIÓN AMBIENTAL EN LA REPÚBLICA DOMINICANA. (2020, May). *Ecología aguas dulces: clasificación ecológica de los organismos de agua dulce*. .
- el HERALDO. (2015, December 3). *Magdalena*.
- el TIEMPO. (2015, October 4). *Erosión de la cuenca del río Magdalena alcanza el 78%*. .
- Elliott, J. A., Jones, I. D., & Thackeray, S. J. (2006). Testing the Sensitivity of Phytoplankton Communities to Changes in Water Temperature and Nutrient

- Load, in a Temperate Lake. *Hydrobiologia*, 559(1).  
<https://doi.org/10.1007/s10750-005-1233-y>
- EMPRESA URRRA S.A. (n.d.). *Gestión Técnica*.
- EQUIPO EDITORIAL ETECÉ. (n.d.). *Recursos naturales*.
- ESCOBAR, E., IZQUIERDO, Y., MACEDO, A., & REMUZGO, G. (2019). Impacto de la ingesta de residuos plásticos en peces. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, 4, 79–92.
- Ficklin, D. L., Stewart, I. T., & Maurer, E. P. (2013). Effects of climate change on stream temperature, dissolved oxygen, and sediment concentration in the Sierra Nevada in California. *Water Resources Research*, 49(5).  
<https://doi.org/10.1002/wrcr.20248>
- Forsius, M., Saloranta, T., Arvola, L., Salo, S., Verta, M., Ala-Opas, P., Rask, M., & Vuorenmaa, J. (2010). Physical and chemical consequences of artificially deepened thermocline in a small humic lake – a paired whole-lake climate change experiment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(12).  
<https://doi.org/10.5194/hess-14-2629-2010>
- Gillanders, B., & Kingsford, M. (2002). *Impact of Changes in Flow of Freshwater on Estuarine and Open Coastal Habitats and the Associated Organisms*.  
<https://doi.org/10.1201/9780203180594.ch5>
- Göransson, G., Larson, M., & Bendz, D. (2013). Variation in turbidity with precipitation and flow in a regulated river system – river Göta Älv, SW Sweden. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7). <https://doi.org/10.5194/hess-17-2529-2013>
- Goudie, A. (1993). Human influence in geomorphology. *Geomorphology*, 7(1–3).  
[https://doi.org/10.1016/0169-555X\(93\)90011-P](https://doi.org/10.1016/0169-555X(93)90011-P)
- GRACIA, L., MARRUGO, J., & ALVIS, E. (2010). . Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 28(2).
- Graham, J. L., Jones, J. R., Jones, S. B., Downing, J. A., & Clevenger, T. E. (2004). Environmental factors influencing microcystin distribution and concentration in the Midwestern United States. *Water Research*, 38(20).  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.08.004>

- GUZMÁN, D., RUIZ, J., & CADENA, M. (2014). *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través de análisis de componentes principales (ACP)*.
- Halsey, L. G., Matthews, P. G. D., Rezende, E. L., Chauvaud, L., & Robson, A. A. (2015). The interactions between temperature and activity levels in driving metabolic rate: theory, with empirical validation from contrasting ectotherms. *Oecologia*, 177(4). <https://doi.org/10.1007/s00442-014-3190-5>
- HERNANDES, R., FERNANDEZ, C., & BAPTISTA, M. (2014). *Metodología de la investigación* (McGraw-Hill, Ed.; 5th ed.).
- HERNANDEZ, R., LIÑAN, K., CABRERA, Á., ROJAS, J., FIGUEROA, I., ARAUJO, D., & VANEGAS, J. (2018). Diversidad de microalgas asociadas a zonas costeras: Estudio de caso La Guajira, Caribe. *Potencial Biotecnológico de Microalgas En Zonas Áridas*.
- Hilton, T. W., Najjar, R. G., Zhong, L., & Li, M. (2008). Is there a signal of sea-level rise in Chesapeake Bay salinity? *Journal of Geophysical Research*, 113(C9). <https://doi.org/10.1029/2007JC004247>
- Hong, B., Liu, Z., Shen, J., Wu, H., Gong, W., Xu, H., & Wang, D. (2020). Potential physical impacts of sea-level rise on the Pearl River Estuary, China. *Journal of Marine Systems*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103245>
- Hong, B., & Shen, J. (2012). Responses of estuarine salinity and transport processes to potential future sea-level rise in the Chesapeake Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 104–105. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.03.014>
- HOVIUS, N. (1998). CONTROLS ON SEDIMENT SUPPLY BY LARGE RIVERS. In *Relative Role of Eustasy, Climate, and Tectonism in Continental Rocks*. SEPM (Society for Sedimentary Geology). <https://doi.org/10.2110/pec.98.59.0002>
- HOYOS, N., CORREA, A., JEPSEN, S., WEMPLE, B., VALENCIA, S., MARSIK, M., DORIA, R., ESCOBAR, J., RESTERPO, J., & VELEZ, M. (2019). Modeling Streamflow Response to Persistent Drought in a Coastal Tropical Mountainous Watershed. *WATER*, 11(94).
- IDEAM. (n.d.). *Índice de retención y regulación hídrica (IRH)*.
- IDEAM. (1998). *Humedal del Valle del Río Sinú*.

- IDEAM. (2001). *Geomorfología y susceptibilidad a la inundación del Valle Fluvial del Magdalena*.
- IDEAM. (2004). *Determinación de oxígeno disuelto por el método yodométrico modificación de azida*.
- IDEAM. (2013). *Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológica de Colombia*.
- IDEAM. (2014). *Sierra Nevada de Santa Marta*.
- IDEAM. (2019a). *Boletín Climatológico. Seguimiento mensual de la precipitación*.
- IDEAM. (2019b). *Estudio Nacional del Agua 2018*.
- IDEAM. (2019c). *Seguimiento mensual de la precipitación*.
- IDEAM, MADS, & DNP. (2015). *Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100. Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*.
- Instituto de investigaciones ambientales del pacífico, & MADS. (2018). *Estudio técnico para la designación del nuevo sitio RAMSAR, complejo cenagoso del bajo Atrato, Chocó-Colombia*.
- INVEMAR. (2015). *Concepto técnico sobre mortandad de peces en la Ciénaga Grande de Santa Marta (Sector Caño Grande - Pajarales), ocurrida en noviembre de 2015*.
- INVEMAR, MADS, CORALINA, CORPOGUAJIRA, CARDIQUE, CORPOMAG, CORPOSUCRE, CORPOURABÁ, CODECHOCO, & CORPONARIÑO. (2018). *Diagnóstico y evaluación de la calidad de las aguas marinas y costeras en el Caribe y Pacífico*.
- IPCC, & PLANTON, S. (2013). *Glosario. Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.
- Ivar do Sul, J. A., Costa, M. F., Silva-Cavalcanti, J. S., & Araújo, M. C. B. (2014). Plastic debris retention and exportation by a mangrove forest patch. *Marine Pollution Bulletin*, 78(1–2). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.11.011>

- JIMENEZ, L. (2020). *Análisis del riesgo asociado a erosión pluvial en una microcuenca en Colombia y proyecciones de pérdida de suelos bajo escenarios de cambio climático.*
- JORGENSEN, S., & VOLLENWEIDER. (n.d.). Introducción general. In Comité internacional de ambientes lacustres & Programa de las naciones unidas para el medio ambiente (Eds.), *Directrices para la gestión de lagos. Principios generales sobre gestión de lagos.* (Vol. 1, pp. 5–8).
- KAESLIN, E., REDMOND, I., & DUDLEY, N. (2013). *La fauna Silvestre en un clima cambiante.*
- LEDESMA, C., BONANSEA, M., RODRIGUEZ, C., & SÁNCHEZ, Á. (2013). Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina). *Determinación de Indicadores de Eutrofización En El Embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina)*, 44(3), 419–425.
- LEMA, L. F., & POLANÍA, J. (2006). Estructura y dinámica del manglar del delta del Río Ranchería, Caribe Colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 11–21.
- Leslie, A. J., Crisman, T. L., Prenger, J. P., & Ewel, K. C. (1997). Benthic macroinvertebrates of small Florida pondcypress swamps and the influence of dry periods. *Wetlands*, 17(4). <https://doi.org/10.1007/BF03161510>
- LINARES, J., CARRILLO, M., CARLOS, G., RAMÍREZ, W., JARAMILLO, U., & AYAZO, R. (2018). *Caracterización ecológica de los humedales en la Región de la Mojana.*
- LIZARAZO, J., & LOPEZ, D. (2007). *Identificación de amenazas y vulnerabilidades para la elaboración del plan de emergencias del PNN corales del Rosario y San Bernardo.*
- Lopez-Urrutia, A., San Martin, E., Harris, R. P., & Irigoien, X. (2006). Scaling the metabolic balance of the oceans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(23). <https://doi.org/10.1073/pnas.0601137103>
- MADERA, E. (2014). *Deshaciendo el encanto: impactos de la represa de Urrá I sobre tres comunidades de la ciénaga Grande de Lorica.*
- MADS. (2016). *Humedales de Colombia fuente de vida.*
- MADS. (2018, April 21). *Ciénaga de Zapatosa se convierte en humedal de categoría internacional.*

- MARÍN ZAMBRANA, B. G. (2000). *Estado de los estuarios y lagunas costeras en Colombia*.
- MARTINEZ, P., & PATIÑO, C. (2013). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 3(1), 5–20.
- Matsui, T., Kojima, H., & Fukui, M. (2013). Effects of temperature on anaerobic decomposition of high-molecular weight organic matter under sulfate-reducing conditions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.01.003>
- MAVDT. (2017). *Plan de manejo para el sitio RAMSAR y reserva de la biosfera, sistema delta estuarino del río Magdalena, Ciénaga Grande de Santa Marta*.
- McCausland, M. A., Thompson, P. A., & Blackburn, S. I. (2005). Ecophysiological influence of light and mixing on *Anabaena circinalis* (Nostocales, Cyanobacteria). *European Journal of Phycology*, 40(1). <https://doi.org/10.1080/09670260400019758>
- Milliman, J. D., & Syvitski, J. P. M. (1992). Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers. *The Journal of Geology*, 100(5). <https://doi.org/10.1086/629606>
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2002). *Política nacional para humedales interiores de Colombia. Estrategias para su conservación y uso sostenible*.
- Resolución 2115, (2007).
- Mohseni, O., Erickson, T. R., & Stefan, H. G. (1999). Sensitivity of stream temperatures in the United States to air temperatures projected under a global warming scenario. *Water Resources Research*, 35(12). <https://doi.org/10.1029/1999WR900193>
- MONTES, R., NAVARRO, I., DOMINGUEZ, R., & JIMENEZ, B. (2013). Modificación de la capacidad de autodepuración del río Magdalena ante el cambio climático. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 4(5), 71–83.
- MONTOYA, Y., & AGUIRRE, N. (2009). Estado de la limnología de lagos de planos inundables. *Revista Gestión y Ambiente*, 12(3), undefined-86.
- MORALES, C. (2017, April 13). *Miles de peces podrían morir en abril en ciénagas del Caribe*.

- NAVARRETE, S., & RODRIGUEZ, A. (2014). *Protocolo indicador Condición tendencia bosques de manglar (ICTBM). Indicadores de monitoreo biológico del subsistema de áreas marinas protegidas* .
- NEBEL, B., & WRIGHT, R. (1999). *Ciencias ambientales: ecología y desarrollo sostenible* (Editorial Prentice Hall, Ed.; 6th ed.).
- Ni, W., Li, M., Ross, A. C., & Najjar, R. G. (2019). Large Projected Decline in Dissolved Oxygen in a Eutrophic Estuary Due to Climate Change. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(11). <https://doi.org/10.1029/2019JC015274>
- Nickus, U., Bishop, K., Erlandsson, M., Evans, C. D., Forsius, M., Laudon, H., Livingstone, D. M., Monteith, D., & Thies, H. (2010). Direct Impacts of Climate Change on Freshwater Ecosystems. In *Climate Change Impacts on Freshwater Ecosystems*. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781444327397.ch3>
- O'BRIEN, K. R., BURFORD, M. A., & BROOKES, J. D. (2009). Effects of light history on primary productivity in a phytoplankton community dominated by the toxic cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii*. *Freshwater Biology*, 54(2). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02106.x>
- OBSERVATORIO DEL CARIBE COLOMBIANO. (n.d.-a). *Mapa Región Caribe*.
- OBSERVATORIO DEL CARIBE COLOMBIANO. (n.d.-b). *Región Caribe colombiana*.
- OJEDA, D., BARBOSA, C., PINTO, J., CARDONA, M., & CUÉLLAR, M. (2001). ECOSISTEMAS. In IDEAM & MADS (Eds.), *EL MEDIO AMBIENTE EN COLOMBIA* (2nd ed., pp. 278–347).
- O'Neil, J. M., Davis, T. W., Burford, M. A., & Gobler, C. J. (2012). The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful Algae*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2011.10.027>
- ONU. (1997). *CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO*.
- ONU, & UN-WATER. (2019). *Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua*.

- Paerl, H. W., & Huisman, J. (2009). Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental Microbiology Reports*, 1(1). <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x>
- PALAU, A., ALONSO, M., & CORREGIDOR, D. (2020). Análisis del ciclo de carbono en embalses y su posible efecto en el cambio climático. Aplicación al embalse de Susqueda (Río Ter, NE España). *Ingeniería Del Agua*, 17(3), 247–254.
- Patra, R. W., Chapman, J. C., Lim, R. P., Gehrke, P. C., & Sunderam, R. M. (2015). Interactions between water temperature and contaminant toxicity to freshwater fish. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 34(8). <https://doi.org/10.1002/etc.2990>
- Peperzak, L. (2003). Climate change and harmful algal blooms in the North Sea. *Acta Oecologica*, 24. [https://doi.org/10.1016/S1146-609X\(03\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S1146-609X(03)00009-2)
- PÉREZ, R. (2011). Ambientalismo y desarrollo sustentable: tramas del sistema capitalista. *LiminaR*, 9(2), 181–199.
- PERIÓDICO “EL CALLEJERO.” (2019, February 18). *Alarmante mortandad de sardinas en el callejón de Las Iguanas de El Rodadero*.
- PICORNELL, C. (1993). Los impactos del turismo. *Papers de Turisme* .
- POSADA, C., & NIÑO, L. (2014). *Plan de acción integral para la administración sostenible de los archipiélagos Islas del Rosario y San Bernardo*.
- Prasanna Kumar, S., Muraleedharan, P. M., Prasad, T. G., Gauns, M., Ramaiah, N., de Souza, S. N., Sardesai, S., & Madhupratap, M. (2002). Why is the Bay of Bengal less productive during summer monsoon compared to the Arabian Sea? *Geophysical Research Letters*, 29(24). <https://doi.org/10.1029/2002GL016013>
- RAFFAELLI, D., RAVEN, J., & POOLE, L. (1998). Ecological impact of green macroalgal blooms. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 36, 97–125.
- RANGEL, J. (2012). *Colombia diversidad biótica XII: La Región Caribe de Colombia*. (1st ed.).
- RESTREPO, J. (2015). El impacto de la deforestación en la erosión de la cuenca del río Magdalena (1980-2010). *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat*, 39(151), 250–267.

- RESTREPO, J. D. (2005). *Los sedimentos del río Magdalena: Reflejo de la crisis ambiental* (Fondo editorial Universidad EAFIT, Ed.; 1st ed.).
- RESTREPO-ÁNGEL, J., ZAPATA, P., DÍAZ, J., GARZÓN, J., GARCÍA, C., & RESTREPO, J. (2005). Aportes fluviales al mar Caribe y evaluación preliminar sobre los ecosistemas costeros. In Universidad EAFIT (Ed.), *Los sedimentos del río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental* (1st ed.).
- RICAURTE, C., CORREA, M., MURCIA, M., ORDEÑEZ, A., BASTIDAS, M., COCA, O., & ROSADO, A. (2019). Estado del ambiente y los ecosistemas marinos y costeros: indicadores de estado. In *Informe el estado de los ambientes y recurso marinos y costeros de Colombia* (pp. 29–92).
- ROBERTS, S. D., van RUTH, P. D., Wilkinson, C., Bastianello, S. S., & Bansemer, M. S. (2019). Marine Heatwave, Harmful Algae Blooms and an Extensive Fish Kill Event During 2013 in South Australia. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00610>
- ROCA, A., & PÉREZ, G. (2006). Geografía física y poblamiento en la Costa Caribe Colombiana. In *Documetros de trabajo sobre la economía regional* (Vol. 73).
- RODRIGUEZ, M. (2013). Perfil ambiental de la Región Caribe Colombiana. *Revista Economía y Región. Universidad Tecnológica Del Bolivar*, 7(2), undefined.
- Ross, A. C., Najjar, R. G., Li, M., Mann, M. E., Ford, S. E., & Katz, B. (2015). Sea-level rise and other influences on decadal-scale salinity variability in a coastal plain estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.01.022>
- Roy, R. (2018). An Introduction to water quality analysis. *ESSENCE – International Journal for Environmental Rehabilitation and Conservation*. <https://doi.org/10.31786/09756272.18.9.2.214>
- SADOFF, C., & MULLER, M. (2010). *La Gestión del Agua, la Seguridad Hídrica y la Adaptación al Cambio Climático: Efectos Anticipados y Respuestas Esenciales*.
- Saker, M. L., & Griffiths, D. J. (2000). The effect of temperature on growth and cylindrospermopsin content of seven isolates of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Nostocales, Cyanophyceae) from water bodies in northern Australia. *Phycologia*, 39(4). <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-39-4-349.1>

- SALOMÓN, S., RIVERA, C., & ZAPATA, Á. (2020). Floraciones de cianobacterias en Colombia: estado del conocimiento y necesidades de investigación ante el cambio global. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.*, 44(171).
- SÁNCHEZ, F. (2013). *III Seminario de actualización en ingeniería ambiental. Gestión del recurso hídrico en Colombia* (Sociedad Colombiana de Ingenieros, Ed.).
- SÁNCHEZ, F., GARCÍA, M., JARAMILLO, O., & VERDUGO, N. (2010). *Agua superficial: Caracterización y análisis de la oferta*.
- SÁNCHEZ, H., BOLIVAR, H., VILLATE, D., ESCOBAR, G., & ANFUSO, G. (2016). Influencia de los impactos antrópicos sobre la evolución del bosque de manglar en Puerto Colombia (Mar Caribe colombiano). *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 15.
- Sarma, V. V. S. S., Rao, G. D., Viswanadham, R., Sherin, C. K., Salisbury, J., Omand, M., Mahedevan, A., Murty, V. S. N., Shroyer, E., Baumgartner, M., & Stafford, K. (2016). Effects of Freshwater Stratification on Nutrients, Dissolved Oxygen, and Phytoplankton in the Bay of Bengal. *Oceanography*, 29(2). <https://doi.org/10.5670/oceanog.2016.54>
- Savenije, H. H. G. (1993). Predictive model for salt intrusion in estuaries. *Journal of Hydrology*, 148(1–4). [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90260-G](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90260-G)
- SCHEFFER, M. (1998). Ecology of Shallow Lakes. In Chapman and Hall (Ed.), *Population and Community Biology Series* (Vol. 22, p. undefined-357).
- SEDAN, D., & ANDRINOLO, D. (2011). *CIANOBACTERIAS COMO DETERMINANTES AMBIENTALES DE LA SALUD. Cianobacterias y Cianotoxinas. Efectos en la salud humana. Casos informados y primeros acercamientos al estudio epidemiológico*.
- SEMANA SOSTENIBLE. (2019, August 28). *Así se enfrentará la emergencia ambiental en El Laguito, en Cartagena*.
- SEMANA SOSTENIBLE. (2020, June 22). *Lupa a mortandad de peces en ciénaga de El Banco, Magdalena*.
- SIRAP, & THE NATURE CONSERVANCY COLOMBIA. (2018). *Portafolio áreas prioritarias para la conservación del Caribe colombiano*.

- SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL DE COLOMBIA. (2016, July 20). *Erosión*.
- Sullivan, A. B., Snyder, D. M., & Rounds, S. A. (2010). Controls on biochemical oxygen demand in the upper Klamath River, Oregon. *Chemical Geology*, 269(1–2). <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.08.007>
- SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS Y DOMICILIARIOS, & DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. (2018). *Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos*.
- TATE, D. (2009, February 27). *Principios del uso eficiente del agua*.
- TICONA, L., & MILAGROS, C. (2020). Evaluación del impacto de la contaminación de los residuos sólidos sobre suelo y agua del botadero sanitario de Cancharani Puno. *ÑAWPARISUN-Revista de Investigación Científica*. , 2(4).
- TODA COLOMBIA. (2019, February 21). *Regiones naturales de Colombia*.
- TONK, L. (2007). *Impact of environmental factors on toxic and bioactive peptide production by harmful cyanobacteria*.
- TORRES, R., GÓMEZ, J., & AFANADOR, F. (2006). *Variación del nivel medio del mar en el Caribe colombiano*.
- UAESP. (n.d.). *Lixiviado*.
- UNESCO. (1994). *Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas RAMSAR*.
- United States Environmental Protection Agency. (1997). *Mercury Study Report to Congress*.
- UNIVERSIDAD COMPLUTENSE. (2015). *Descripción de indicadores*.
- URBAN, M. C. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, 348(6234). <https://doi.org/10.1126/science.aaa4984>
- URIBE, E. (2015). *El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina*.
- URIBE, E. (2020). *Lista roja de ecosistemas marinos y costeros de Colombia*.

- Uwins, H. K., Teasdale, P., & Stratton, H. (2007). A case study investigating the occurrence of geosmin and 2-methylisoborneol (MIB) in the surface waters of the Hinze Dam, Gold Coast, Australia. *Water Science and Technology*, 55(5). <https://doi.org/10.2166/wst.2007.184>
- VALBUENA, D. (2017). *Geomorfología y condiciones hidráulicas del sistema fluvial del río Sinú. Integración multiescalar. 1945 – 1999 – 2016.*
- VANEGAS, E., DUQUE, G., & ACOSTA, Luis. (2010). Mercurio total en el bagre rayado *Pseudoplatystoma magdaleniatum* de la ciénaga de Zapatoza. *Revista Investigación Pecuaria*.
- VASQUEZ, C., & BENÍTEZ, Á. (2015). *Briófitos reófitos como indicadores de contaminación del agua del Río Zamora de la ciudad de Loja.*
- VIDAL, L., DELGADO, J., & ANDRADE, G. (2013). Factores de la vulnerabilidad de los humedales altoandinos de Colombia al cambio climático global. *Revista Colombiana de Geografía*, 22(2), 69–85.
- VINEY, N. R., BATES, B. C., CHARLES, S. P., WEBSTER, I. T., & BORMANS, M. (2007). Modelling adaptive management strategies for coping with the impacts of climate variability and change on riverine algal blooms. *Global Change Biology*, 13(11). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01443.x>
- VOGEL, S. (1994). *Life in moving fluids: The physical biology of flow* (Princeton University Press, Ed.; 2nd ed.).
- Wainright, S. C., & Hopkinson, C. S. (1997). Effects of sediment resuspension on organic matter processing in coastal environments: A simulation model. *Journal of Marine Systems*, 11(3–4). [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(96\)00130-3](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(96)00130-3)
- WALSBY, A. E., HAYES, P. K., BOJE, R., & STAL, L. J. (1997). The selective advantage of buoyancy provided by gas vesicles for planktonic cyanobacteria in the Baltic Sea. *New Phytologist*, 136(3). <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00754.x>
- Wang, H., Bi, N., Saito, Y., Wang, Y., Sun, X., Zhang, J., & Yang, Z. (2010). Recent changes in sediment delivery by the Huanghe (Yellow River) to the sea: Causes and environmental implications in its estuary. *Journal of Hydrology*, 391(3–4). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.030>

- Wantzen, K. M., Rothhaupt, K.-O., Mörtl, M., Cantonati, M., -Tóth, L. G., & Fischer, P. (2008). *Ecological Effects of Water-Level Fluctuations in Lakes*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9192-6>
- WARREN, R., PRICE, J., VANDERWAL, J., CORNELIUS, S., & SOHL, H. (2018). The implications of the United Nations Paris Agreement on climate change for globally significant biodiversity areas. *Climatic Change*, 147(3–4). <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2158-6>
- WEBB, B. W., & NOBILIS, F. (2007). Long-term changes in river temperature and the influence of climatic and hydrological factors. *Hydrological Sciences Journal*, 52(1). <https://doi.org/10.1623/hysj.52.1.74>
- WEISS, L., POTTER, L., STEIGER, A., KRUPPERT, S., FROST, U., & TOLLRIAN, R. (2018). Rising pCO<sub>2</sub> in Freshwater Ecosystems Has the Potential to Negatively Affect Predator-Induced Defenses in Daphnia. *Current Biology*, 28, 327–332.
- WELCOMME, R. L. (1980). *Cuencas fluviales. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación*.
- WHITEHEAD, P. G., WILBY, R. L., BATTARBEE, R. W., KERNAN, M., & WADE, A. J. (2009). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal*, 54(1). <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.101>
- Wong, V. N. L., Walsh, S., & Morris, S. (2018). Climate affects fish-kill events in subtropical estuaries of eastern Australia. *Marine and Freshwater Research*, 69(11). <https://doi.org/10.1071/MF17307>
- WORLD WILDLIFE FUND. (2018, September 6). *El lugar donde nace el Atrato*.
- Xingcheng, Y., Mingyue, W., Xiaoguang, X., Guoxiang, W., Hao, S., Yunhao, Y., & Ao, S. (2018). Migration of carbon, nitrogen and phosphorus during organic matter mineralization in eutrophic lake sediments. *Journal of Lake Sciences*, 30(2). <https://doi.org/10.18307/2018.0203>
- YAÑEZ, A., & DAY, J. (2006). La zona Costera sobre el cambio climático-vulnerabilidad de un sistema biocomplejo e implicaciones en manejo costero. In Instituto de ecología, S. G. T. Instituto nacional de ecología (Ed.), *Impactos del cambio climático sobre la zona costera*.

- YAÑEZ, A., DAY, J., TWILLEY, R., & DAY, R. (2006). Loa manglares frente al cambio climático. Tropicalización global del Golfo de México. In Instituto nacional de ecología, Instituto de ecología, & SEA GRANT TEXAS (Eds.), *Impactos del cambio climático sobre la zona costera*.
- Zhang, J., Gilbert, D., Gooday, A. J., Levin, L., Naqvi, S. W. A., Middelburg, J. J., Scranton, M., Ekau, W., Peña, A., Dewitte, B., Oguz, T., Monteiro, P. M. S., Urban, E., Rabalais, N. N., Ittekkot, V., Kemp, W. M., Ulloa, O., Elmgren, R., Escobar-Briones, E., & van der Plas, A. K. (2010). Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development. *Biogeosciences*, 7(5). <https://doi.org/10.5194/bg-7-1443-2010>
- Zhang, Y., Wu, Z., Liu, M., He, J., Shi, K., Zhou, Y., Wang, M., & Liu, X. (2015). Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China). *Water Research*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.052>

## ANEXOS

- J. Coberturas de suelo en la Región Caribe(a); Caribe terrestre (b))
- K. Imagen satelital de los cuerpos superficiales de agua dulce de la Región Caribe colombiana).
- L. Zonificación hidrográfica de Colombia (área Caribe a) y área Magdalena-Cauca b)).
- M. Escenarios de cambio climático en la Región Caribe Colombiana (precipitación y temperatura))
- N. Erosión hídrica potencial en ladera para Colombia
- O. índice de regulación hídrica para Colombia
- P. Zonas susceptibles a inundación en Colombia
- Q. Variaciones espaciales de salinidad en la Ciénaga Grande de Santa Marta. a) junio 2019; b) octubre 2019; c) marzo 2019.
- R. Esquema: Identificación de impactos del cambio climático en cuerpos superficiales de agua dulce de la Región Caribe colombiana.