

**Determinación de indicadores hídricos de cambio climático para el lago de  
Tota Aquitania Boyacá**

Denise Julieth Cruz Salanueva

Asesor

Jessica Paola Páez Pedraza

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiental - ECAPMA

Tecnología en Saneamiento Ambiental

2024

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios y a la Santísima Virgen María por permitirme tener la experiencia tan agradable y enriquecedora de estudiar en la universidad Abierta ya Distancia UNAD, a la Tutora Jessica Paola Páez por ser mi guía en cada paso, por su paciencia y conocimiento que me ayudo a llevar a cabo esta tesis; a cada de uno de los profesores de las diferentes áreas que contribuyeron en mi educación, mi familia y todas las personas de las cuales recibí su apoyo y ayuda cuando más lo necesitaba.

## Resumen

El presente estudio tiene como fin determinar los indicadores hídricos que representan la vulnerabilidad frente al cambio climático de los ecosistemas lenticos, a través de un análisis climatológico y la identificación de diferentes aspectos influyentes para el lago de Tota en la actualidad y con proyección a los escenarios de cambio climático de los años 2040 y 2070. Inicialmente se establecieron cinco fases para el desarrollo de este proyecto; primero se realizó la recolección de información secundaria de datos obtenidos en su mayoría en el IDEAM (instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), entre los cuales se encuentran (temperatura, precipitación, caudal, humedad relativa y evaporación); posteriormente se realiza el análisis climatológico donde se identifica que las estaciones cercanas e influyentes al lago de Tota presenten los datos de los parámetros: precipitación, evaporación, caudal, temperatura y humedad relativa, se encuentren dentro de los años de 1984 a 2012 y de esta manera se identifica el cambio que ha estado presentando a lo largo de esta línea de tiempo, y así seleccionar el indicador hídrico que se va a trabajar, que en este caso el indicador escogido es el Índice de Aridez que permite medir el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de una región, este identifica si las áreas de estudio evidencian excedentes o es deficitario de agua; posteriormente se realiza el cálculo del indicador en el cual se utilizaran los cálculos de la ETP (evapotranspiración potencial) y ETR (evapotranspiración real) y finalmente se calcula el nivel de cambio del índice de aridez para los años 2040 y 2070 teniendo presente la variación de la temperatura, precipitación, ETP y ETR.

***Palabras claves:*** vulnerabilidad, cambio climático, temperatura, precipitación, evaporación, índice de aridez.

## Abstract

The present study aims to determine the water indicators that represent the vulnerability of lentic ecosystems to climate change through a climatological analysis and the identification of various influential aspects for Lake Tota, both currently and projected for the climate change scenarios of the years 2040 and 2070. Initially, five phases were established for the development of this project. First, secondary data was collected, mostly obtained from the Institute of Hydrology (IDEAM, 2004), including temperature, precipitation, flow, relative humidity, and evaporation. Subsequently, a climatological analysis was conducted to identify that the stations near and influencing Lake Tota present data on the parameters: precipitation, evaporation, flow, temperature, and relative humidity, within the years 1984 to 2012. This way, the changes occurring over this timeline were identified, and the water indicator to be worked on was selected. In this case, the chosen indicator is the Aridity Index, which measures the degree of sufficiency or insufficiency of precipitation for the sustainability of a region's ecosystems. This index identifies whether the study areas show water surpluses or deficits. Subsequently, the indicator was calculated using the calculations of potential evapotranspiration (ETP) and actual evapotranspiration (ETR). Finally, the level of change in the aridity index for the years 2040 and 2070 was calculated, considering the variation in temperature, precipitation, ETP, and ETR.

**Keywords:** vulnerability, climate change, temperature, precipitation, evaporation, aridity index.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	8
Planteamiento del problema.....	9
Justificación .....	10
Objetivos.....	11
Marco Teórico.....	12
Estado del Arte.....	24
Caso De Estudio.....	26
Metodología .....	30
Resultados y discusión.....	40
Discusión de los análisis de resultados .....	53
Conclusiones.....	56
Bibliografía .....	58

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Rango de valores de índice de aridez</i> .....	198
<b>Tabla 2</b> <i>Rango de valores índice de regulación y retención hídrica</i> .....	19
<b>Tabla 3</b> <i>Rango de valores índice del uso del agua superficial</i> .....	20
<b>Tabla 4</b> <i>Rango de valores de índice de calidad del agua</i> .....	22
<b>Tabla 5</b> <i>Índice potencial de calidad del agua</i> .....	22
<b>Tabla 6</b> <i>Índice vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico</i> .....	23
<b>Tabla 7</b> <i>Características de Estaciones</i> .....	31
<b>Tabla 8</b> <i>Indicadores aplicables para la identificación de la vulnerabilidad del cambio climático</i> .....	33
<b>Tabla 9</b> <i>Incremento de Temperatura para 2040 y 2070</i> .....	38
<b>Tabla 10</b> <i>Incremento de Precipitación para 2040 y 2070</i> .....	39
<b>Tabla 11</b> <i>Aportes de Caudal al Lago de Tota</i> .....	48

## Lista de Figuras

<i>Figura 1</i> Ubicación del Lago de Tota.....	27
<i>Figura 2</i> Ubicación de estaciones.....	40
<i>Figura 3</i> Precipitación mensual en las diferentes estaciones.....	43
<i>Figura 4</i> Humedad Relativa en diferentes estaciones.....	44
<i>Figura 5</i> Temperatura en las diferentes estaciones.....	44
<i>Figura 6</i> Valores de evaporación estación de Aquitania.....	45
<i>Figura 7</i> Caudal en las diferentes estaciones.....	47
<i>Figura 8</i> evapotranspiración potencial.....	52
<i>Figura 9</i> evapotranspiración real.....	52
<i>Figura 10</i> índice de aridez.....	52

## Introducción

El cambio climático es definido por (minambiente, 1994) como “aquella variación en la composición en la atmosfera que puede alterar el clima”. Por ende, se atribuye la actividad antrópica como directa o indirectamente responsables de este cambio. “Desde el año 1994 varios países entre ellos Colombia firmaron la convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, esto con el objetivo de lograr una estabilización de las concentraciones de los gases de efecto invernadero, de tal manera que se establezca un nivel que impida interferencias antropogénicas para el sistema climático”. (Posada, 2007). Posterior a esta convención se firmó el protocolo de Kyoto, este con el objetivo de reducir los GEI (Gases de Efecto Invernadero), aunque muchas naciones se negaron a firmar dicho protocolo argumentando la falta de evidencia concluyente, en el año 2007 se evidencio de manera científica que las actividades antrópicas han modificado la estructura química de la atmosfera y por ende el clima.

Actualmente, los ecosistemas lénticos han estado en grave peligro ya que el cambio climático a estado afectado de manera significativa a sus características propias como la pérdida de especies locales, mortalidad de plantas y animales generando la extinción de muchas, así como cambios de las propiedades de los cuerpos de agua en los que encontramos variación de temperatura, pH, densidad, entre otras. Uno de los problemas más comunes en este tipo de ecosistemas es la eutrofización que se presenta cuando hay escaso movimiento de agua, lo que genera acumulación de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno, lo que conlleva a un crecimiento excesivo de algas y plantas que terminan llenando los ecosistemas, y que no permiten que, entre luz solar, lo que reduce la cantidad de oxígeno producido y termina matando a las especies.

## Planteamiento del problema

De acuerdo con (corpoboyacá, 2013) desde hace varias décadas el planeta se ha visto afectado por el cambio climático y el lago de Tota no es la excepción, se han presentado varios problemas y conflictos en cuanto al uso de los recursos hídricos, dichos altercados se han dado principalmente por la inadecuada gestión ambiental y sectorial, que no ha podido asegurar un sostenible y adecuado manejo de los recursos naturales, lo que ha provocado que en el lago de Tota específicamente se genere un gran deterioro en el ecosistema, afectación en la calidad del agua, alteraciones en dichos niveles, cambios en el pH, la temperatura, acidez, alcalinidad, DBO, DQO y demás variables propias del lago; el suelo presenta contaminación por el inadecuado manejo de agroquímicos utilizados en los diferentes cultivos lo cual deteriora su capacidad de recuperación, lo que generalmente ocasiona problemas de abastecimiento en las comunidades que tienen como suministro dicha fuente.

El lago de Tota de acuerdo con (Nacion, 2019) es una fuente principal para el abastecimiento de aproximadamente 250.000 habitantes no solo del municipio de Aquitania, sino también de municipios como Cuítiva y Tota; además se encuentra dentro protección según el Decreto 1111 de 1952, ya que según (Corpoboyacá, 2013) tiene un carácter de Humedal RAMSAL y más del 50% se encuentra ubicado en el Páramo de Bijagual, proporcionando una gran variedad en servicios ecosistémicos. Según los estudios realizados por Corpoboyacá la precipitación, evaporación, nivel y volumen del lago de Tota en todas sus subcuencas han variado sus cifras desde el año 1971 al año 2013. Para esto se ha “evaluado con diferentes indicadores, pues se ha establecido un rango para determinar su nivel si es adecuado, muy bajo o alto dentro de los niveles normales”. (Alberto Ramírez, 2005).

## **Justificación**

Para el Lago de Tota el identificar la vulnerabilidad a causa del cambio climático y sus efectos a futuro es una gran oportunidad de mejorar el bienestar para las comunidades que se benefician de dicha fuente, pues se puede establecer como regadío de cultivos, abastecimiento para uso doméstico, o bebedero de animales. “La calidad hídrica es una oportunidad para crear un ambiente de fauna y flora acuática propia de la región que esté presente en los ecosistemas aumentando el número de especies endémicas, además se puede tener un beneficio económico ya que se puede destinar como lugar turístico”. (Alberto Ramírez, 2005). La determinación de los indicadores hídricos que pueden ser aplicables en el lago de Tota es importante para establecer el estado que se encuentra actualmente, de acuerdo a los cambios que ha tenido frente al cambio climático en los se pueden identificar diferentes parámetros que se han visto vulnerados a lo largo del tiempo; teniendo este resultado se puede realizar un diagnóstico y postular una solución viable y adecuada a futuro ya que cada uno de los indicadores tienen un rango que nos permite identificar de manera rápida su estado.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Determinar los aspectos hidrológicos e indicadores hídricos que representen la vulnerabilidad ante el cambio climático del lago de Tota

### **Objetivos específicos**

Realizar un análisis climatológico del Lago de Tota.

Identificar aspectos hidrológicos que influyen en la vulnerabilidad ante el cambio climático para la lago de Tota.

Analizar los indicadores hídricos que permitan medir el grado de vulnerabilidad ante el cambio climático para la lago de Tota.

Determinar un indicador hídrico para la Lago de Tota y su cambio bajo un escenario de cambio climático.

## Marco Teórico

### Cambio Climático

*¿Qué es?* Según el (unfccc, 1992)este se define como “el cambio del clima a causa de actividades naturales ya sea como cambios solares, erupciones volcánicas o por causas antrópicas” (las cuales han aumentado desde la revolución industrial) como quema de combustibles, tala de árboles, mal manejo de residuos entre otros, las cuales han alterado la composición de la atmósfera, de modo que se generan gases de efecto invernadero tales como dióxido de carbono y metano, estos actúan como una manta atrapando el calor del sol ocasionando cambios en las características predominantes de la Temperatura en diferentes partes del planeta.

Dicho cambio climático ha presentado un desequilibrio en el ciclo hidrológico que han causado cambios principalmente en los ecosistemas lénticos como lagos, lagunas, embalses etc. Que se han visto en una alta vulnerabilidad ocasionando un gran riesgo en las comunidades que hacen uso de sus servicios, pues en estos ecosistemas lénticos se ha observado una reducción significativa en la cobertura de humedales y estos son un aporte fundamental porque según (Uribe, 2019). proporcionan más del 40 % de servicios ecosistémicos y su conservación y preservación son una de las herramientas principales para la mitigación y adaptación del cambio climático.

*¿Que son los gases de efecto invernadero?* El ((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004) define los gases de efecto invernadero (GEI) como “componentes que están presentes en la atmosfera de origen natural o antropógeno, los cuáles pueden absorber o emitir radiación en diferentes longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja producidos por la superficie

terrestre, nubes y atmosfera”. Dichos GEI atrapan el calor entre la superficie y la troposfera a lo cual se le llama Efecto invernadero. Algunos de los GEI presentes en la atmosfera son: vapor de agua (H<sub>2</sub>O), dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O), Metano (CH<sub>4</sub>), y ozono (O<sub>3</sub>).

*Efectos Del Cambio Climático.* A lo largo del tiempo se ha evidenciado una alteración en los patrones climáticos lo que, afectado el equilibrio de la naturaleza, lo que supone muchos riesgos tanto para los seres humanos como para la flora, fauna y demás formas de vida del planeta; dentro de varios efectos presentados se pueden destacar el aumento de temperaturas llegando a puntos elevados ocasionando olas de calor, enfermedades, e incendios forestales; el aumento de tormentas que provocan precipitaciones con mayor intensidad y con más frecuencia provocando inundaciones, deslizamientos de tierra.

El aumento de sequía que actualmente es uno de los efectos que se presenta con más frecuencia ya que el incremento de la velocidad del viento ocasiona tormentas de arena y polvo de diferentes desiertos que se expanden reduciendo la tierra que se destinaba para cultivos de alimentos, lo que produce escases y en muchas comunidades aumentan la malnutrición y el hambre ya que el estrés térmico puede reducir la disponibilidad del agua y los pastizales. De acuerdo con (Thomson, 2015). El océano absorbe la mayor parte del calor del calentamiento global, esto derrite las capas de hielo y eleva el nivel del mar, amenazando a las comunidades costeras e insulares este también absorbe el dióxido de carbono, manteniéndolo fuera de la atmósfera; un mayor nivel de dióxido de carbono hace que el mar sea más ácido, lo que pone en peligro la vida de muchas especies del mar.

En Colombia se ha evidenciado varias situaciones que han afectado a diferentes ambientes por el cambio climático, (Sostenible, 2020) afirma que entre ellos tenemos a: los

glaciares han reducido su área de 348 km<sup>2</sup> a 36.6 km<sup>2</sup> en aproximadamente un siglo, donde aproximadamente pierden 50 cm y un metro de espesor por año, un ejemplo es el nevado de santa Isabel donde en su punto más profundo tiene un espesor de 25 m, su existencia no supera los treinta años y ha estado perdiendo 1 metro por año; el (Instituto de Hidrología, 2018) ha pronosticado que para el año 2050 posiblemente habrá desaparecido el 80% de los glaciares del país y el 60 % del área de los páramos estará altamente degradada.

(Posada, 2007). Afirma que “en las zonas secas las precipitaciones se han reducido de manera significativa lo que ha producido que se continúe con la desertificación de aproximadamente 16.95% del país.”

De igual manera (Deisy Romero Rodríguez, 2014) establece que el “blanqueamiento de Corales se ha producido en arrecifes coralinos durante el paso del evento climático “La Niña” durante los años de 1998-2000 y 2007-2008, donde se presentó un incremento de precipitación y caudales en colombiana.”

“Aumento de temperatura en algunos ecosistemas ha ocasionado la migración de varias especies donde algunas pueden sobrevivir, pero otras llegan a la extinción, algunos animales en peligro de extinción se encuentran el piscuiz, oso de ante ojos, jaguar, delfín rosado, tortugas carey, titi cabeciblanco, entre otros”. (Barreto, 2021).

Así mismo el IPCC (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático), ha asegurado que no se puede detener el calentamiento global ya que los GEI que se han generado no se reducirán o se extinguirán hasta cientos de años, por esto, aunque no se pueden eliminar de manera completa, si se puede mantener bajos niveles para no afectar la estabilidad y equilibrio del planeta.

## ¿Que Son Ecosistemas Lenticos?

De acuerdo con (Roldán, 2020) los ecosistemas Lénticos son sistemas acuáticos dulces que debido a su estructura cerrada las aguas permanecen estancadas, donde no presentan ningún flujo entre sus aguas. Dentro de los ecosistemas lénticos se presentan fuentes de agua que se encuentran estancadas como

**Lagos:** es una extensión de agua ya sea salada o dulce la cual presenta un amplio espejo de agua, una profundidad mayor a siete metros y se encuentra ubicado dentro de un continente. El agua presente en dicho lago se genera por el escurrimiento de la lluvia y posibles filtraciones subterráneas, que se ha acumulado por inclinaciones donde se encuentra ubicado dicho lago.

**Lagunas:** A diferencias de los ríos estas presentan una calma en sus aguas ya que se encuentran estancadas, las cuales son poco profundas y se pueden encontrar dos clasificaciones tales como: lagunas costeras y lagunas de atolón. Estas se encuentran amenazadas por la contaminación presente en el desarrollo humano lo que llega a afectar su biodiversidad.

**Embalses:** su origen de debe a la creación artificial o natural por medio del cual se cierra el acuse de un río o arroyo, este permite la acumulación de cierta cantidad de agua gracias a una presa, esta se suele utilizar para regular el caudal de un río, de forma industrial, de regadío o para la distribución de una población.

**Humedales:** Son aquellos ecosistemas cuyos suelos se presentan la mayor parte de tiempo inundados pueden presentar una cantidad considerable de salinidad, pero en su mayoría se

caracteriza por ser de agua dulce, pueden ser Humedales fluviales o ribereños, lacustres, palustres tropicales, marinos, estuarios, lacustres y/o palustres de agua salada o artificiales.

### **Cambio Climático en Ecosistemas Lénticos**

De acuerdo con (Zapata, 2012) los ecosistemas lénticos han estado en grave peligro, ya que el cambio climático a estado afectado de manera significativa a sus características propias. Uno de los problemas más comunes en este tipo de ecosistemas es la eutrofización que se presenta cuando hay escaso movimiento de agua, lo que genera acumulación de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno, lo que conlleva a un crecimiento excesivo de algas y plantas que terminan llenando los ecosistemas, y que no permiten que, entre luz solar, lo que reduce la cantidad de oxígeno producido y termina matando a las especies. La eutrofización se produce en la gran mayoría de embalses, lagos o lagos por la gran cantidad de nutrientes principalmente nitrógeno y fósforo procedentes de actividades realizadas por el hombre. Estos cuerpos lénticos acorde con (Uribe, 2019). tienen una gran característica de reciclar nutrientes a cierta temperatura dada, pero cuando se presenta una gran cantidad de estos nutrientes se tiende a realizar una concentración que lleva a la eutrofización.

Dichos ecosistemas son de gran importancia ya que son necesarios para reciclar los nutrientes de cada ecosistema esto de acuerdo con la temperatura presente, pero a causa del cambio climático estos, han modificado varias condiciones físicas que han ocasionado el descenso del nivel del agua, pérdida de minerales, nutriente, fauna y flora propia de la región ya que estos son una fuente importante de abastecimiento para personas y animales; estos por su características son muy productivos ya que su vegetación es muy amplia para las diferentes

especies de animales presentes que en su mayoría son herbívoros y estos a su vez ayudan a mantener un equilibrio en el ecosistema y su biodiversidad.

### **Vulnerabilidad Al Cambio Climático**

Según (Valencia, 2015) la vulnerabilidad varía de acuerdo con la variabilidad climática ya sean aumentos o disminución de las precipitaciones, en la temperatura, en temporadas etc., según estas variables se puede establecer una exposición actual de los ecosistemas lenticos, sin embargo, es importante conocer que para establecer una exposición acertada es necesario identificar que factor influye la actividad antrópica en el cambio de estas variables.

La vulnerabilidad se calcula a través de la siguiente formula:

$$vulnerabilidad = \frac{exposicion * sensibilidad}{capacidad adaptiva}$$

Donde:

la vulnerabilidad se define como la cantidad (o potencial) de daño a un sistema por una amenaza climática.

La exposición es el carácter, magnitud y velocidad de cambio y variación del clima que afecta a un sistema.

La sensibilidad es el incremento de la temperatura media de la superficie del planeta en respuesta a algún cambio

“la capacidad adaptiva son los recursos humanos e institucionales que permiten detonar procesos de adaptación a una problemática climática específica”. (Marin, 2011)

## **Indicadores Hídricos**

### *¿Qué son los indicadores Hídricos?*

Concordando con (Omar Vargas Martínez, 2013). se pueden definir como una medida directa o indirecta de la calidad ambiental en la capacidad del medio ambiente para apoyar la salud humana y ecológica que incorporan la actividad, intervención antrópica y factores climáticos, hidrológicos e hidrogeológicos los cuales permiten identificar el estado de la fuente hídrica, su estado de contaminación y sus características fisicoquímicas y biológicas.

(Mario Castro, 2014). Señala que unas de las entidades las cuales se han convertido en un instrumento fundamental que ha y sigue transmitiendo información de la calidad del agua es el ICA, esta entidad es un gran indicador que integra información de varios parámetros y que presente diferentes metodologías.

### *Tipos de Indicadores Hídricos*

Los indicadores hídricos se pueden dividir en dos grandes grupos:

**Indicadores de sistema hídrico.** Índice de Aridez (IA): de acuerdo con ((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004) es una característica cualitativa del clima el cual mide la insuficiencia o suficiencia de la precipitación en cuanto al sostenimiento de los ecosistemas presentes en el área de estudio, de igual manera identifica áreas con déficit o excedentes de agua a través del cálculo del balance hídrico superficial; para el presente índice se encuentra el siguiente rango de valores, categoría y sus características.

**Tabla 1***Rango de valores de índice de aridez*

Rango de Valores Índice de Aridez	categoría	Característica
<0.15	azul	Altos excedentes de agua
0.5 - 0.19	azul claro	Excedentes de agua
0.20 – 0.29	verde oscuro	Entre moderado y excedentes de agua
0.30 – 0.39	verde claro	moderado
0.40 – 0.49	amarillo	Entre moderado y deficitario de agua
0.50 – 0.59	naranja	Deficitario de agua
>0.60	rojo	Altamente deficitario de agua

*Nota:* esta tabla muestra el rango de valores del índice de aridez. *Fuente:* ((IDEAM)

Instituto de Hidrología, 2004)

“Índice de retención hidráulica y regulación hídrica (IRH): mide la cantidad de humedad que pueden retener las cuencas”. ((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004). A continuación, se presenta el rango de valores, categoría y característica.

**Tabla 2***Rango de valores índice de regulación y retención hídrica*

Rango de valores IRH	categoría	características
>0.85	muy alto	Capacidad de la cuenca para retener y regular muy alta

0.75 – 0.85	alto	Capacidad de la cuenca para retener y regular alta
0.65 – 0.75	medio	Capacidad de la cuenca para retener y regular media
0.50 – 0.65	bajo	Capacidad de la cuenca para retener y regular baja
<0.50	muy bajo	Capacidad de la cuenca para retener y regular muy baja

*Nota:* esta tabla muestra el rango de valores del índice de regulación y retención hídrica.

*Fuente:* ((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004)

**Indicadores de Intervención Antrópica.** Los relacionados con la presión por el uso de agua superficial o subterránea: dentro de este subgrupo se pueden considerar los siguientes índices: Índice de Uso del agua superficial (IUA): se utiliza en un periodo determinado ya sea mensual o anual y por unidad espacial de subzona hidrográfica y de las cuencas abastecedoras de los acueductos con respecto con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades de tiempo y espaciales, se utiliza el siguiente rango de valores para identificar la cantidad de agua utilizada en los diferentes sectores.

### Tabla 3

*Rango de valores índice del uso del agua superficial*

Rango (Dh/Oh)*100 IUA	Categoría IUA	significado
-----------------------	---------------	-------------

---

>50	muy alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
20.01 - 50	alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
10.01 - 20	moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
1 - 10	baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
$\leq 1$	muy bajo	La presión de la demanda es no es significativa con respecto a la oferta disponible

---

*Nota:* esta tabla muestra el rango de valores del índice del uso del agua superficial.

*Fuente:* ((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004).

Los de estado de la calidad de agua y presión por contaminación: se pueden encontrar los siguientes índices: índice de Calidad del Agua (ICA): señala un grado entre 0 y 1 en cuanto a la calidad del agua, en términos de bienestar humano independiente de su uso, toma en cuenta factores ambientales de acuerdo con variables que permiten el análisis de principales orígenes de la contaminación. Sin embargo, este indicador no integra la complejidad de los fenómenos naturales y viabilidad climática.

**Tabla 4***Rango de valores Índice de calidad del agua*

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0.00 – 0.25	Muy mala	rojo
0.26 – 0.50	Mala	naranja
0.51 – 0.70	Regular	amarillo
0.71 – 0.90	aceptable	verde
0.91 – 1.00	buena	azul

*Nota:* esta tabla muestra el rango de valores del índice de calidad del agua. *Fuente:* ((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004)

índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL): concierne a la presión sobre las condiciones de calidad del agua en los sistemas hídricos superficiales del país, se evalúa de acuerdo con cargas contaminantes de materia orgánica, sólidos suspendidos y nutrientes, su rango de valores se encuentra entre 1 y 5.

**Tabla 5***índice de alteración potencial de la calidad del agua*

Rangos	Categoría de clasificación	Clasificación de la presión
$1.0 \leq \text{IACAL} \leq 1.5$	1	Baja

$1.5 < IACAL \leq 2.5$	2	Moderada
$2.5 < IACAL \leq 3.5$	3	Media -alta
$3.5 < IACAL < 4.5$	4	Alta
$4.5 \leq IACAL \leq 5$	5	Muy alta

*Nota:* esta tabla muestra el rango de valores del índice de alteración potencial de la calidad del agua. *Fuente:* ((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004)

Indicadores asociados con el riesgo para la evaluación del agua, podemos tener los siguientes: índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH)

“Cuando la regulación hídrica es alta y el uso del agua es muy bajo, la vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento es muy baja, mientras que con un uso del agua alto o muy alto y una regulación muy baja, la vulnerabilidad es muy alta. Entre más alto es el uso del agua y menor es la regulación, la vulnerabilidad por desabastecimiento aumenta; disminuye cuando mejora la regulación de agua y se presenta un menor uso del agua” (minambiente, 1994)

**Tabla 6**

*índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico*

Categorización IVH			
R	G	B	categoría
255	0	0	Muy alta
255	170	0	Alta

255	255	0	Media
150	230	0	Baja
0	160	170	Muy baja
255	255	255	S.I.

*Nota:* esta tabla muestra el rango de valores del índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico. *Fuente:* (minambiente, 1994)

“Estos indicadores presentan la cualificación y cuantificación que permite el manejo individual de los indicadores o la utilización conjunta de estos que pueden generar, a su vez, nuevos indicadores y nueva información.” (Alberto Ramírez, 2005).

### **Estado del Arte**

En total se encontrados tres documentos relacionados con el tema de investigación. Estos textos se identificaron con base en las ciertas características y según las siguientes tres temáticas: cambio climático, aplicación de indicadores hídricos y Calidad del agua.

Los textos de Contabilidad Ambiental y Económica para el Agua: Caso Piloto para la Cuenca del Lago de Tota (Corpoboyaca, 2016): presenta una construcción de las diferentes cuencas del lago de Tota, donde describe las características más importantes, el estado actual de los recursos hídricos, los aspectos fundamentales de gestión, la relevancia de las cuencas como una herramienta complementaria de gestión; finalmente concluye en que la cuenca del Lago de Tota representa un valor muy importante para el consumo de la población así como bebedero y regadío sin embargo el costo de pago es de 2 pesos por metro cubico es decir un costo bajo para la contribución económica que genera la región, la oferta hídrica y el activo de almacenamiento

ha sido realizado con el propósito para derivar el río Olarte al lago ya que han sido influenciado en los niveles de este.

Evaluación del efecto del cambio climático en la hidrología superficial de la cuenca hidrográfica del lago de Tota, Boyacá (Sarmiento, 2021). Concluye que “la oferta hídrica no se ve afectada por el cambio climático de forma negativa ya que se prevé un aumento entre el 5% y 30% en varias subcuencas y un total de 3% y 37% en los caudales”. Pero de acuerdo con el crecimiento de dichos caudales puede afectar negativamente la agricultura, industria piscícola, vías; el incremento de la temperatura podría ocasionar pérdidas por evapotranspiración lo que podría ocasionar a largo plazo temporadas de caudales reducidos que ocasionan bajas corrientes que abastecen el lago de Tota.

Informe batimetría lago de Tota (Lisandro Nuñez, 2014) señala que dichos informes se caracterizan por enfocarse en determinar cómo afectaría el calentamiento global la hidrología superficial de los caudales, así como la disponibilidad de recurso hídrico al mediano plazo de igual manera en reconocer mediante indicadores la efectividad en la aplicación de instrumentos económicos para garantizar la descontaminación y renovabilidad del recurso, en estos se muestran cómo el cambio climático ha alterado al lago de Tota donde se ve afectado por diferentes impactos ambientales ocasionados por las diversas intervenciones antrópicas descontroladas y mal planificadas. El artículo Contabilidad Ambiental y Económica para el Agua: Caso Piloto para la Cuenca del Lago de Tota (Corpoboyaca, 2016) y evaluación del efecto del cambio climático en la hidrología superficial de la cuenca hidrográfica del lago de Tota, Boyacá (Sarmiento, 2021) tienen en común que realizan un estudio a nivel del cambio climático en el lago de Tota donde identifican cada uno de los parámetros esenciales como: temperatura, precipitación, caudal, etc., para dar solución a los indicadores seleccionados y de igual manera

exponer cada uno de ellos y su nivel de afectación en el Lago de Tota. Entre todos los documentos encontrados, vale la pena resaltar el artículo de evaluación del efecto del cambio climático en la hidrología superficial de la cuenca hidrográfica del lago de Tota, Boyacá donde se habla de la afectación y la alteración por el cambio climático global de la oferta hídrica en el Lago de Tota.

De la información obtenida a partir de Contabilidad Ambiental y Económica para el Agua: Caso Piloto para la Cuenca del Lago de Tota (Corpoboyaca, 2016), evaluación del efecto del cambio climático en la hidrología superficial de la cuenca hidrográfica del lago de Tota, Boyacá (Sarmiento, 2021) y el informe batimetría lago de tota (Lisandro Nuñez, 2014) se utilizarán los aspectos relacionados con los indicadores relacionados con cada uno de los parámetros seleccionados y la afectación del cambio climático a diferentes comunidades tanto de Fauna nativa, como de comunidades que obtienen como fuente principal de consumo el Lago de Tota. Adicionalmente, se identificó que existen vacíos en la literatura relacionados con la afectación hacia la parte hídrica del Lago de Tota, Así pues, esta investigación pretende aportar al estudio de determinación de indicadores hídricos del cambio climático con la identificación y análisis de dichos indicadores para establecer la vulnerabilidad del cambio climático en el Lago de Tota.

## **Caso De Estudio**

### ***Ubicación***

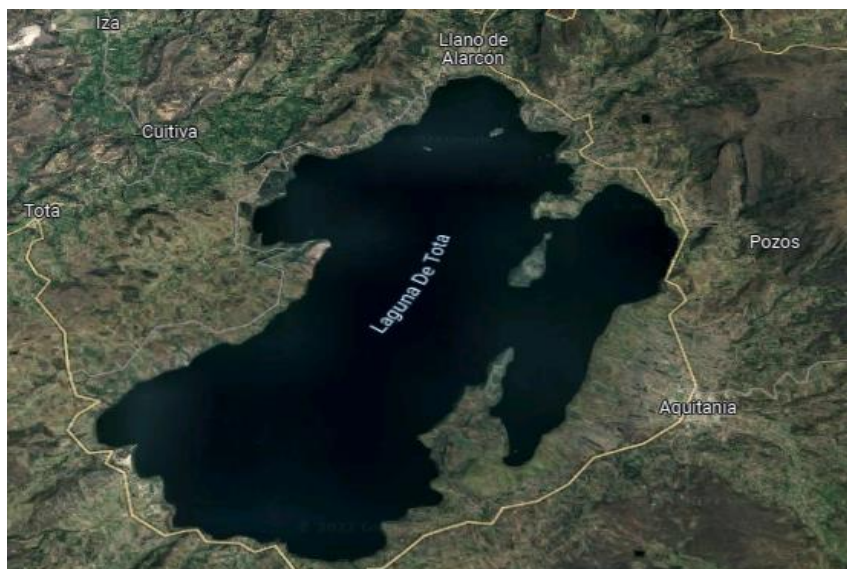
La cuenca del lago de Tota está ubicada en el departamento en Boyacá y hace parte de los municipios de Aquitania, Cuítiva, Tota y Sogamoso, esta cuenta con una extensión aproximada de 223 Km<sup>2</sup>. El lago de Tota es uno de los más grandes en cuanto a su volumen en Latinoamérica

y por su amplitud es uno de los más extensos en Colombia. El lago de Tota presenta un “almacenamiento aproximado de 1.900 millones de metros cúbicos, con una superficie de 56.5 Km<sup>2</sup>; está en una zona térmica fría a 3015 msnm” (Corpoboyacá, 2013). Dicho lago es objeto de protección ya que tiene carácter de humedal y gran parte de su extensión está en el páramo de Bijagual, constituye una de las fuentes de abastecimiento más importantes para los municipios que lo rodean, para el municipio de Aquitania sus 250.000 habitantes tienen esta fuente como sustento para actividades agrícolas, industriales y para el consumo humano.

En el año 2005 (Corpoboyaca, 2016) realizó el manejo de Ordenación y Manejo del Lago de Tota donde la corporación desarrollara medidas de conservación y protección de los recursos naturales renovables, junto con (CONPES 3. , 2014) se establecen seis programas recurso hídricos y calidad del agua, sistemas productivos, manejo de fauna suelos y flora, uso paisajístico y recreativo, participación comunitaria e institucional, y monitoreo del plan; para llegar a dicho plan de conservación y protección.

### ***Figura 1***

Ubicación del Lago de Tota



*Nota:* Adaptado de lago de Tota [fotografía], por Google Maps, 2023, *Fuente*

<https://www.google.com/maps>

En cuanto a los factores bióticos (Juan Carlos Bermudez Londono, 2021) señala que estos hacen referencia a todos los seres vivos que interactúan en un ecosistema. En el lago de Tota por varias condiciones se han visto afectados estos factores por agentes externos como contaminación, deforestación, deterioro en los nutrientes del suelo, entre otros. En el lago de Tota se evidencia que la fauna está catalogada en cinco categorías las cuales son: Artropofauna (insectos, arácnidos, crustáceos y miriápodos), Ictiofauna (peces), Herpetofauna (reptiles y anfibios), Avifauna (aves), y Mastofauna (mamíferos). Para la cobertura vegetal se presentan: Pastizales (Paramo), Pastizales Y Arbustales Heterogéneos (Páramo), Bosques, Arbustales. Los factores abióticos presentes en lago de Tota son aquellos que no tienen vida, pero si necesitamos para sobrevivir como el volumen de agua que aproximadamente tiene 1.900 millones de metros cúbicos a una temperatura de aproximadamente 17°C.

De acuerdo con (Corpoboyaca, 2016) las poblaciones de: Aquitania, Cuítiva, Sogamoso, Tota, Iza, Firavitoba y Nobsa son las que actualmente se encuentran ubicados en la cuenca del Lago de Tota y se abastecen de dicha fuente hídrica, estas poblaciones a lo largo de la última década no han tenido un aumento de población significativo; su abastecimiento del lago de Tota llega aproximadamente a 250.000 personas de dichas comunidades. Además, la mayoría de estas poblaciones realizan actividades productivas como: agricultura, acuicultura, piscicultura, ganadería, entre otras actividades.

(CONPES C. N., 2014) señala que la región del Lago de Tota presenta varios problemas ambientales como la gestión inadecuada del territorio y los recursos naturales, lo que ha generado varios problemas ambientales y socioeconómicos; la falta de planificación y control

han producido la degradación de los servicios ecosistémicos, contaminación del agua y pérdida de biodiversidad. Esto a causa de la falta de educación ambiental, intervenciones antrópicas no planificadas o descontroladas, uso excesivo de abonos y agroquímicos, ganadería extensiva, ampliación de la frontera agrícola en zonas de páramo.

El clima es un factor crucial en el lago de Tota, ya que influye en la vida de los seres vivos y condiciona la susceptibilidad de la zona a amenazas naturales, de acuerdo con (Sánchez G. U., 2014) se presentan varias amenazas naturales antropogénicas tales como: Inundaciones (alta amenaza en áreas cercanas debido a fluctuaciones de nivel de 2 metros), sismicidad (con alta amenaza según INGEOMINAS, inestabilidad del terreno con caídas de rocas, deslizamientos y caídas de árboles en sitios específicos, movimientos en masa por deslizamientos, caídas de roca y erosión en áreas específicas.

## **Metodología**

Esta metodología se desarrolló en las siguientes fases con los datos climáticos e hidrológicos existentes y establecidos por el instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), de igual manera con los indicadores hídricos sugeridos por dicho instituto que serán desarrollados y evaluados para identificar la vulnerabilidad del lago de Tota frente al cambio climático.

Fase 1. Recolección de información secundaria

Fase 2. Análisis climatológico

Fase 3. Selección de indicadores hídricos

Fase 4. Cálculo del indicador seleccionado

Fase 5: cálculo del indicador bajo escenario de cambio climático

### **Fase 1: Recolección de información secundaria**

Estos datos hidrometeorológicos fueron obtenidos principalmente de estaciones que han sido registradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la corporación autónoma regional de Boyacá (CORPOBOYACÁ), dichos datos recopilados incluyen parámetros climáticos y de caudal como: precipitación, humedad relativa, temperatura, evaporación y caudales; se seleccionaron datos desde 1984 hasta 2012 ya que de esta manera se garantiza una cobertura temporal homogénea de estaciones cercanas e influyentes al lago tales como: cazadero, cintas, guamo de sisbaca potrerito, entre otras. A continuación, se evidencia la relación de cada una de las estaciones de acuerdo con su categoría1:

**Tabla 7***Características de Estaciones*

Nombre	categoría	código	Parámetros
Estación cazadero	Pluviométrica	35090060	Precipitación
Estación Cintas	Meteorológica Especial	35095090	Precipitación
Estación guamo de sisbaca	Pluviométrica	35090070	Precipitación
Estación Potrerito	Meteorológica Especial	35095050	Precipitación
Estación Toquilla	Limnimétrica	35197080	Precipitación  Humedad Relativa  Temperatura
Estación Aquitania	Climática Principal	35095120	Humedad Relativa  Temperatura  Evaporación
Estación Criadero	Limnimétrica	35097050	Caudal

Estación canal de desviación	Limnimétrica	35097020	Caudal
Estación desaguadero	Limnimétrica	35097010	Caudal
Hato la Laguna	limnimétrica	35097030	Caudal

*Nota:* esta tabla muestra las características de las estaciones. *Fuente:* ((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004).

## **Fase 2: Análisis climatológico y de caudales**

Para dicho análisis se consideró que las estaciones anteriores presentaran los datos de los parámetros tales como: precipitación, Humedad Relativa, Temperatura, Evaporación y Caudal correspondieran a los años entre 1984 a 2012 y de esta manera tener datos en la misma línea de tiempo, así como su ubicación cercana e influyente en el lago de Tota; esta información climatológica fue el fundamento para conocer las características que han variado a causa del cambio climático. Posteriormente se consideró la validación de datos donde se verifico de que dichos datos climáticos y de caudal correspondieran al periodo de tiempo seleccionado; se realizó la identificación de patrones en el cual al observar la tendencia de los datos de precipitación, temperatura y caudales se pueden detectar los cambios en las condiciones climáticas; Finalmente se utilizó el software Microsoft Excel el cual facilito realizar el análisis estadístico y grafico de los parámetros evaluado.

De acuerdo con (RAE.ES, 2022) se define como caudal a la cantidad de agua que circula por un conducto por cierta unidad de tiempo, puede ser un caudal mínimo, caudal de mantenimiento,

caudal de acondicionamiento, caudal ecológico y caudal ambiental; en el análisis realizado de dichos caudales se identificó las subcuencas, área y volumen con la que llegan al lago de Tota.

### Fase 3: Selección de Indicador hídrico

Los indicadores que pueden ser aplicables según información recolectada, para la identificación de la vulnerabilidad del cambio climático en el lago de Tota, se eligieron debido a su capacidad para reflejar características clave del sistema hídrico y su sensibilidad al cambio climático.

#### Tabla 8

*Indicadores aplicables para la identificación de la vulnerabilidad del cambio climático*

Indicador	Descripción	Formula
Índice de retención y Regulación Hídrica (IRH)	Este índice mide la capacidad de retención de humedad de las cuencas con base en la distribución de las series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios. Este índice se mueve en el rango entre 0 y 1, siendo los valores más bajos los que se interpretan como de menor regulación	$IRH = VP/VT$
Índice de Aridez (IA)	Es una característica cualitativa del clima, que permite medir el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de una región. Identifica áreas	$IA = ETP - ETR / ETP$

---

	deficitarias o de excedentes de agua, calculadas a partir del balance hídrico superficial.	
	El IUA se calcula para las unidades hidrográficas de análisis, según la zonificación regional.	
Índice de uso del agua superficial (IUA)	Adicionalmente, se puede generar para unidades hídricas fuentes de abastecimiento de acueductos municipales como indicativo de la presión. Depende en gran medida de la resolución y escala de la información.	$IUA = (Dh / OHRD) * 100$
Índice de calidad del agua (ICA)	Este índice se evalúa a través de un valor numérico el califica cinco categorías con un conjunto de siete variables las cuales están registradas en una red de monitoreo; este indicador nos determina la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua, así como identificar problemas de contaminación. Este determina valores donde 0 es una calificación muy mala y 1 buena.	

---

*Nota:* Esta tabla muestra Indicadores aplicables para la identificación de la vulnerabilidad del cambio climático. *Fuente:* ((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004)

De los indicadores presentados en la **Tabla 8** se seleccionaron estos índices de acuerdo con las características que posee cada uno:

Índice de Retención y Regulación Hídrica: “Presenta una capacidad de regular el flujo hídrico, importante para garantizar el suministro continuo durante épocas de sequía, además proporcionar información necesaria sobre eventos climáticos extremos”. ((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004).

Índice de Aridez: “presenta un adaptabilidad climática que permite relacionar variables directamente influenciadas por el cambio climático (precipitación y evapotranspiración)” ((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004); muestra vulnerabilidad hídrica esencial para evaluar la capacidad de sostener el funcionamiento actual y futuro de los ecosistemas presentes en el Lago de Tota, así como la opción de poder evaluar los escenario futuros, generando la información sobre los posibles déficit hídricos y el impacto que se genera en los ecosistemas presentes.

Índice de Uso superficial de agua: es importante ya que es posible evaluar la oferta hídrica de las actividades humanas tales como agricultura, ganadería, piscicultura; de igual manera proporciona datos fundamentales para implementar estrategias de uso sostenible y mitigar la sobreexplotación.

Índice de Calidad del Agua: es de gran importancia ya que es útil para identificar riesgos como crecimiento excesivo de algas y la disminución de oxígeno de agua, además permite priorizar acciones para reducir la carga contaminante y proteger los ecosistemas acuáticos.

Finalmente, se escogió el índice de aridez teniendo en cuenta la información, los cambios en la temperatura y la lluvia que se pueden ver reflejados en el cálculo de la ETP y ETR, entre otros. Así mismo por su característica cualitativa que permite medir el grado de suficiencia o

ineficiencia de las precipitaciones, así como la identificación de la existencia de zonas con déficit o excedentes de agua.

#### **Fase 4 Cálculo del indicador seleccionado**

Para el cálculo del índice de aridez fue necesario identificar la evapotranspiración potencial (ETP) y la evapotranspiración real (ETR), a continuación, se muestra el paso a paso del cálculo de cada uno y los métodos utilizados.

##### ***Evapotranspiración Potencial Mensual (ETP)***

De acuerdo con ((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004) se entiende como evapotranspiración aquella cantidad de agua que se evapora en cierto clima. Dicha evapotranspiración comprende todos los tipos de superficie tales como: agua, suelo, vegetación y se expresa de acuerdo con la altura de agua es decir en mm (milímetros).

Para el cálculo de la evapotranspiración se utilizaron varios métodos como: el método de Thorthwaite, método de Turc, y método de Hargreaves, donde para el valor de **ETP** final se realiza el promedio del cálculo de la ETP de los métodos seleccionados, durante los años de 1984 a 2012 estos cálculos se realizaron con ayuda del programa Microsoft office Excel.

Método de Thorthwaite donde es necesario conocer las variables de Índice Calórico anual (I), Temperatura media mensual (T) expresada en °C, a través de la formula

$$ETP = 0.53 \left( \frac{10T}{I} \right)^a$$

$$I = 12 \left[ \left( T \frac{annual}{5} \right) \right]^{1.514}$$

Método Turc este método se utiliza cuando la humedad relativa media mensual es inferior al 50%, es necesario conocer temperatura media mensual y radiación global, por medio de la siguiente formula:

$$ETP = K \left( \frac{T}{T + 15} \right) (RG + 50) \left( \frac{1 + 50 - HR}{70} \right)$$

Método de Hargreaves es necesario conocer Temperatura media (T.med), Radiación en el topo de la atmosfera (Ro), Temperatura Máxima (T.max), Temperatura Mínima (T.min), por medio de la formula:

$$ETP = 0,023 * (Tmed + 17,78) * Ro * (Tmax - Tmin) * 0,5$$

### ***Evapotranspiración Real (ETR)***

La evapotranspiración real corresponde al agua que verdaderamente se evapora en la superficie del suelo y de la cubierta vegetal, esta es expresada en mm (milímetros); la ETR se calculó a través de la ecuación de Budyko donde se obtuvo el promedio entre los años 1984 a 2012, para dicho calculo es necesario conocer Evapotranspiración Potencial (ETP) y Precipitación (P), estos cálculos se realizaron con ayuda del programa Microsoft office Excel.

$$ETR = \left\{ ETP * P * \tanh \left( \frac{P}{ETP} \right) * \left[ 1 - \cosh \left( \frac{P}{ETP} \right) + \sinh \left( \frac{ETP}{P} \right) \right] \right\}^{1/2}$$

ETR = evapotranspiración Real (mm/año)

ETP = evapotranspiración potencia (mm/año)

P = precipitación media de la cuenca (mm/año)

### *Índice de Aridez (IA)*

En la **Tabla 1**; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se pueden identificar los rangos en que se presentó el índice de aridez; para el cálculo se realizó a través de la ecuación en la cual es necesaria conocer la Evapotranspiración Real (ETR) y la Evapotranspiración Potencial (ETP), estos cálculos se realizaron con ayuda del programa Microsoft office Excel.

$$IA = \frac{ETP - ETR}{ETP}$$

### **Fase 5: cálculo del indicador bajo escenario de cambio climático**

#### *Variación de la temperatura en el año 2040 y 2070*

El ((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004) realizó un estudio técnico completo donde desarrollo una investigación para detectar la variación de la temperatura en años futuros a causa del cambio climático, donde a través de varios escenarios fundamentales en las regiones de Colombia se puede tener un indicador del aumento de la temperatura, para este estudio se tomó el escenario RCP4.5, para los años 2040 y 2070, en estos años incrementara un porcentaje como se refleja en la **Tabla 9**

**Tabla 9**

*Incremento de temperatura 2040 y 2070*

Trimestre	DEF	MAM	JJA	SON
Aumento				
2040	0.99	0.93	0.89	0.9

2070	1.85	1.73	1.64	1.53
------	------	------	------	------

*Nota:* Esta tabla muestra el incremento de la temperatura para los años 2040 y 2070. *Fuente:*

((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004).

### ***Variación de la precipitación en el año 2040 y 2070***

En los últimos años a causa del cambio climático se ha visto afectada la precipitación en varias regiones del mundo y del país, causando sequias en épocas donde era evidente abundante la lluvia o por otra parte aumentando inundaciones desbordando ríos, quebradas y demás fuentes hídricas causando grandes desastres en poblaciones, por esto el IDEAM ha realizado un estudio detallado donde refleja el porcentaje de aumento o disminución de la precipitación en los años 2040 y 2070 por trimestres en el país, así como se da a conocer en **Tabla 10**.

### **Tabla 10**

#### *Aumento de Precipitación años 2040 y 2070*

	DEF	MAM	JJA	SON
Trimestre				
Aumento				
2040	1.26	-1	6.41	0.08
2070	0.77	4.83	1.56	-0.24

*Nota:* Esta tabla muestra el aumento de la precipitación para los años 2040 y 2070. *Fuente:*

((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004)

## Resultados y discusión

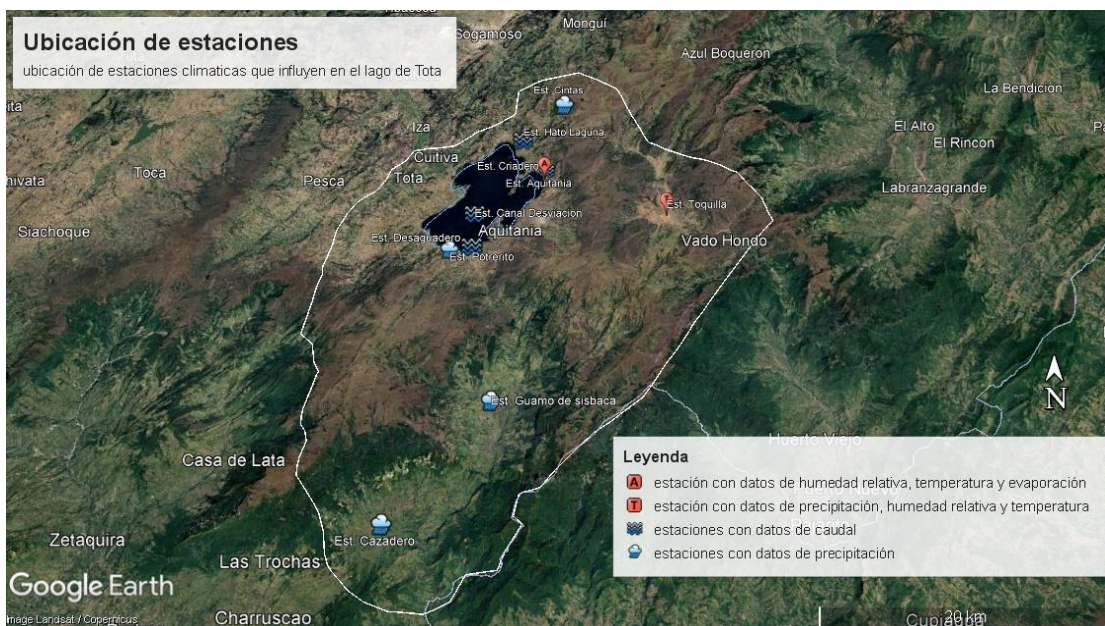
### Selección De Estaciones

En la **Figura 2**, se presenta la ubicación de las estaciones climatológicas identificadas cerca y/o dentro del área de estudio y cuyos datos fueron recopilados para el presente estudio.

Posteriormente se describe la ubicación mediante coordenadas geográficas, características climatológicas y análisis de datos seleccionados de las estaciones elegidas, que hacen parte de la red hidrometeorológica del IDEAM y la corporación autónoma regional de Cundinamarca. ((IDEAM) Instituto de Hidrología, 2004).

### Figura 2

#### Ubicación de estaciones



*Nota:* Esta imagen muestra la ubicación de las diferentes estaciones que influyen en el lago de Tota. *Fuente:* Autor

### ***Estación Cazadero***

Se encuentra ubicada entre los paralelos  $5^{\circ}17'00.00''$  de latitud Norte y los meridianos  $72^{\circ}59'00.05''$  de longitud Oeste del meridiano de Greenwich; expresa los datos de una precipitación unimodal donde se presenta una época húmeda durante los meses de junio hasta agosto donde el porcentaje de lluvias llega hasta un 370%, y una época seca donde se disminuye significativamente el volumen de lluvias durante los meses de diciembre a febrero donde alcanza a llegar a un 45% de precipitación véase en la ***Figura 3***.

### ***Estación cintas***

Se encuentra ubicada entre los paralelos  $5^{\circ}37'00.14''$  de latitud Norte y los meridianos  $72^{\circ}52'00.02''$  de longitud Oeste del meridiano de Greenwich; presentando los datos de precipitación donde tienen una gran similitud con los datos de la estación cazadero, ya que durante los meses de agosto hasta julio se evidencia una época húmeda con un porcentaje de 370%, y una época seca durante los meses de diciembre a febrero disminuyendo de manera significativa el volumen de precipitación hasta un 45% véase en la ***Figura 3***.

### ***Estación guano de sisbaca***

Se encuentra ubicada entre los paralelos  $5^{\circ}22'00.55''$  de latitud Norte y los meridianos  $72^{\circ}55'00.05''$  de longitud Oeste del meridiano de Greenwich; presentando los datos de precipitación con un régimen unimodal ya que durante los meses de mayo hasta agosto se evidencia una época húmeda con un porcentaje 185%, y en los meses de diciembre hasta febrero tiene una disminución del volumen de lluvias hasta llegar a un 15% véase en la ***Figura 3***.

### ***Estación Potrerito***

Se encuentra ubicada entre los paralelos 5°29'01.61'' de latitud Norte y los meridianos 72°56'59.78'' de longitud Oeste del meridiano de Greenwich; presenta los datos de precipitación con un régimen bimodal ya que durante todo el año presenta dos épocas húmedas las cuales son de abril hasta julio con un porcentaje de 116 % y en los meses de octubre y noviembre con un 82%, en los meses de diciembre a febrero se evidencia una disminución hasta un 14% del volumen de lluvias véase en la **Figura 3**.

### ***Estación Toquilla***

Se encuentra ubicada entre los paralelos 5°31'26.60'' de latitud Norte y los meridianos 72°47'27.16'' de longitud Oeste del meridiano de Greenwich; presenta los datos de Precipitación, humedad relativa, y temperatura. En esta estación la precipitación presenta un régimen unimodal pues se refleja una época húmeda durante los meses de junio hasta agosto con un porcentaje de 250%, y una época seca en los meses de diciembre a marzo con un porcentaje mínimo de 13% véase en la **Figura 3**. La Humedad Relativa se evidencia un mayor porcentaje que se presenta durante los meses de abril hasta septiembre con un porcentaje de 75% donde coincide con la época húmeda de mayor precipitación y en los meses de diciembre a febrero donde se presenta la época seca se evidencia una disminución mínima de la humedad relativa con un 50% véase en la **Figura 4**. En cuanto a la temperatura presenta una temperatura máxima de 7.9 °C durante los meses de abril a mayo, en los meses de octubre a diciembre disminuye la temperatura hasta 7.5 °C y presenta una temperatura mínima de 7 °C en el mes de marzo véase en la **Figura 5**.

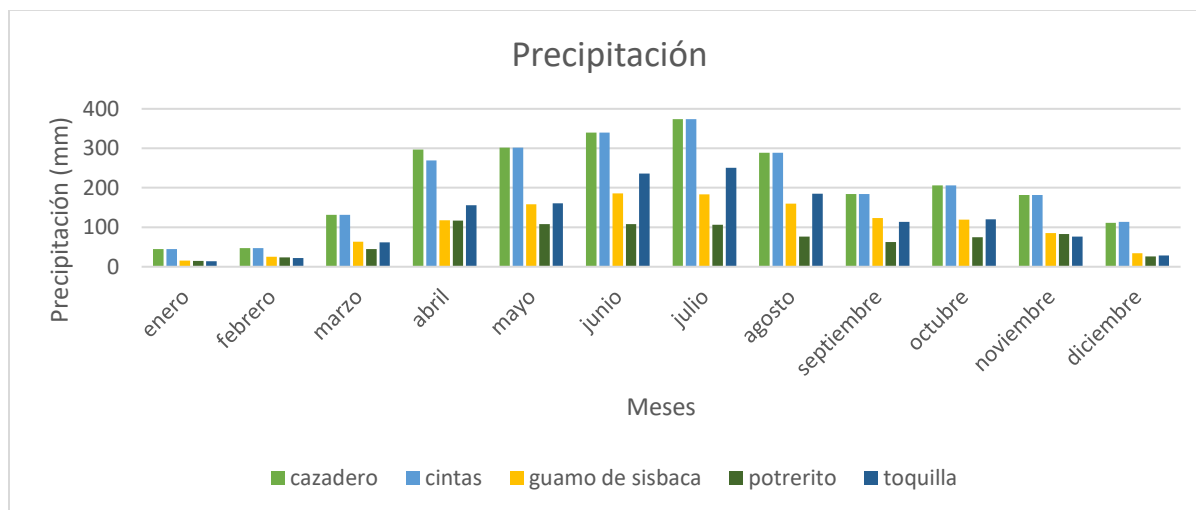
### **Estación Aquitania**

*Se encuentra ubicada entre los paralelos 5°33'23.90'' de latitud Norte y los meridianos 72°52'54.30'' de longitud Oeste del meridiano de Greenwich; presenta los datos de Humedad Relativa, temperatura y evaporación. La humedad Relativa máxima multianual presente es de un 65% donde los mayores valores se presentan entre los meses de mayo a julio y de septiembre a noviembre y los menores valores en épocas secas tales como los meses de diciembre a marzo con un valor de 45% véase en la **Figura 4**. Dicha estación presenta una temperatura del aire máxima diaria de 9.5 °C durante los meses de temporada húmeda es decir en los meses de abril hasta junio y aumentando en el mes de noviembre, en la época seca en los meses de diciembre febrero se presenta una disminución de la temperatura llevando a los 7°C véase en la **Figura 5**. La evaporación durante los años 2006 a 2011 presento un régimen unimodal ya que durante los meses de junio a noviembre presento valores altos siendo agosto un mes con una evaporación de 1314 (mm) y durante los meses de diciembre hasta abril se presentó una disminución baja de la evaporación con 582 (mm) en el mes de enero véase en la*

### **Figura 6.**

**Figura 3**

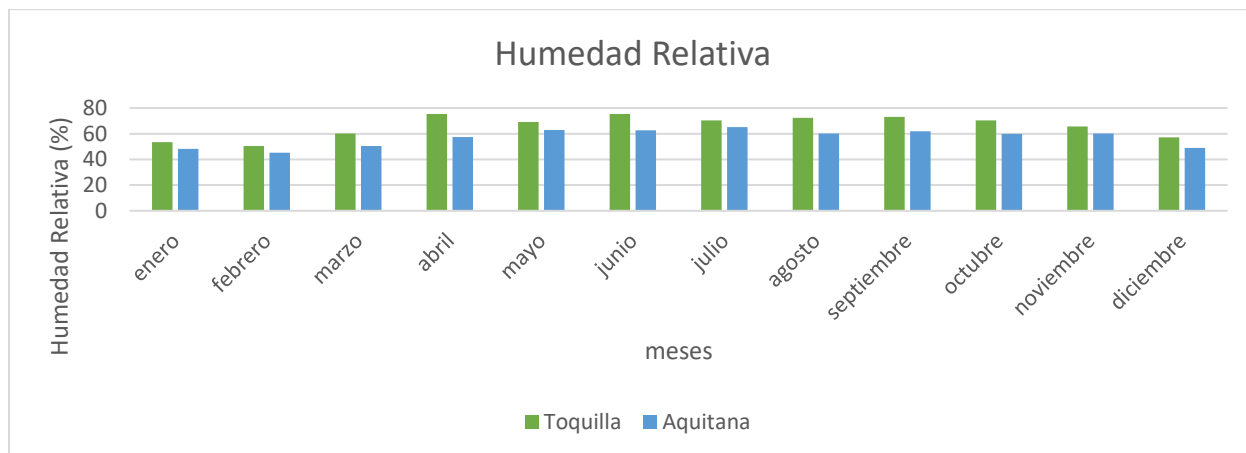
*Precipitación mensual en las diferentes estaciones*



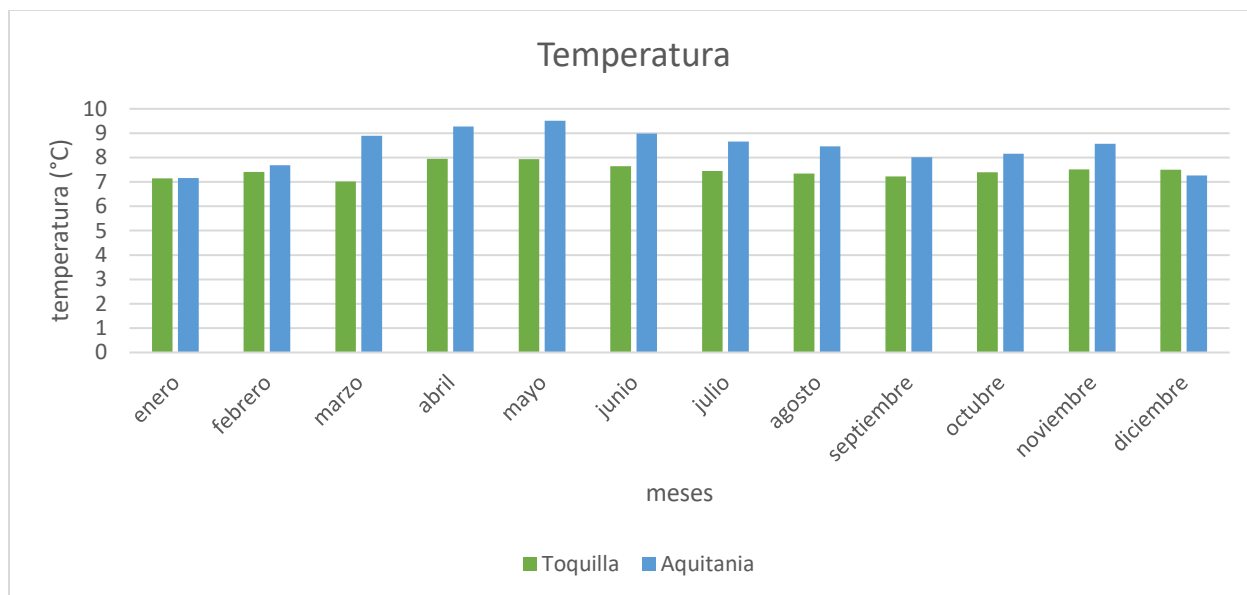
*Nota:* esta grafica muestra la variación de la precipitación en las diferentes estaciones durante los años de 1984 a 2012. *Fuente:* Autor

**Figura 4**

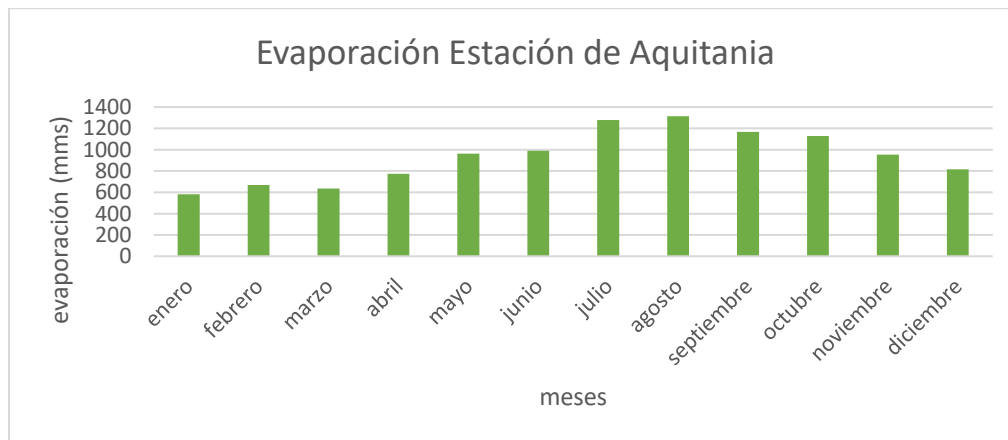
*Humedad Relativa en diferentes estaciones*



*Nota:* esta grafica muestra la variación de la humedad relativa en las diferentes estaciones durante los años de 1984 a 2012. *Fuente:* Autor

**Figura 5***Temperatura en las diferentes estaciones*

*Nota:* esta grafica muestra la variación de la temperatura en las diferentes estaciones durante los años de 1984 a 2012. *Fuente:* Autor

**Figura 6***Valores de evaporación estación de Aquitania*

*Nota:* esta grafica muestra la variación de la evaporación en la estación de Aquitania durante los años de 1984 a 2012. *Fuente:* Autor

### ***Estación Criadero***

Se encuentra ubicada entre los paralelos  $5^{\circ}17'00.00''$  de latitud Norte y los meridianos  $72^{\circ}59'00.05''$  de longitud Oeste del meridiano de Greenwich; presenta los datos del caudal durante años 1990 a 2001 y en la época húmeda donde se relaciona con el aumento de precipitaciones en los meses de junio hasta agosto presenta un régimen unimodal ya que evidencia un caudal de  $0.43 \text{ m}^3/\text{s}$  en el mes de julio, en la época seca de diciembre a abril donde disminuye el volumen de lluvias el caudal mínimo es de  $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$  en el mes de marzo véase en la **Figura 7**.

### ***Estación canal de desviación***

Se encuentra ubicado entre los paralelos  $5^{\circ}31'05.81''$  de latitud Norte y los meridianos  $72^{\circ}55'59.82''$  de longitud Oeste del meridiano de Greenwich; presenta los datos del caudal durante años 1990 a 2001 presento un caudal hacia el lago de Tota de  $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$  como el valor más alto presente en el mes de julio, por el contrario, en los meses de diciembre a abril se presentó un caudal mínimo donde en el mes de febrero se evidencia un valor de  $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$  véase en la **Figura 7**.

### ***Estación desaguadero***

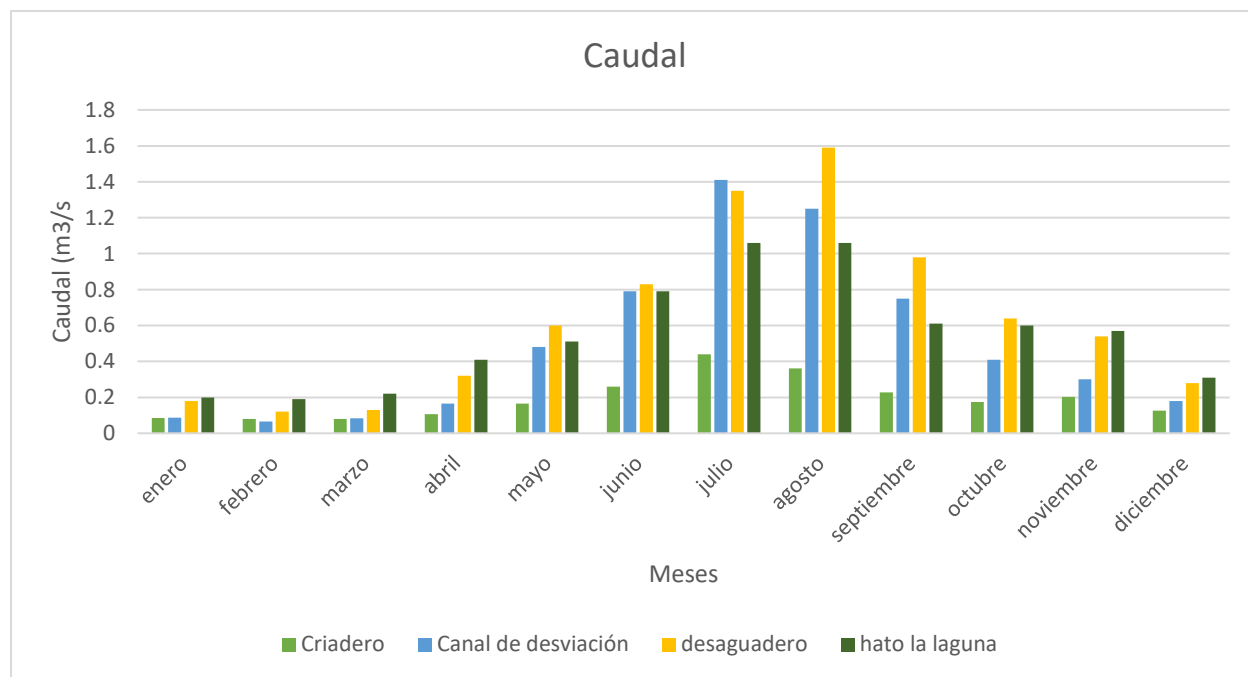
Se encuentra ubicado entre los paralelos  $5^{\circ}29'14.01''$  de latitud Norte y los meridianos  $72^{\circ}56'02.89''$  de longitud Oeste del meridiano de Greenwich; presenta los datos del caudal, durante años 1990 a 2001 muestra un régimen unimodal ya que presenta un pico de caudal en los meses de julio a septiembre donde coincide con la época húmeda, en el mes de agosto el caudal tiene un valor de  $1.59 \text{ m}^3/\text{s}$ , y en la época seca se evidencia la disminución del caudal a un valor de  $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$  en el mes de febrero véase en la **Figura 7**.

### *Hato la Laguna*

Se encuentra ubicado entre los paralelos 5°35'08.96'' de latitud Norte y los meridianos 72°53'54.31'' de longitud Oeste del meridiano de Greenwich; presenta los datos del caudal, la estación hato laguna ubicada al norte del Lago durante años 1990 a 2001 al igual que las otras estaciones presenta un régimen unimodal con un caudal más alto durante la época húmeda en los meses de junio hasta agosto, donde en el mes de julio y agosto tiene un caudal de 1.06 m<sup>3</sup>/s, y en los meses de enero hasta marzo durante la época seca se tiene un caudal mínimo de 0.19 m<sup>3</sup>/s véase en la **Figura 7**.

### **Figura 7**

*Caudal en las diferentes estaciones*



*Nota:* esta grafica muestra la variación del caudal de las diferentes estaciones durante los años de 1984 a 2012. *Fuente:* Autor

## **Análisis Climatológico y de caudales**

### ***Análisis Climatológico***

Como se ha demostrado en varios estudios realizados el cambio climático ha generado que varios ecosistemas se vean afectados por el cambio de las características propias como temperatura, humedad, precipitación etc. Al desarrollar el cálculo del índice de aridez según datos obtenidos en el cálculo de la variación de la precipitación y temperatura para la actualidad y el escenario del cambio climático se puede obtener un rango con el cual se pudo identificar si su cambio fue altamente crítico o si por el contrario tuvo una mejoría en comparación con el estado actual.

### ***Análisis De Caudales***

La Cuenca del Lago de Tota está conformada por 23 subcuencas, donde el Río Hato Laguna, el Río Tobal y el Río Olarte se caracterizan por ser las de mayor área con 31, 33 y 25 km<sup>2</sup>, respectivamente siendo el Río Olarte el que aporta el mayor caudal al lago (2,08 m<sup>3</sup> /s). En general, la mayoría de las subcuencas se encuentran en procesos de deterioro, destacándose la quebrada La Mugre con los mayores problemas de contaminación.

La cuenca sin embargo cuenta con una única salida conformada por una estructura de rebose y control de nivel, la que permite evacuar los caudales en exceso a la cota de 3.015 metros, la que se encuentra localizada hacia la salida del río Upía en el sitio conocido como Desaguadero (Corpoboyaca, 2016). En la siguiente tabla se evidencia los municipios y el aporte en metros cúbicos por segundo que realiza cada quebrada al lago.

**Tabla 11***Aportes de Caudal al Lago de Tota*

Municipio	Quebrada	Aporte al lago m <sup>3</sup> /s	Total, por municipio
	Hato la Laguna	0.58	
	Los pozos	0.25	
	El mugre	0.12	
Aquitania			4.63
	El manzano	0.01	
	Rio Tobal	1.59	
	Rio Olarte	2.08	
Tota	La puerta, Arrayanes, y Donsiqui	0.132	0.132
Cuítiva	El salitre, la cruz, los ricos y el curto	0.03	0.03

*Nota:* Esta tabla muestra los aportes de caudal al Lago. *Fuente:* (Corpoboyaca, 2016)

### **Cálculo de índice de aridez en la actualidad y escenario del cambio climático**

#### ***Actualidad***

**Evapotranspiración potencial.** De acuerdo con los datos de la **Figura 8;Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la ETP no presenta una variación significativa en la

actualidad ya que el valor mínimo se presenta en el mes de noviembre con aproximadamente 50 mm/d y su máximo valor en el mes de mayo con aproximadamente 60 mm/d, cuyos cálculos se realizaron con ayuda del programa Microsoft office Excel.

**Evapotranspiración Real.** según lo evidenciado en la **Figura 9** la ETR presenta un aumento creciente en el primer semestre y aumentos y disminuciones durante el semestre final, el valor mínimo es de aproximadamente 5 mm/d y su mayor valor se encuentra en aproximadamente 25 mm/d

**Índice de Aridez.** Aunque en la **Figura 10** no hay una variación muy notable si es evidente su valor mayor a 0.6 para todos los meses, a mitad de año en los meses de (abril a julio) presenta una notable disminución y aumento a principios y final de año, pero que supone un alto déficit de agua que representa un estado crítico para dicha zona de estudio a causa de la alta radiación y pocas precipitaciones que se han dado.

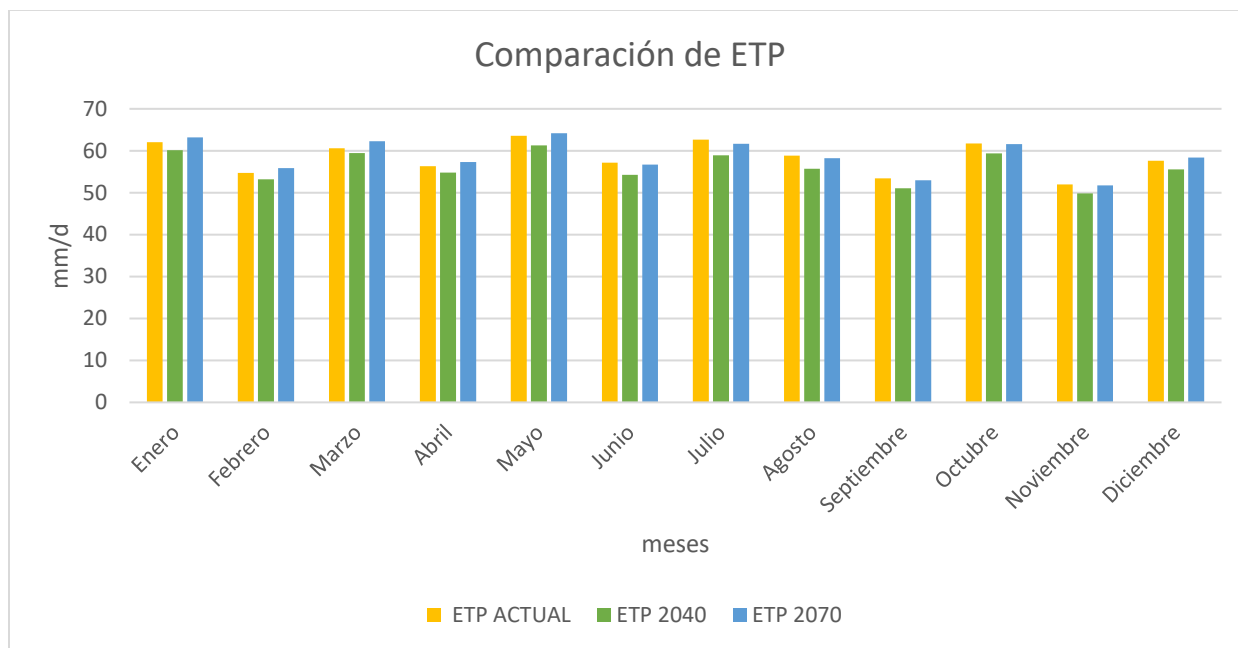
#### *Escenario cambio climático años 2040 y 2070*

**Evapotranspiración potencial.** Al analizar la **Figura 8** se muestran los resultados para los diferentes años de estudio que se realizaron con ayuda del programa Microsoft office Excel; se puede apreciar que no se ve una relevante diferencia en la evapotranspiración potencial, aunque el año 2040 presenta una disminución no significativa si es notoria a comparación del año 2070; en el mes de noviembre presenta un nivel mínimo de aproximadamente 50 mm/d y el mes de mayo es el mes predominante con un valor de aproximadamente 65 mm/d.

**Evapotranspiración real.** Al analizar la **Figura 9** se puede apreciar que a diferencia de la ETP, la ETR si muestra una gran variación a los largo de los diferentes meses; en el trimestre de (diciembre, enero, y febrero) se presenta los menores valores y aumenta significativamente

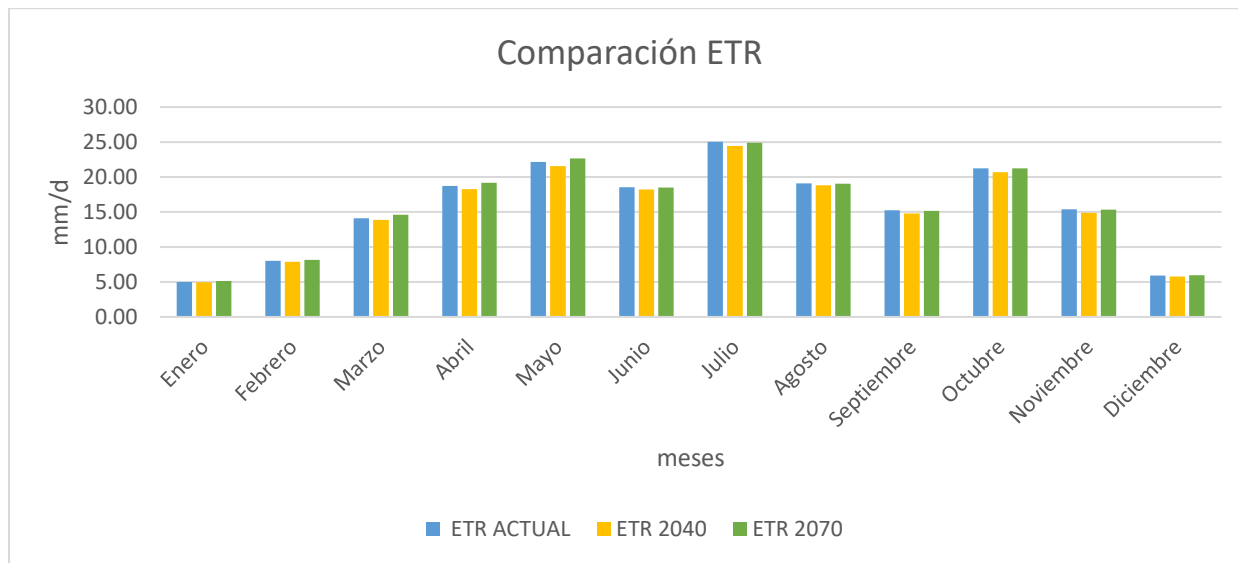
para el trimestre de (mayo, julio y octubre); en definitiva en el mes de enero se identifica un creciente aumento hasta el mes de junio donde muestra un disminución evidente, los siguientes meses se observan valores decrecientes hasta octubre donde incrementa y vuelve a disminuir hasta el mes de diciembre, pero si es constante en los años 2040 y 2070 ya que muestra una similitud en dichas cifras.

**Índice de aridez.** Se observa de forma general que no hay un cambio sustancial en el Índice de aridez, ya que el cambio en la temperatura es relativamente bajo y se compensa con el pequeño aumento en la precipitación, en este caso es favorable para la zona ya que, aunque van a aumentar las temperaturas también van a aumentar las precipitaciones. En cuanto a el índice de aridez en general sí se evidencia que es mayor a 0.6 para todos los meses, lo que significa un alto déficit de agua, aunque no va a empeorarse con los escenarios de cambio climático igualmente al igual que en el estado actual es crítico para la zona, debido a la alta radiación solar y poca precipitación a lo largo del año.

**Figura 8***Evapotranspiración potencial*

*Nota:* esta grafica muestra la comparación de la ETP durante los años 2040, 2070 y actual.

*Fuente:* Autor

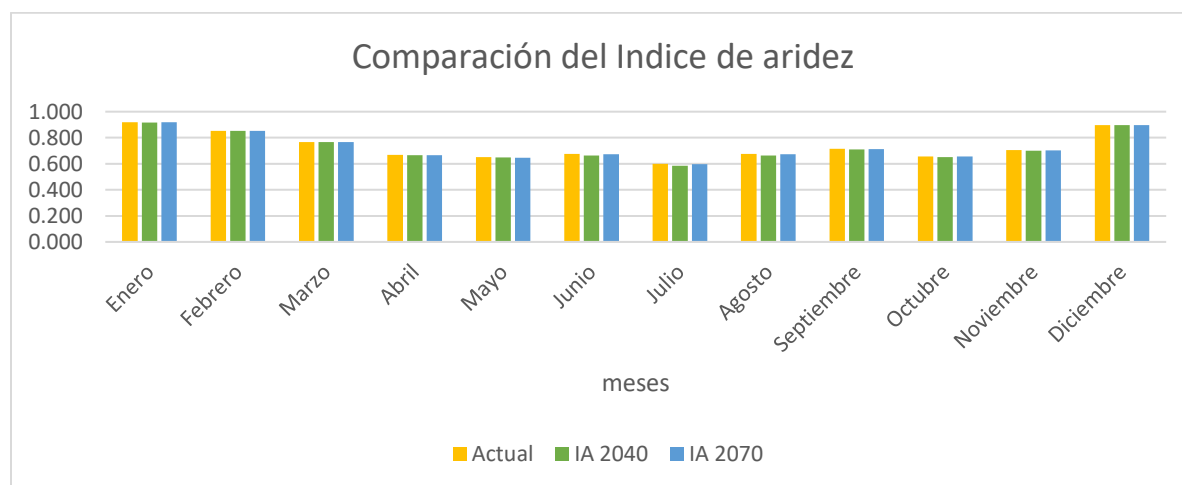
**Figura 9***Evapotranspiración real*

*Nota:* esta grafica muestra la comparación de la ETR durante los años 2040, 2070 y actual.

*Fuente:* Autor

### Figura 10

*índice de aridez*



*Nota:* esta grafica muestra la comparación del Índice de Aridez durante los años 2040, 2070 y actual. *Fuente:* Autor

### Discusión de los análisis de resultados

El lago de Tota actualmente es uno de los más importantes de Colombia, el cual ha presentado varios problemas a causa de factores naturales y antrópicos. De acuerdo con el análisis realizado presenta varias características, tales como:

La calidad del agua presenta una contaminación y déficit por el uso excesivo de agroquímicos, aumento de desarrollo agrícola, mal manejo de residuos; que ha generado un deterioro en la fauna y flora propias del ecosistema, eutrofización (gran aumento de niveles de fósforo y nitrógeno), lo que provoca el aumento y crecimiento de algas y plantas que afectan la oxigenación de la biodiversidad y las plantas; por otro lado los indicadores fisicoquímicos han

dado mediciones variables de pH, temperatura y solidos suspendidos, lo que es señal de una disminución de la calidad hídrica.

La oferta hídrica presenta una variación en parámetros como precipitación y caudales ya que se percibe un régimen bimodal, con épocas húmedas y secas claras, no obstante, el aporte hídrico está disminuyendo en varias subcuencas a causa de cambios climáticos y actividades antrópicas; por otra parte, la ETP se mantiene parcialmente constante pero la ETR muestra cambios estacionales importantes durante los meses secos. El déficit de agua de acuerdo con el índice de aridez para el lago de Tota presenta valores mayores a 0.6 lo que da a conocer un déficit hídrico constante y crítico, resultado por la alta radiación solar y la poca precipitación

Aproximadamente 250.000 habitantes dependen del lago para consumo doméstico, actividades agrícolas, ganadería y actividades industriales, lo que ha aumentado la demanda de dichos recursos hídricos y superando en algunos caos la capacidad de restablecimiento de la cuenca; municipios como Aquitania y Cuítiva resaltan por el uso intensivo de recursos especialmente en la agricultura y piscicultura, aunque estas son muy importantes en la economía local también presentan un deterioro del ecosistema propio de la región.

Se espera que para los años 2040 y 2070 se tenga un aumento de la temperatura promedio de 1.85 °C y un leve aumento en las precipitaciones en algunos meses de acuerdo con el escenario RCP 4.5; en el caso de la ETR puede que disminuya en los primeros meses del año y aumentar significativamente en la mitad de año, por lo que se obtendrá fluctuaciones en la disponibilidad hídrica.

Aunque las proyecciones no muestran cambios radicales de acuerdo con el índice de aridez, este se mantiene en una posición crítica, por déficit hídricos continuos debido a la baja capacidad de regulación del lago de Tota.

## Conclusiones

De acuerdo con el análisis realizado en el Lago de Tota se evidencio un cambio climático el cual ha producido variaciones en parámetros como precipitación y temperatura, dichos cambios han afectado de manera significativa la disponibilidad del agua y la estabilidad de los ecosistemas lenticos. En el caso de la precipitación esta presenta un régimen bimodal con épocas húmedas y secas bien definidas, en cambio la temperatura presenta incrementos que afectan la evapotranspiración lo que influye también en la disponibilidad hídrica.

Se identificaron varios aspectos hidrológicos que influyen en la vulnerabilidad ante el cambio climático para la lago de Tota, tales como la variación de los caudales de las subcuencas que alimentan el Lago.

La capacidad de retención y regulación hídrica y la calidad del agua afectada por la contaminación y el excesivo uso de agroquímicos, lo que ha contribuido a un déficit hídrico que se presenta en mayor medida en épocas secas.

Según el análisis realizado en el uso de indicadores hídricos como el índice de aridez, ha permitido medir la vulnerabilidad de la lago de Tota frente al cambio climático, esta ha mostrado un valor mayor a 0.6 lo que indica un déficit hídrico y constante. Adema este indicador ha sido esencial para evaluar la capacidad que tiene los ecosistemas de poder sostenerse bajo estas condiciones actualmente y en condiciones futuras.

Se determinó el Índice de Aridez como indicador hídrico principal para así evaluar la vulnerabilidad del Lago de Tota, los cálculos obtenidos del IA (índice de aridez) para los años 2040 y 2070 bajo el escenario RCP4.5, evidenciaron que aunque se espera un leve aumento en la precipitación, el déficit hídrico seguirá siendo crítico por la alta radiación solar y la

insuficiente planificación de las actividades antrópicas, este indicador nos ha proporcionado una evaluación detallada y no ha facilitado identificar áreas prioritarias para la conservación y mitigación de los efectos del cambio climático.

## Bibliografía

- (Ideam) instituto de hidrología, m. Y. (2004). *Ideam.gov.co*. Obtenido de ideam.gov.co:  
<http://www.ideam.gov.co/>
- Barreto, I. (2021). *10 de las especies más amenazadas por el cambio climático*. Colombia .
- Conpes, 3. (2014). *Manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica del lago de tota*.  
Bogotá.
- Conpes, c. N. (2014). *Manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica del lago de tota*.  
Bogotá.
- Corpoboyacá. (2013). *Contabilidad ambiental y económica para el agua: caso piloto para la cuenca del lago de tota*. Obtenido de corpoboyacá.gov.co:  
<https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2016/05/informe-cuenta-del-agua-lago-tota-.pdf>
- Corpoboyaca. (2016). *Contabilidad ambiental y económica para el agua: caso piloto para la cuenca del lago de tota* .
- Deisy romero rodríguez, g. B. (2014). *VARIABLES AMBIENTALES DURANTE BLANQUEAMIENTO CORALINO* .  
Santa martha-colombia : scielo.
- Garzón, I. S. (2012). *Determinación del estado trófico de tres ecosistemas lénticos de a sabana de bogotá con base al fitoplancton, en dos periodos climáticos contrastantes*. Bogotá.
- Humboldt, I. D. (s.f.). *Humboldt.org.co*. Obtenido de humboldt.org.co:  
<http://www.humboldt.org.co/>

Juan carlos bermudez londono, j. D. (2021). *Valoración económica ambiental de la laguna de tota un componente par componente para la conser a la conservación de la cuenta hídrica y e ación de la cuenta hídrica y evaluar la aluar la importancia del bien ambiental en caso de una amenaza de deterioro.*

Lisandro nuñez, j. V. (2014). *Informe batimetria lago de tota .* Grupo de modelaciòn subdirecciòn de hidrologia.

Marin, g. O. (2011). *Cambio climático en america latina y el caribe.* Comisión económica para américa latina y el caribe.

Minambiente. (1994). *Ministerio de ambiente.* Obtenido de ministerio de ambiente:

<https://www.minambiente.gov.co/asuntos-internacionales/convenio-sobre-cambio-climatico/#:~:text=el%20convenio%20marco%20de%20las,lucha%20contra%20el%20cambio%20clim%c3%a1tico.>

Nacion, p. G. (19 de septiembre de 2019). *Https://www.procuraduria.gov.co/.* Obtenido de

[https://www.procuraduria.gov.co/:](https://www.procuraduria.gov.co/)

[https://www.procuraduria.gov.co/portal/media/file/concepto\\_procurador//686\\_d-10348%20c5831.pdf](https://www.procuraduria.gov.co/portal/media/file/concepto_procurador//686_d-10348%20c5831.pdf)

Planeación, d. C. (31 de enero de 2014). *Manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica del lago de tota.* Bogotá. Obtenido de c:/users/usuario/downloads/conpes-3801-de-2014.pdf

Posada, c. C. (2007). *La adaptacion al cambio climatico en colombia .* Bogotá.

Rae.es. (21 de abril de 2022). Obtenido de rae.es:

<https://aguaymedioambienteconciencia.com/los-caudales-y-algunos-de-sus-conceptos/>

Ramirez, r. A. (2018). *Analisis multitemporal del espejo de agua del lagode tota ubicado en el departamento de boyacá .*

Roldán, I. F. (2020). *Ecosistemas lénticos: qué son y ejemplos*. Ecología verde.

Sánchez, g. U. (2005). *Zonificación de amenazas, vulnerabilidad y riesgos*. Tunja.

Sánchez, g. U. (2014). *Zonificación de amenazas, vulnerabilidad y riesgos .* Tunja.

Sarmiento, j. S. (2021). *Evaluación del efecto del cambio climático en la hidrología superficial de la cuenca hidrográfica del lago de tota, boyacá*. Bogotá.

Sostenible, s. (01 de enero de 2020). *Ambienteysociedad.org.co*. Obtenido de [ambienteysociedad.org.co](https://www.ambienteysociedad.org.co/): <https://www.ambienteysociedad.org.co/>

Thomson, p. (2015). *Un.org*. Obtenido de [un.org](https://www.un.org/): <https://www.un.org/>

Valencia, m. &. (2015). *Vulnerabilidad de humedales altoandinos ante procesos de cambio: tendencias del análisis*. Medellín: revista ingeniería universidad de medellín.

Zapata, g. L. (2012). *Metodología para determinar niveles de eutrofización en ecosistemas acuáticos .* Revista de la asociación colombiana de ciencias biológicas. .