

**PROPUESTA DE REMEDIACIÓN DE AGUAS DEL LAGO SOCHAGOTA SEGÚN
PARAMETROS DE SALINIDAD**

DYLAN ISMAEL CARREÑO RODRÍGUEZ

**Proyecto Integral de Grado para optar al título de
INGENIERO QUIMICO**

DIRECTOR,

JUAN CAMILO CELY GARZÓN

INGENIERO QUIMICO

CO-DIRECTOR,

IVÁN RAMIREZ MARÍN

INGENIERO QUIMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C.

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre

Firma del director

Nombre

Firma del Presidente Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá D.C. febrero 2023

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Vicerrector Académico de Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora de programa de Ingeniería Química

Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece especialmente a:

Los Ingenieros Juan Camilo Cely Garzón e Iván Ramírez Marín por su apoyo, acompañamiento, paciencia y conocimientos aportados durante el desarrollo de este trabajo.

A la Fundación Universidad de América por brindarme los conocimientos necesarios para la realización de este trabajo de grado

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	18
1. CONTEXTO LAGO SOCHAGOTA	19
2. MARCO TEÓRICO	22
2.1 Depósitos	22
2.2 Calidad del agua	22
2.3 Remediación ambiental	23
2.4 Tratamientos de aguas	23
2.4.1 <i>Primario</i>	23
2.4.2 <i>Secundario</i>	24
2.4.3 <i>Terciario</i>	24
2.5 Parámetros	24
2.5.1 <i>PH</i>	24
2.5.2 <i>Conductividad</i>	24
2.5.3 <i>Iones cloruros</i>	24
2.5.4 <i>Iones sulfatos</i>	25
2.6 Aguas termales y termominerales	25
2.6.1 <i>Tipos de aguas termales</i>	25
2.7 Corrientes hídricas	26
2.7.1 <i>Bicarbonatadas</i>	26
2.7.2 <i>Cloruradas</i>	26
2.7.3 <i>Sulfatadas</i>	26

2.8	Conceptos	26
2.8.1	<i>Mesosalino/mesohalino</i>	26
2.8.2	<i>Tráfico</i>	27
2.8.3	<i>Eutrofización</i>	27
2.8.4	<i>Dársena</i>	27
2.8.5	<i>Limnología</i>	27
2.8.6	<i>Columna de agua</i>	27
2.8.7	<i>Afluente</i>	27
2.8.8	<i>Salobre</i>	27
2.8.9	<i>Oligosalino/oligohalino</i>	28
2.8.10	<i>Hidrófitas o macrófitas</i>	28
2.8.11	<i>Saneamiento</i>	28
2.9	Marco legal	28
2.9.1	<i>Leyes</i>	28
2.9.2	<i>Decretos</i>	29
2.9.3	<i>Artículos constitucionales</i>	30
3.	PRINCIPALES ESTRATEGIAS DE REMEDIACIÓN DE DEPÓSITOS DE AGUA ESTÁTICOS, NATURALES Y ARTIFICIALES	32
3.1	Contaminación en cuerpos de agua superficiales	32
3.1.1	<i>Aguas residuales urbanas e industriales</i>	33
3.2	Microorganismos beneficiosos	38
3.3	Fitotecnología	39
4.	IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE CONTAMINACIÓN CON MAS INFLUENCIA EN EL LAGO SOCHAGOTA	42
4.1	Descripción del área de estudio y delimitación de factores influyentes	42
4.2	Focalización de los problemas del lago	47

4.3 Estrategias y/o tecnologías para reducir la salinización en cuerpos de agua	59
4.3.1 Evaporación relámpago	59
4.3.2 Electrodiálisis	59
4.3.3 Intercambio iónico	59
4.3.4 Plantas desalinizadoras	59
4.4 Fitotecnología (humedales flotantes)	60
4.5 Tipos de humedales	71
4.5.1 Humedales artificiales de flujo superficial	71
4.5.2 Humedales de flujo subsuperficial	72
4.6 Diseño de los humedales	78
4.6.1 Cálculos pertinentes para el diseño de humedales subsuperficiales de flujo vertical	78
4.6.2 Cálculos pertinentes para el diseño de humedales subsuperficiales de flujo horizontal	83
5. CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SALINIDAD PRESENTES EN EL AGUA DEL LAGO SOCHAGOTA	88
5.1 Resoluciones año 2019	88
5.2 Caracterización	96
5.2.1 Año 2015	97
5.2.2 Año 2017	101
5.2.3 Año 2019	104
5.2.4 Año 2021	108
6. ESTRATEGIA DE REMEDIACIÓN PARA LOS PARÁMETROS DE SALINIDAD DEL LAGO CONSIDERANDO SU POTENCIAL IMPLEMENTACIÓN EN EL SITIO	127

7. CONCLUSIONES	151
BIBLIOGRAFÍA	154
ANEXOS	161

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 <i>Ubicación lago Sochagota</i>	19
Figura 2 <i>Muerte en peces y emanación de micro algas en el lago Sochagota</i>	21
Figura 3 <i>Etapas del cuerpo de agua con Microorganismos beneficiosos</i>	38
Figura 4 <i>Humedal flotante (Fitotecnología)</i>	40
Figura 5 <i>Localización del sistema socio-ecológico Lago Sochagota</i>	43
Figura 6 <i>Modelo conceptual de todas las interacciones en el lago Sochagota con sus consecuencias</i>	45
Figura 7 <i>Sistema local de las conexiones con el sistema agrícola regional</i>	46
Figura 8 <i>Localización de posibles afloramientos termominerales en el Lago Sochagota 1956 y en su área de influencia</i>	48
Figura 9 <i>Apertura compuerta Lago Sochagota</i>	51
Figura 10 <i>Precipitación total mensual 1987-2019</i>	54
Figura 11 <i>Conductividad eléctrica del lago de Sochagota (1986-2019)</i>	55
Figura 12 <i>Comportamiento de las sales a nivel mensual, durante una condición húmeda (mayores precipitaciones)</i>	57
Figura 13 <i>Comportamiento de las sales a nivel mensual, durante una condición seca (menores precipitaciones)</i>	58
Figura 14 <i>Representación de un humedal artificial</i>	61
Figura 15 <i>Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas</i>	62
Figura 16 <i>Plantas Halófilas en su habitat</i>	67
Figura 17 <i>Acrostichum aureum</i>	70
Figura 18 <i>Esquema humedales artificiales flujo superficial</i>	72
Figura 19 <i>Esquema humedales de flujo subsuperficial</i>	73
Figura 20 <i>Esquema Humedales subsuperficiales de flujo horizontal</i>	75
Figura 21 <i>Esquema de Humedales subsuperficiales de flujo vertical</i>	77
Figura 22 <i>Localización de las estaciones de evaluación de calidad en el Lago Sochagota</i>	98
Figura 23 <i>Conductividad eléctrica vs precipitación</i>	106

Figura 24 <i>Puntos testeados en el Sochagota y en el rio salitre</i>	109
Figura 25 <i>Conductividad presente en la quebrada salitre en los diferentes puntos testeados</i>	112
Figura 26 <i>Datos de conductividad en las diferentes zonas testeadas dentro del Lago Sochagota</i>	115
Figura 27 <i>Conductividad de pozos termales cerca a los afloramientos del lago</i>	116
Figura 28 <i>Relación pozos termales de hotelería con afloramientos internos en el lago</i>	117
Figura 29 <i>Punto de muestreo 1</i>	119
Figura 30 <i>Punto de muestreo 2</i>	120
Figura 31 <i>Muestras tomadas en los dos puntos del lago</i>	121
Figura 32 <i>Muestra 001S001</i>	121
Figura 33 <i>Muestra 002S001</i>	122
Figura 34 <i>Muestra 001S002</i>	123
Figura 35 <i>Muestra 002S002</i>	124
Figura 36 <i>Conductividad muestras</i>	125
Figura 37 <i>Planta desalinizadora Chile</i>	128
Figura 38 <i>Zona de desembocadura del afluente natural del lago (quebrada honda - río salitre)</i>	130
Figura 39 <i>Metodología de aplicación por secciones</i>	139
Figura 40 <i>Estructura de un humedal flotante para la estrategia en cuestión</i>	140
Figura 41 <i>Humedales Flotantes en “Los Lagos del Dique” en Xalapa, Veracruz</i>	143
Figura 42 <i>Zonas donde se podrían aplicar los humedales flotantes</i>	144
Figura 43 <i>Prototipo de humedal flotante con Acrostichum Aureum</i>	145

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Leyes apropiadas y aplicables para el proyecto sacadas de “normatividad sobre el recurso atmosférico</i>	28
Tabla 2 <i>Decretos colombianos y aplicables al proyecto sacado de “Normatividad sobre el recurso hídrico”</i>	30
Tabla 3 <i>Artículos adecuados para el proyecto sacado de “Normas y principios ambientales contenidos en la Constitución Política de Colombia”</i>	31
Tabla 4 <i>Principales propiedades físico-químicas del agua residual y sus fuentes</i>	36
Tabla 5 <i>Relación de aperturas de compuertas lago Sochagota</i>	52
Tabla 6 <i>Mecanismos de fitorremediación</i>	64
Tabla 7 <i>Imágenes de plantas con posible aplicación en Fitodesalinización en fuentes hídricas</i>	68
Tabla 8 <i>Características del sustrato para humedales verticales</i>	80
Tabla 9 <i>Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales verticales</i>	82
Tabla 10 <i>Factores de diseño de humedal subsuperficial de flujo vertical</i>	82
Tabla 11 <i>Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales</i>	85
Tabla 12 <i>Parámetros de diseño de humedal subsuperficial de flujo horizontal</i>	87
Tabla 13 <i>Objetivos propuestos para el cuerpo de agua del Lago Sochagota</i>	89
Tabla 14 <i>Estaciones de monitoreo del Lago Sochagota</i>	89
Tabla 15 <i>Objetivos propuestos para la quebrada Honda – río Salitre</i>	92
Tabla 16 <i>Parámetros para el agua de riego</i>	96
Tabla 17 <i>Calidad físico-química y bacteriológica del Lago Sochagota en el año 2015</i>	99
Tabla 18 <i>Susceptibilidad vs Umbrales</i>	103
Tabla 19 <i>Identificación y coordenadas de puntos evaluados</i>	107
Tabla 20 <i>Variables in situ en cada punto de muestreo para calibrar modelo y escenarios</i>	108
Tabla 21 <i>Muestreo 1, estación inicial de la quebrada Honda</i>	110

Tabla 22 <i>Muestreo 2, segunda estación de la quebrada Honda</i>	111
Tabla 23 <i>Muestreo 4, Última estación de la quebrada Honda</i>	111
Tabla 24 <i>Coordenadas de los puntos testeados</i>	113
Tabla 25 <i>Caracterización Lago Sochagota</i>	114
Tabla 26 <i>Caracterización pozos termales cerca al lago Sochagota</i>	116
Tabla 27 <i>Resultados prueba 001S001</i>	122
Tabla 28 <i>Resultados prueba 002S001</i>	123
Tabla 29 <i>Resultados muestra 001S002</i>	124
Tabla 30 <i>Resultados muestra 002S002</i>	125
Tabla 31 <i>Condiciones empleadas para el secuenciamiento de tratamiento de aguas termales</i>	131
Tabla 32 <i>Parámetros fisicoquímicos más relevante con respecto a la salinización en el lago Sochagota</i>	134
Tabla 33 <i>Porcentaje de remoción de Acrostichum Aureum</i>	135
Tabla 34 <i>Datos para el diseño teórico del humedal subsuperficial de flujo horizontal</i>	136
Tabla 35 <i>Información para el diseño del humedal subsuperficial de flujo horizontal</i>	137
Tabla 36 <i>Datos iniciales y finales del tratamiento de agua residual con Acrostichum Aureum</i>	146
Tabla 37 <i>Tabla comparativa de los valores obtenidos con E. crassipes</i>	148
Tabla 38 <i>Concentraciones del agua antes de la fitorremediación</i>	149
Tabla 39 <i>Porcentaje de efectividad de remoción de metales pesados para las plantas acuáticas Eichhornia crassipes y Pistia stratiotes</i>	150

RESUMEN

El presente documento tiene como finalidad plantear una estrategia conceptual de la remediación del agua del lago Sochagota mediante métodos o tecnologías aplicables en el sitio, métodos en los cuales se van a basar en su adaptabilidad a la zona geográfica y las eficiencias de remisión que presenten para diversos contaminantes orgánicos, inorgánicos y biológicos.

Para el desarrollo de esa estrategia se partió de las tecnologías y/o métodos actuales las cuales se aplican en cuerpos de agua superficial como lo son los lagos y ríos, también se tuvo en cuenta la factibilidad a la hora de aplicar dichas tecnologías ya que el lago Sochagota está en proceso de ser una zona natural protegida por lo cual no es viable la modificación del paisaje del mismo.

Después se realizó una revisión bibliográfica sobre las principales causas de contaminación del lago, las cuales se clasifican en efluentes de aguas residuales de zonas industriales, domésticas y agrícolas, también se identificó contaminación “superficial” por las festividades que se realizan en el lago. Con esta revisión se concluyó las fuentes de contaminación con más influencia en el lago, las cuales son principalmente los afloramientos de aguas termales que se dan tanto internamente como alrededor del lago y su afluente natural (quebrada honda-río salitre).

Con la información obtenida en la revisión bibliográfica se realizó una caracterización teórica en ciertos años sobre la calidad y composición del agua del lago Sochagota y se comparó con la calidad del agua para riego, con la variedad de información se determinó que tecnología sería la más viable para la aplicación en campo y la respectiva remediación del agua.

Palabras clave: Agua, salinización, fitorremediación, hidroclimatología, humedales flotantes.

INTRODUCCIÓN

El 71% de la superficie terrestre en nuestro planeta está compuesta por agua, de este 71% del cual el 97,5% es agua salada y el 2,5% es de agua dulce (AQUAE fundación), el agua salada se encuentra en los mares y océanos, mientras que el agua dulce se encuentra en diferentes sitios y en diferentes fases, por ejemplo el agua dulce en fase líquida se encuentra en ríos, lagos y lagunas; en fase sólida se encuentra en los glaciares y casquetes polares; y en fase gaseosa en el vapor de agua presente en la atmósfera.

Como se mencionó parte del agua dulce del mundo se encuentra en los lagos, por esto los lagos toman un papel muy importante para los seres vivos, la vegetación y en sí el ecosistema en que se encuentre el lago. Son importantes porque los lagos aportan agua para el consumo humano y animal, son una fuente de electricidad para distintos equipos y construcciones, por ejemplo, las hidroeléctricas; también proporcionan agua de riego para la agricultura del sector donde se encuentre y zonas aledañas a él; también atracciones recreativas y turísticas para actividades de ocio y deporte. Además, son fuente de microorganismos y hábitats para muchas especies animales y vegetales, las cuales desarrollan un papel importante ya que cumplen un ciclo natural para el ecosistema.

El lago Sochagota representa un gran atractivo turístico para el municipio de Paipa en el departamento de Boyacá, el lago es una fuente de recreación tanto para los turistas como para los habitantes de Paipa, también es una fuente de ingresos para este municipio ya que tanto la alcaldía como empresas privadas realizan diferentes tipos de actividades en el lago, actividades tales como deportes acuáticos, competencias deportivas y festividades locales.

Además, este lago es de suma importancia para los campesinos de este municipio y municipios aledaños, esto es porque el sector agricultor implementa el agua del río Chicamocha como agua de riego para sus cultivos y el agua del Sochagota toma relevancia acá ya que tiene conexión con el río Chicamocha y genera una gran influencia en este río.

La cuenca alta del río Chicamocha está comprendida entre su nacimiento a la altura de la ciudad de Tunja donde se conoce como río Jordan y Puente Chameza aguas abajo

del casco urbano del municipio de Sogamoso. Hasta este punto, el río se caracteriza por un lecho de baja pendiente con amplias zonas de inundación y un uso intensivo uso del suelo en actividades agrícolas e industriales, así como por la presencia de los tres centros poblados más importantes del departamento de Boyacá: Tunja, Duitama y Sogamoso. [47]

El río Chicamocha nace de la confluencia de los ríos Tuta y Jordán, en el municipio Tunja en el departamento de Boyacá. Se inicia en la cordillera andina ecuatorial a una altura aproximada de 2.950 msnm, recorriendo parte del territorio de los departamentos de Boyacá y Santander del centro-oriente de Colombia. Desemboca en el valle del Magdalena a 370 msnm, al unir sus aguas con las del río Suárez, que a su vez forman el río Sogamoso. Desde su nacimiento en la cordillera andina ecuatorial, el Chicamocha atraviesa el altiplano del municipio de Tunja y discurre en sentido sur-norte, bañando el territorio de los municipios Tuta, Paipa y Duitama hasta Sogamoso, en el departamento de Boyacá. [48].

De los usos registrados en el censos de usuarios sobre la corriente principal del río Chicamocha, la actividad económica que presenta mayor relevancia es la agropecuaria representando el 50,1 % de los usuarios. Es importante resaltar que de los usuarios censados el 17,4 % no presenta una actividad económica definida, mientras que el 7.76 % se establece en la actividad económica minera. Las demás actividades económicas establecida en la siguiente imagen representan cada una menos del 7 %, donde los balnearios, cervecerías, conventos, ladrilleras, estaciones de servicio, cárceles, mataderos, peajes, universidades, restaurantes y vertimientos industriales se encasillan con valores menores al 1 %. Respecto a los caudales medidos para cada actividad económica, la actividad que registró un mayor consumo es agropecuario con un gasto 273 ,4 L/s, seguidamente aparece la industria metalúrgica con 75 L/s, las hidroeléctricas de la región consumo 50 l/s, mientras que la industria cervecera presenta un consumo de 49.47 L/s. Dentro de los consumos más significativos registrados en el censo de la corriente principal el consumo por parte de los acueductos es de 16.9 L/s, cabe resaltar que a pesar que el gasto de los acueductos se destina para uso doméstico estas clases

no se clasifican de manera conjunta por que para uso doméstico implica una captación directa. [47]

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar una propuesta de remediación de la calidad del agua según los parámetros de salinidad presentes con potencial aplicación en el Lago Sochagota (Paipa – Boyacá).

Objetivos específicos

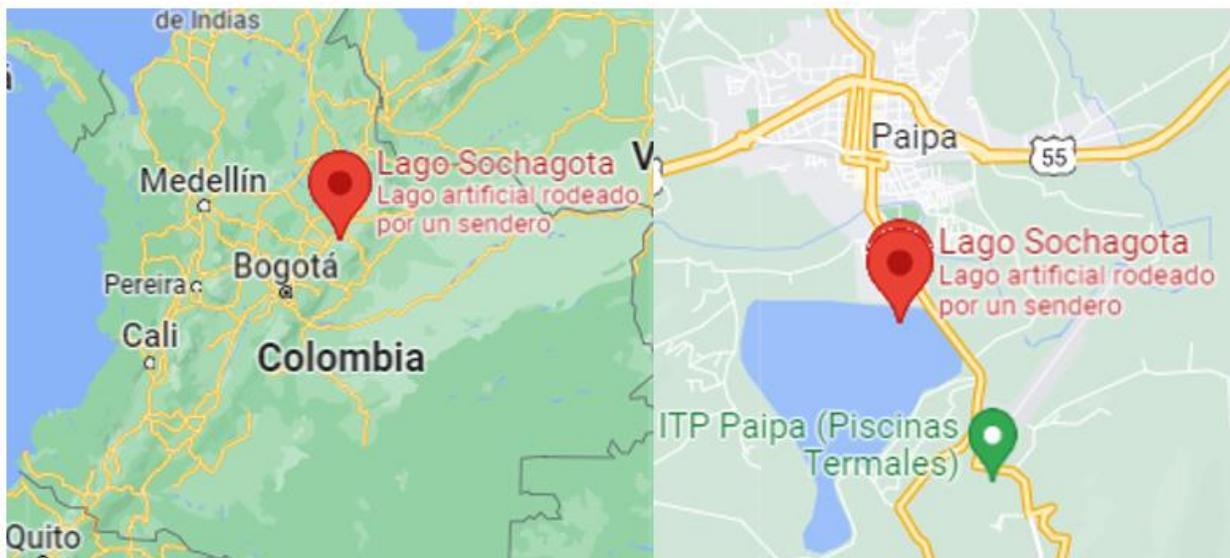
- Revisar las principales estrategias de remediación de depósitos de agua estáticos, naturales y artificiales.
- Identificar las principales fuentes de contaminación con potencial influencia en el lago Sochagota.
- Caracterizar los parámetros de salinidad presentes en el agua del lago Sochagota.
- Estructurar una estrategia de remediación para los parámetros de salinidad del lago considerando su potencial implementación en el sitio.

1. CONTEXTO LAGO SOCHAGOTA

El lago Sochagota fue construido en 1955[1], es un lago artificial destinado a uso recreativo, construido a partir de un humedal natural anterior. Se ubica en un altiplano (altitud 2496 m) del departamento de Boyacá en la provincia de Paipa (Colombia), y ocupa una superficie total de 1,8 km². El punto más profundo del lago es de 3,20 m. El lago es alimentado por un afluente del río Chicamocha, quebrada Honda-río Salitre [2].

Figura 1

Ubicación lago Sochagota



Nota. En la imagen se puede apreciar la ubicación exacta del lago Sochagota Google maps. Google. (s.f.). Indicaciones para llegar al lago Sochagota [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps/search/lago+sochagota/@5.7514269,-73.1340936,14.25z?hl=es> [Acceso: 6, Ago, 2022].

Sin embargo, la calidad del agua ha ido empeorando debido a diversos factores, tales como los nacimientos de aguas termominerales que se encuentran sobre la falla geológica de Boyacá, perteneciente al grupo de las alcalinas, sulfatadas, cloruradas y bicarbonatada, con alto contenido de sales de sulfato de sodio y calcio, y con menor concentración de carbonato de magnesio, cloruro de litio y alguna emanación radioactiva y considerada de alta temperatura [3].

Datos obtenidos de fuentes bibliográficas demuestran que el lago Sochagota presenta variaciones en los índices de contaminación como los ICOMO (índice de contaminación por materia orgánica) e ICOMI (índice de contaminación por mineralización) los cuales dieron un rango de 0,926-0,985 y 1 respectivamente, estos valores indican que la calidad del agua es pésima, otro índice es el ICOTRO (índice de contaminación trófico), dio un rango el cual va de 0,11 a 0,20, este rango indica que el agua se pueda clasificar como eutrófico y el último índice realizado es el ICOSUS (índice de contaminación por sólidos suspendidos) el cual da un rango de 0,12 a 0,46, este rango indica que el agua no presenta una variación en cuanto a su interpretación independiente de la estacionalidad pluviométrica y de la profundidad de la toma de muestra, dando una interpretación muy buena.[6]

La generación de residuos al lago, el vertimiento de aguas, los impactos que genera el festival del lago Sochagota [2], la construcción de infraestructuras a sus alrededores y malas prácticas ambientales por parte de turistas y residentes, otro factor es su conexión con los caudales de la quebrada Honda-río Salitre [5].

Los caudales de la quebrada Honda-río Salitre son uno de los factores más influyentes y de cierta forma uno de los más relevantes, está quebrada transporta una buena cantidad de sales, suministradas por las fuentes termales que aparecen en el área media y baja de la microcuenca del lago [3]. El colapso del alcantarillado perimetral que causa el desborde de aguas servidas por el sector turístico del municipio las cuales eutrofizan el embalse, y de los yacimientos de agua termomineral en el lago, los cuales aportan una cantidad considerable de sales que pueden ser nocivas para la biota. [7]

Lo anterior lleva al aumento del contenido de nutrientes del medio acuático, favoreciendo la proliferación de organismos productores, como las algas, que constituyen el fitoplancton y que, al estar presente de manera abundante, con su actividad fotosintética, consumen el oxígeno del agua en las horas de la noche, pudiendo agotarlo y presentarse entonces los estados de anoxia. El lago Sochagota es pieza fundamental para el municipio de Paipa ya que este depende del turismo, centrado en piscinas que utilizan los afloramientos termales y el lago como fuente de ingresos [7].

Con lo anteriormente mencionado queda en evidencia que el lago Sochagota es indispensable para el municipio de Paipa y para su economía, al estar en estas condiciones deplorables se necesita una solución para esta problemática ya que de lo contrario se va a extinguir una fuente de ingresos crucial para el municipio [3].

Como es evidente, el lago Sochagota está sufriendo un impacto ambiental negativo, por lo cual es de suma importancia dar una solución que tenga aplicabilidad en el lago y para el municipio, de no ser así el lago podrá afectar los ecosistemas aledaños a él, la economía del municipio y la salud de los habitantes del municipio de Paipa.

Figura 2

Muerte en peces y emanación de micro algas en el lago Sochagota



Nota. En la imagen se puede apreciar los problemas ambientales que presenta el lago Sochagota. Tomado de: Pinzón. L.C. “Una cruzada por el lago Sochagota”. [En línea]. Disponible: <https://www.elespectador.com/ambiente/blog-el-rio/una-cruzada-por-el-lago-sochagota/>

Para dar solución a esta problemática se piensa hacer un análisis comparativo entre las posibles soluciones las cuales van a abarcar, primero bajar la concentración de sales en el lago en condiciones con menores precipitaciones y segundo como reducir la acumulación de microorganismos y malezas acuáticas presentes en el lago; estos dos puntos se van a tomar más a profundidad en el desarrollo de este trabajo.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describe, define y explica los conceptos relacionados con este trabajo, tales como conceptos y definiciones relacionados con procesos y estrategias que se van a mencionar en este trabajo, las propiedades físico-químicas de los lagos, pH, salinidad, etc. En si acá se van a abarcar conceptos relacionados y familiarizados con la calidad en cuerpos de agua como lo son los lagos.

2.1 Depósitos

Se entiende por depósito estático a la estructura capaz de contener un cierto volumen de agua, con los accesorios e instalaciones necesarias para garantizar los caudales de servicio solicitados, la presión adecuada y la calidad química requerida para su potabilidad [25].

Con la definición anterior se entiende que un depósito es toda aquella estructura la cual almacena cierta cantidad de agua y ayuda a regular caudales según se necesite (ya sean naturales o sea los lago o artificiales o sea tanques, contenedores cilíndricos, etc.), de cierta forma se puede afirmar que los lagos son depósitos estáticos naturales los cuales tienen conexiones con los ríos, el lago Sochagota se puede clasificar como un depósito estático artificial, esto se debe a que el área que hoy ocupa el lago fue construida por el hombre, el lago se construyó tanto para fines turísticos como para regular el caudal de la quebrada honda-rio salitre hacia el rio Chicamocha.

2.2 Calidad del agua

La calidad del agua es un término usado para describir las características químicas, físicas y biológicas del agua. La calidad del agua depende principalmente del uso que se le va a dar. La calidad del agua ciertamente es un tema prioritario en la actualidad, en parte por el tremendo crecimiento de la población mundial y la expansión y desarrollo urbano; las áreas rurales también contribuyen a incrementar los problemas de la calidad del agua. El uso de fertilizantes en la agricultura puede resultar en un exceso de nitrógeno y fósforo en el agua superficial y el agua subterránea. Estos excedentes químicos llamados "nutrientes" porque actúan como alimento para las plantas, pueden bajar la calidad del agua [49].

Como menciono anteriormente la calidad del agua depende del uso que se le dé por ende los parámetros cambian según el uso de la misma, pero los parámetros que más se tienen en cuenta son los siguientes: pH, cloro residual, cloruro, nitritos, nitratos, fosfatos, hierro, manganeso, dureza y oxígeno disuelto.

2.3 Remediación ambiental

La remediación es el conjunto de actividades a ser implementadas a fin de cumplir con los criterios ambientales específicos y alcanzar los objetivos sociales deseados. La remediación se aplica inicialmente/principalmente a los suelos: Suelos contaminados: metales pesados, hidrocarburos, minería, derrames, suelos industriales. suelos urbanos, gasolineras, lodos y aguas industriales; también es aplicable al agua natural: lagos, ríos, etc. [50]

2.4 Tratamientos de aguas

En los diferentes tipos de industria el agua es bastante implementada, ya sea como un compuesto principal para el proceso o como corrientes de servicio, por esto uno de los impactos ambientales inmediatos es la generación de aguas residuales, también el agua es ampliamente utilizada en diferentes labores domésticas las cuales también generan aguas residuales con diferente “carga”. En si esto sucede porque el líquido en buenas condiciones consumido/implementado por la comunidad y/o industria es contaminado y luego enviado a los cuerpos receptores de agua con una calidad inferior. A medida que la cantidad de aguas residuales aumenta también incrementa el daño potencial que estas pueden causar a los cuerpos de agua.

Según datos disponibles en el sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) en el país aproximadamente el 96% de las aguas residuales generadas por actividades domésticas o industriales no son tratadas [8]. Para el tratamiento de estas corrientes hídricas existen 3 tipos de tratamientos: primario, secundario y terciario.

2.4.1 Primario

Los sistemas primarios son los más sencillos y tienen la función de preparar el agua, limpiándola de todas aquellas partículas cuyas dimensiones pueden obstruir o dificultar los procesos consecuentes. Estos tratamientos son el cribado o las mallas de barreras, la flotación o eliminación de grasas y la sedimentación. Algunos sistemas como es el

caso de la flotación y sedimentación pueden ser utilizados dentro del proceso de tratamientos secundarios y no forzosamente como un método primario aislado [9].

2.4.2 Secundario

Tiene el objetivo de limpiar el agua de aquellas impurezas cuyo tamaño es mucho menor a las que se pueden captar por la decantación y las rejillas, para ello, los sistemas se basan en métodos mecánicos y biológicos combinados. Al manejar aspectos biológicos son afectados por factores externos como son los climáticos, por lo que se tienen que estudiar sus características y adaptación al sitio del proyecto, para poder hacer una elección adecuada [9].

2.4.3 Terciario

Consiste en procesos físicos y químicos especiales con los que se consigue limpiar la corriente de agua de contaminantes concretos como fósforo, nitrógeno, minerales, metales pesados, virus, compuestos orgánicos, entre otros [10]

2.5 Parámetros

2.5.1 PH

Es una medida para determinar el grado de alcalinidad o acidez de una disolución. Con el pH determinamos la concentración de hidrogeniones en una disolución. Un hidrogenión es un ion positivo de Hidrógeno, es un «cachito con carga positiva» del Hidrógeno. La fórmula matemática para calcular el pH es el logaritmo negativo en base 10 de la actividad de los iones hidrógeno. $\text{pH} = -\log[\text{aH}^+]$ [11].

2.5.2 Conductividad

Es una medida de la capacidad del agua para transportar la corriente eléctrica. Este parámetro está relacionado con la concentración de sales en disolución, cuya disociación genera iones capaces de transportar la corriente eléctrica. La solubilidad de las sales en el agua depende de la temperatura, por lo que la conductividad varía en conformidad con la temperatura del agua [12].

2.5.3 Iones cloruros

Es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua natural y residual. El contenido de cloruros de las aguas naturales es variable y depende principalmente de la naturaleza

de los terrenos atravesados. Un contenido elevado de cloruros puede dañar las conducciones y estructuras metálicas y perjudicar el crecimiento vegetal [13].

2.5.4 Iones sulfatos

Son muy abundantes en la naturaleza, se conoce que la explotación de minas conduce a un incremento de estos iones en el agua debido principalmente a los procesos de oxidación que sufre el mineral durante su extracción. Su afectación en el ser humano en tiene que ver principalmente con el efecto laxante que surge al ingerir una alta concentración de sulfato de sodio y magnesio, además favorecen la corrosión de los metales y cambian el sabor del agua [14].

2.6 Aguas termales y termominerales

Las aguas termales son aquellas que emanan a la superficie terrestre con una temperatura al menos 4°C más alta que la temperatura media anual de la localización donde se encuentran, pues han sido calentadas por formaciones geológicas subterráneas que se encuentran a mayor temperatura que la ambiental [51].

2.6.1 Tipos de aguas termales

Los tipos de aguas termales se pueden dividir en dos:

2.6.1.a Según su temperatura. Frías: menos de 20°C, Hipotermas: entre 21 y 35°C, Mesotermas: entre 35 y 45°C e Hipertermas: más de 45°C. [51]

2.6.1.b Según su origen.

- Telúricas: el caudal varía según la época del año, pues depende de la infiltración. Por lo general, poseen menor cantidad de mineralización.
- Magmáticas: el caudal es constante en composición y temperatura, con superiores a 50°C.[51]

Las aguas de origen meteórico o telúrico que se infiltran en el subsuelo descienden por gravedad hacia capas más profundas, elevando su temperatura durante su circulación subterránea. Posteriormente, estas aguas pueden ascender hasta la superficie, a través de fisuras y fracturas en las rocas. Este proceso originario se conoce comúnmente como «origen geotérmico». Y respecto a las aguas de origen magmático, se producen como

consecuencia de la cristalización de los magmas que liberan constituyentes volátiles que pueden escaparse en forma de fumarolas, compuestas esencialmente de hidrógeno y vapor de agua, junto con elementos como flúor, cloro, azufre, carbono, fósforo y boro. [51]

2.7 Corrientes hídricas

Para la clasificación de este tipo de corrientes hídricas se tienen en cuenta características como la mineralización predominante, dándole carácter de predominante a aquellos gases, aniones y cationes que representan más del 20% de la masa iónica correspondiente [15]. Por esta razón se considera la siguiente clasificación:

2.7.1 Bicarbonatadas

Aguas de baja mineralización, alcalinas y frías. Su uso es por ingesta y actúa sobre el organismo. Este tipo de aguas pueden compartir su composición con otro tipo de minerales que van a variar sus acciones. Las más comunes son: bicarbonatadas sódicas, cálcicas, mixtas, sulfatadas y cloruradas. [15]

2.7.2 Cloruradas

Con más de 1 g/L de sustancias mineralizantes, donde el ion cloruro suele estar acompañado de sodio en proporción semejante. La composición de este tipo de agua refleja un origen profundo. La presencia de fallas y grietas facilita su ascenso a la superficie. Se subdividen en fuertes (más de 50 g/L), medias (entre 10 y 50 g/L) y débiles (menos de 10 g/L). [15]

2.7.3 Sulfatadas

Con más de 1 g/L de sustancias mineralizantes, donde predomina el anión sulfato y están influidas fuertemente en sus propiedades terapéuticas por otros iones como sodio, magnesio, bicarbonato y cloruro. [15]

2.8 Conceptos

2.8.1 Mesosalino/mesohalino

En una categoría para la clasificación del agua según su salinidad, la categoría mesohalina se encuentra en un rango de 4-18 g/l. [33]

2.8.2 Tráfico

Que puede traducirse como “alimenticio”. Este adjetivo se emplea para aludir a aquello vinculado a la nutrición (el acto y el resultado de nutrir). [16]

2.8.3 Eutrofización

En ecología, los términos y expresiones eutrofización, crisis eutrónica o crisis distrónica y el coloquial de sopa verde, designan el enriquecimiento excesivo en nutrientes de un ecosistema acuático. [17]

2.8.4 Dársena

Parte resguardada artificialmente de las corrientes, en un puerto o en aguas navegables, para que las embarcaciones puedan fondear o cargar y descargar con comodidad. [18]

2.8.5 Limnología

Ciencia que estudia los aspectos físicos y biológicos de los ecosistemas de agua dulce, especialmente los lagos. [19]

2.8.6 Columna de agua

Es una columna conceptual de agua desde la superficie hasta los sedimentos del fondo. Este concepto se utiliza principalmente para evaluar estudios ambientales de la estratificación o mezcla de las capas de estratificación térmica o química en un lago, corriente u océano [20]

2.8.7 Afluente

Corresponde a un curso de agua, también llamado tributario, que no desemboca en el mar, sino en otro río que suele ser más importante, con el cual se une en un lugar llamado confluencia [21].

2.8.8 Salobre

El agua salobre es aquella que tiene más sales disueltas que el agua dulce, pero menos que el agua de mar. Técnicamente, se considera agua salobre la que posee entre 0,5 y 30 gramos de sal por litro, expresados más frecuentemente como de 0,5-0,6 a 30-35 partes por mil. [22]

2.8.9 Oligosalino/oligohalino

Dícese de organismos que toleran una gama restringida de salinidad. Relativo al agua salobre cuya salinidad esta entre 0,5 y 3 ‰, o de agua de mar entre 17 y 30 ‰ [23].

2.8.10 Hidrófitas o macrófitas

Aquellas plantas que tienen todas sus estructuras vegetativas sumergidas o flotantes. Se incluyen en este grupo a plantas vasculares, algunos géneros de briófitos y las algas carófitas y filamentosas. [24]

2.8.11 Saneamiento

Significa dar remedio, el término se refiere a la remoción de contaminación o contaminantes del medio ambiente (suelo, aguas subterráneas, sedimento o aguas de la superficie) para la protección general de la salud humana y del ambiente, o de tierras provistas para el redesarrollo. La remediación es generalmente tema de requerimientos regulatorios y, además, puede estar basado en gravámenes de salud humana y riesgos ecológicos donde no existen estándares legislados o donde los estándares son consultivos. [52]

2.9 Marco legal

En esta sección se van a mencionar los artículos, leyes y decretos con respecto al cuidado del medio ambiente y los recursos hídricos.

2.9.1 Leyes

Tabla 1

Leyes apropiadas y aplicables para el proyecto sacadas de “normatividad sobre el recurso atmosférico

ley 2811 de 1974	Código nacional de los recursos naturales renovables RNR y no renovables y de protección al medio ambiente. El ambiente es patrimonio común, el estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo. Regula el manejo de los RNR, la defensa del ambiente y sus elementos.
------------------	---

Ley 23 de 1973	Principios fundamentales sobre prevención y control de la contaminación del aire, agua y suelo y otorgó facultades al presidente de la República para expedir el Código de los Recursos Naturales
Ley 99 de 1993	Crea el Ministerio del Medio Ambiente y Organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Reforma el sector Público encargado de la gestión ambiental. Organiza el sistema Nacional Ambiental y exige la Planificación de la gestión ambiental de proyectos. Los principios que se destacan y que están relacionados con las actividades portuarias son: La definición de los fundamentos de la política ambiental, la estructura del SINA en cabeza del Ministerio del Medio Ambiente, los procedimientos de licenciamiento ambiental como requisito para la ejecución de proyectos o actividades que puedan causar daño al ambiente y los mecanismos de participación ciudadana en todas las etapas de desarrollo de este tipo de proyectos.
Ley 491 de 1999	Define el seguro ecológico y delitos contra los recursos naturales y el ambiente.
Ley 2 de 1959	Reserva forestal y protección de suelos y agua.
Ley 299 de 1995	Protección a la flora colombiana.

Nota. La tabla muestra una adaptación de las leyes acordes al tema de este trabajo. Tomado de: upme.

[En línea]. Disponible en:

http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/politica/normativ/normativ.htm

2.9.2 Decretos

Tabla 2

Decretos colombianos y aplicables al proyecto sacado de “Normatividad sobre el recurso hídrico”

Decreto - Ley 2811 de 1974 Parte XII	Respecto a los recursos del paisaje y su protección
Decreto 1715 de 1978	Reglamenta la protección del paisaje en carreteras. Prohíbe la alteración de elementos del paisaje.
Decreto 1449 de 1977	Disposiciones sobre conservación y protección de aguas, bosques, fauna terrestre y acuática
Decreto 1681 de 1978	Sobre recursos hidrobiológicos, asegurar la conservación, el fomento y el aprovechamiento de los recursos hidrobiológicos y del medio acuático, su disponibilidad permanente y su manejo racional, según técnicas ecológicas, económicas y sociales.
Decreto 2857 de 1981	Ordenación y protección de cuencas hidrográficas
Decreto 2811 de 1974 parte VII	Del suelo agrícola y de los usos no agrícolas de la tierra.

Nota. La tabla muestra una adaptación de los decretos acordes al tema de este trabajo Tomado de: upme.

[En línea]. Disponible en:

http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/politica/normativ/normativ.htm

2.9.3 Artículos constitucionales

Tabla 3

Artículos adecuados para el proyecto sacado de “Normas y principios ambientales contenidos en la Constitución Política de Colombia”

Artículo 79, de la Constitución Nacional de Colombia	Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano.
Artículo 8, de la constitución de nacional de Colombia	Riquezas culturales y naturales de la Nación
Artículo 95, de la constitución de nacional de Colombia	Protección de los recursos culturales y naturales del país
Artículo 58, de la constitución de nacional de Colombia	Función ecológica de la propiedad privada
Artículo 80, de la constitución de nacional de Colombia	Planificación del manejo y aprovechamiento de los recursos naturales
Artículo 49, de la constitución de nacional de Colombia,	Atención de la salud y saneamiento ambiental

Nota. La tabla muestra una adaptación de los artículos constitucionales más acordes al tema de este trabajo Tomado de: upme. [En línea]. Disponible en: <http://www.upme.gov.co/guiambiental/carbon/gestion/politica/normativ/normativ.htm>.

3. PRINCIPALES ESTRATEGIAS DE REMEDIACIÓN DE DEPÓSITOS DE AGUA ESTÁTICOS, NATURALES Y ARTIFICIALES

Para identificar los principales estrategias o técnicas de remediación para depósitos de agua se realizó un análisis bibliográfico en el cual en primera instancia se planteó cuáles son los tipos de contaminación más comunes en estos cuerpos de agua y en segunda instancia se focalizo en los métodos más implementados para la contaminación en específico, este análisis bibliográfico se realizó con herramientas de bibliometría como Mendeley, ScIELO y Google académico.

3.1 Contaminación en cuerpos de agua superficiales

Inicialmente se quiere decir que estos tipos de contaminación (no están detallados, pero engloban la contaminación de ríos y lagos como tal) se presentan gracias a una falta de atención por las autoridades encargadas del cuidado de estos cuerpos acuíferos y por la de sus habitantes y por no generar la suficiente concientización de la importancia de estos cuerpos de agua al público. A continuación, se nombran brevemente las principales fuentes y agentes de contaminación en lagos, ríos, lagunas y demás cuerpos acuíferos:

- Contaminación por basura que se arrojan a los cauces de los ríos o lagos, como son latas, plásticos, basura en general.
- Contaminación por efluentes con aguas residuales
- Productos químicos.
- Contaminación por desechos y vertidos industriales

Debido a su escasa entrada y salida de agua, los lagos sufren graves problemas de contaminación mientras que los ríos, por su capacidad de arrastre y el movimiento de las aguas, son capaces de soportar mayor cantidad de contaminantes. Sin embargo, la presencia de tantos residuos domésticos, fertilizantes, pesticidas y desechos industriales altera la flora y fauna acuáticas. [26]

La contaminación del agua en general puede ser por una fuente puntual, es decir por una fuente única identificable y localizada mientras que una en contraposición se tiene una fuente de contaminación no puntual denominada difusa. Ejemplo de la primera fuente es el caso de descargas urbanas o industriales a un cuerpo de agua mientras que

ejemplo de la segunda son las descargas originadas por la agricultura o la causada por los arrastres de suelo de las zonas altas deforestadas a la parte baja de una cuenca.

Los principales contaminantes (más detallados) de los lagos, ríos y zonas costeras son efluentes industriales, descargas de plantas de tratamiento (urbanas o industriales) aguas residuales urbanas sin tratamiento (desechos cloacales), escorrentías superficiales, lixiviado de suelos, desechos de la industria minera, otros residuos que demandan oxígeno (en su mayor parte materia orgánica, cuya descomposición produce la desoxigenación del agua), agentes infecciosos (cólera, disentería) que causan trastornos gastrointestinales, productos químicos –cada vez más numerosos y de moléculas complejas-, incluyendo los pesticidas utilizados en la agricultura, diversos productos industriales, las sustancias tensioactivas en los detergentes, jabones y los productos de la descomposición de otros compuestos orgánicos, entre otros. Los desechos de la industria textil, la curtiduría, la refinación de metales en la minería, los sólidos de arrastres de escorrentías de zonas agrícolas, suelos degradados y ciudades. [27]

Con lo anteriormente mencionado es evidente que la contaminación en los lagos y ríos es muy amplia y compleja a la vez, por ende, vamos a clasificar los tipos de contaminación mencionados en los siguientes grupos: contaminación por aguas residuales urbanas e industriales, lixiviados de suelos, agricultura, minería y compuestos tenso activos.

3.1.1 Aguas residuales urbanas e industriales

Las aguas residuales son aquellas aguas con impurezas procedentes de vertidos de diferentes orígenes: domésticos e industriales, principalmente. De esta forma, tenemos que las aguas residuales pueden contener elementos contaminantes originados en desechos urbanos o industriales. Las aguas residuales contienen compuestos y parámetros físicos, químicos y biológicos, dichos parámetros y compuestos son los siguientes:

- Físicos: Los componentes y parámetros físicos de las aguas residuales son el color, el olor, los sólidos y la temperatura.

- Químicos: Los componentes químicos más comunes en las aguas residuales son:
 - Orgánicos: carbohidratos, grasas animales, aceites, pesticidas, fenoles, proteínas, contaminantes prioritarios, agentes tensoactivos, compuestos orgánicos volátiles, etc.
 - Inorgánicos: alcalinidad, cloruros, metales pesados, nitrógeno, PH, fósforo, contaminantes prioritarios y azufre.
 - Gases: sulfuro de hidrógeno, metano y oxígeno.
- Biológicos: Los componentes biológicos más habituales en las aguas residuales son animales y plantas.

Las aguas residuales tienen diferentes tipologías las cuales se recogen en la directiva europea 91/271 CEE, en esta directiva se distinguen tres principales tipos de aguas residuales, la clasificación dada es la siguiente:

1. Tipos de aguas residuales domésticas:

1.1 Aguas residuales del baño: Las aguas residuales que tienen su origen en el baño están compuestas, principalmente, por una mezcla de agua, jabón, orín y heces.

1.2 Aguas residuales de la cocina: Las aguas residuales que tienen su origen en la cocina están formadas por una mezcla de agua, jabón, aceites y grasas.

2. Tipos de aguas residuales industriales

2.1 Aguas residuales de la industria. Hace referencia a aquellas aguas que acumulan vertidos y líquidos procedentes de las fábricas y centros de producción.

2.2 Aguas residuales de la agricultura, minera y la ganadería. Están relacionadas con las aguas que proceden de una explotación agrícola y ganadera. Incluyen contaminantes de origen orgánico y microorganismos.

3. Tipos de aguas residuales urbanas:

3.1 Aguas residuales domésticas. Las aguas residuales domésticas son las que están compuestas por aguas, líquidos y distintos materiales que vienen de las aguas de las viviendas.

3.2 Aguas residuales de la limpieza urbana. Este tipo de aguas residuales son las que tienen su origen en las tareas de limpieza de las ciudades dirigidas por los ayuntamientos y empresas privadas que prestan servicio en los municipios. [28]

Con lo mencionado anteriormente es evidente que las aguas residuales sin importar su procedencia son altamente contaminantes para el medio ambiente y aún más para las fuentes hídricas como lo son los ríos y los lagos, esto es así ya que estas aguas tienen contaminantes suspendidos y disueltos, contienen materias orgánicas e inorgánicas, nutrientes, aceites y grasas, sustancias tóxicas, y micro organismos como bacterias y virus los cuales son patógenos, etc.

Tabla 4*Principales propiedades físico-químicas del agua residual y sus fuentes*

Características	Fuentes
Propiedades físicas	
Color	Aguas residuales industriales y domésticas
Olor	Aguas residuales en descomposición, residuos industriales
Sólidos	Aguas residuales industriales y domésticas, erosión del suelo
Temperatura	Aguas industriales
Componentes orgánicos	
Carbohidratos	Residuos domésticos, comerciales e industriales
Grasas y aceites	Residuos domésticos, comerciales e industriales
Pesticidas	Residuos agrícolas
Fenoles	Residuos domésticos, comerciales e industriales
Proteínas	Residuos domésticos, comerciales e industriales
Tóxicos prioritarios	Residuos domésticos, comerciales e industriales
Surfactantes	Residuos domésticos, comerciales e industriales
COVs	Residuos domésticos, comerciales e industriales
Otros	Descomposición natural de la materia orgánica
Componentes inorgánicos	
Alcalinidad	Aguas domésticas, infiltración de aguas subterráneas
Cloruros	Aguas domésticas, infiltración de aguas subterráneas
Metales pesados	Aguas industriales
Nitrógeno	Residuos domésticos y agrícolas
Fósforo	Aguas domésticas, comerciales e industriales
pH	Residuos domésticos, comerciales e industriales
Tóxicos prioritarios	Residuos domésticos, comerciales e industriales
Azufre	Distribución de aguas y residuos domésticos
Gases	
Ácido sulfúrico	Descomposición de residuos domésticos
Metano	Descomposición de residuos domésticos
Oxígeno	Abastecimiento de aguas domésticas, infiltración de agua

Nota. La tabla muestra que fuentes de aguas residuales son ricas en los diferentes componentes que las mismas traen. Tomada de: G. Buitrón Méndez, C. Reino Sánchez y J. Carrera Muyo. “Manual técnico sobre tecnologías biológicas aerobias aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales”. CYTED. TRITÓN-316RT0506.

3.1.1.a Tratamientos. Las aguas residuales tienen diversos tratamientos para su remediación, tratamientos que van desde técnicas básicas hasta la implementación de diversas técnicas en conjunto para su tratamiento, a continuación, vamos a nombrar los tres tipos de tratamientos más implementados para estas aguas:

- Tratamientos biológicos
- Tratamientos fisicoquímicos
- Tratamientos por membranas

Estos métodos se aplican más para aguas residuales en general, por ende, no se profundizan en estos métodos ya que no es el objetivo de este capítulo.

A pesar de que los lagos, ríos y demás cuerpos de agua superficiales sufren diferentes tipos de contaminación gracias a las conexiones que tienen con diferentes aguas residuales, como se mencionó, las aguas residuales provienen de diferentes sitios y a su vez poseen diferentes composiciones físico-químicas; por lo cual al entrar en contacto constantemente con cuerpos de aguas superficiales pueden llegar a generar diferentes problemas a estos ecosistemas, problemas como una abundante concentración de metales pesados, compuestos orgánicos, inorgánicos, biológicos, etc.

Cabe aclarar que las aguas residuales se pueden tratar de forma industrial, con esto quiero decir que esta agua se puede desviar y enviar a una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y dependiendo de la composición fisicoquímica del agua se aplicaran los métodos correspondientes para su saneamiento, en cambio el agua de los lagos o ríos no se le puede hacer la misma metodología, esto porque no sería viable económicamente.

En la actualidad para el tratamiento único y exclusivamente de las aguas de lagos se tienen las siguientes medidas o estrategias de remediación/mitigación de los diferentes contaminantes que se presentan en estos cuerpos de agua:

1. Implementación de microorganismos beneficiosos
2. Fitotecnología

Estos dos tratamientos se implementan actualmente en cuerpos de aguas superficiales como lo son los lagos, y en esencia las dos estrategias utilizan características

beneficiosas de ciertos microorganismos y familias de plantas respectivamente; a continuación, se van a explicar los dos tratamientos mencionados:

3.2 Microorganismos beneficiosos

Es una alternativa biológica en la cual se implementan microorganismos con características en particular, estas características pueden ser básicamente la producción de enzimas para mitigar ciertos nutrientes que se encuentren en el agua a tratar, y la implementación de estos microorganismos en campo se hace mediante un reservorio ubicándolo en el fondo del lago y en el fondo del reservorio se ubican los microorganismos generando un biofilm (comunidades de microorganismos) de bacterias anaerobias “descomponedores”. [29]

Figura 3

Etapas del cuerpo de agua con Microorganismos beneficiosos



Nota. En esta imagen se puede ver como los microorganismos beneficiosos ayudan a los cuerpos de aguas más específicamente los lagos a mejorar su calidad del agua. Tomado de: Biohac “Limpieza y estabilización de lagos y reservorios”. [En línea]. Disponible en: <http://www.biohac.com/limpieza-y-estabilizacion-de-lagos-y-reservorios/#:~:text=La%20aplicaci%C3%B3n%20del%20in%C3%B3culo%20biol%C3%B3gico,r%C3%A1pida%20de%20algas%20y%20plantas.>

Hay muchos tipos de microorganismos descomponedores en lagos y ríos, incluyendo bacterias, algas y hongos. Estos microorganismos desempeñan un papel importante en el ciclo del nitrógeno y el ciclo del carbono, ayudando a descomponer la materia orgánica y a liberar nutrientes esenciales para otras formas de vida acuáticas. [30]

En resumen, los microorganismos descomponedores son esenciales para mantener un equilibrio saludable en los ecosistemas acuáticos, ayudando a descomponer la materia orgánica y a liberar nutrientes para otras formas de vida.

Este tratamiento se implementa en lagos muy propensos a sufrir eutrofización tal como pasa en el lago Sochagota.

3.3 Fitotecnología

La o Las fitotecnologías (o también denominados humedales flotantes y/o artificiales) son “Soluciones Basadas en la Naturaleza” que mejoran la calidad del agua en cuerpos contaminados tal como lo son cuerpos superficiales o sea lagos, lagunas, ríos, etc.

Los humedales artificiales son fitotecnologías (tecnologías basadas en plantas) que se usan para el tratamiento de agua residual de diverso origen (doméstica, industrial, agrícola) y para mejorar la calidad de agua en lagos, ríos, lagunas, etc. Los Humedales Flotantes proveen una serie de beneficios (servicios ecosistémicos) como son el mejoramiento de la calidad de agua, secuestro de carbono, provisión de biomasa para generar biocombustibles, provisión de hábitat para aves y embellecimiento del paisaje. [31]

Figura 4

Humedal flotante (Fitotecnología)



Nota. La imagen da una visualización de cómo se ven los humedales flotantes en lagos. Tomado de: Peña. L.M, Candela. C.L.” Floating islands as a strategy for the establishment of aquatic plants in the Botanical Garden of Bogotá”.

Los humedales artificiales usan procesos naturales, como aquellos de los humedales naturales, para la remoción de contaminantes del agua y están constituidos por plantas, microorganismos asociados y suelo. Los humedales artificiales se pueden clasificar en humedales construidos y humedales flotantes. Los humedales construidos contienen plantas que crecen enraizadas en sedimentos o en un sustrato (plantas emergentes) y el agua contaminada fluye entre los tallos o las raíces. Por otro lado, en los humedales flotantes se usan plantas emergentes que crecen sobre una estructura flotante y las raíces están completamente sumergidas en el agua. [31]

Los humedales flotantes, son una tecnología natural relativamente nueva, las características que la hacen resaltar son los “servicios” que les dan a los ecosistemas, dichos “servicios” son su alta eficiencia para tratamiento de aguas de tormenta, aguas residuales municipales, escorrentías agrícolas y para mejorar la calidad del agua en lagos, lagunas, etc.

Este método de remediación se verá con mayor profundidad en el desarrollo de este trabajo.

4. IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE CONTAMINACIÓN CON MAS INFLUENCIA EN EL LAGO SOCHAGOTA

En este capítulo se mencionarán y mostraran las principales fuentes de contaminación en el lago Sochagota, y cuál o cuáles de estas tiene mayor influencia en el estado del agua, esto con el fin de lograr un contexto de los diferentes tipos de contaminación que recibe el agua del lago.

4.1 Descripción del área de estudio y delimitación de factores influyentes

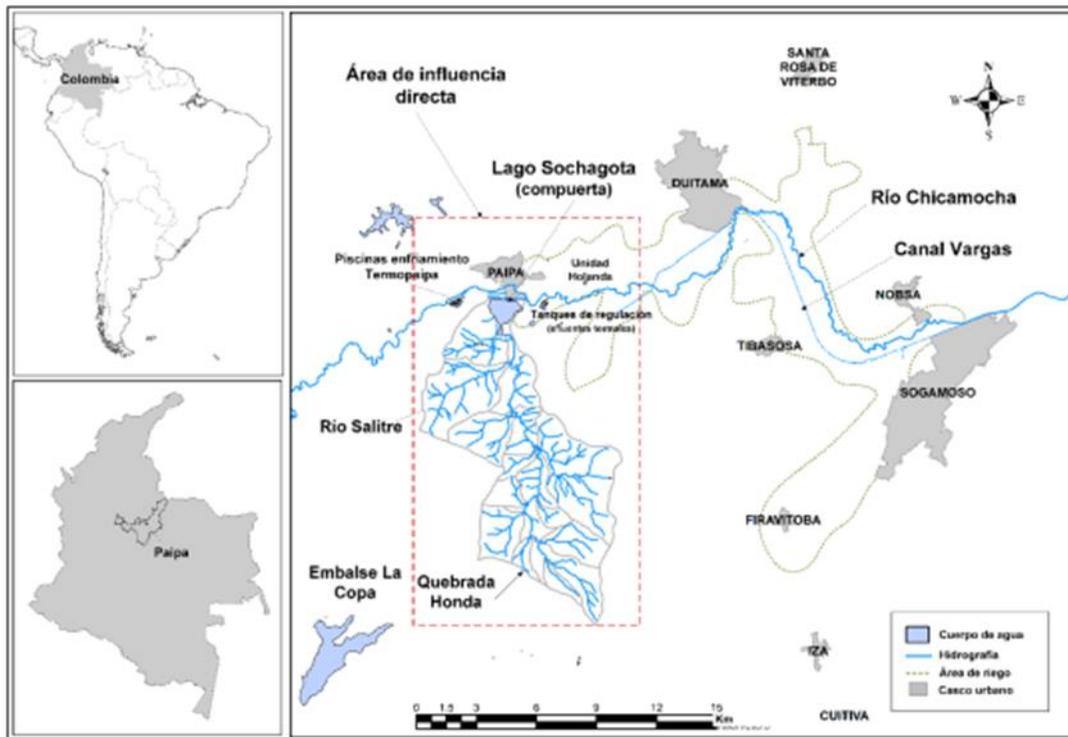
El lago Sochagota fue construido en 1956, principalmente para generar turismo en el municipio de Paipa (Boyacá – Colombia), y fue construido en la zona de drenaje de la quebrada Honda o el río Salitre, su elaboración también fue pensada para ser un regulador agrícola, ya que el efluente del lago Sochagota se conecta directamente con el Río Chicamocha.

El lago Sochagota es de suma importancia tanto social como ambiental para el municipio de Paipa, en la parte social se debe a que el lago en temporada vacacional genera ingresos al municipio por el turismo, deportes acuáticos y demás actividades acuáticas que se generan en dichas temporadas; por la parte ambiental el lago es de suma importancia ya que como se mencionó anteriormente ayuda a regular el flujo de agua al río Chicamocha, el Chicamocha es importante no solo para Paipa sino también para municipios aledaños ya que es la principal fuente de abastecimiento y recurso agrícola en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá, esta corporación es más conocida como Corpoboyacá.

La forma como el lago Sochagota ayuda a ser un regulador agrícola es la siguiente, el lago recibe el caudal de la quebrada Honda – río Salitre, dicho caudal se suma al volumen original del lago, cuando el volumen del lago sobrepasa la medida estándar se abre una compuerta la cual deja salir el efluente del lago hacia el río Chicamocha.

Figura 5

Localización del sistema socio-ecológico Lago Sochagota



Nota. En la figura se evidencia el “recorrido” que tiene el río salitre y la quebrada honda antes de llegar al lago Sochagota. Tomado de: O. Usaquén., Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas, tesis doctoral. Dpto. De ciencias y técnicas del agua y del medio ambiente, Universidad de Cantabria, Santander. Colombia, 2017.

El humedal presenta una superficie de 140 ha (hectáreas), con una profundidad media de 2.8 m, mientras que la extensión del área del distrito de riego cubre una superficie de 6449 ha, de las cuales cuatro quintas partes se emplean para el cultivo de pastos, seguido de papa (patata), cebolla, maíz, hortalizas y frutales.

Paipa y municipio aledaños tienen diferentes tipos de interacciones con el lago Sochagota y con la quebrada Honda – río Salitre respectivamente, por lo cual a lo largo de los años desde la construcción del lago en 1956 dichas interacciones han convertido al lago Sochagota en un sistema hipereutrófico (107 µg/l, promedio anual 2015) y mesosalino.

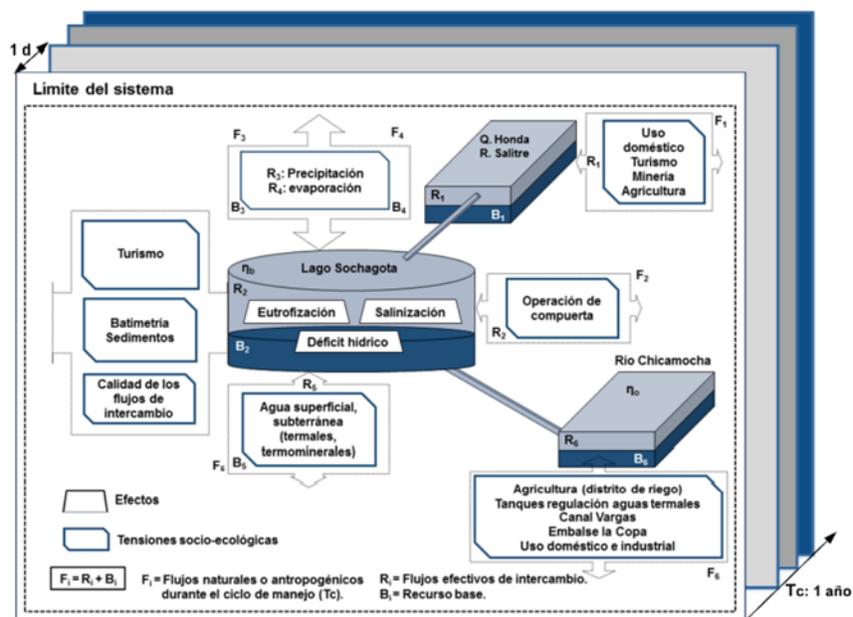
El lago Sochagota tiene aportes (interacciones) que contribuyen con caudales de diferente calidad tanto naturales como antropogénicas como: 1) aguas dulces (cuenca de la quebrada Honda y río Salitre); 2) contribuciones de agua subterránea (aguas termales, termominerales en la cuenca y en el acuífero); 3) precipitación y evaporación directa sobre el lago; 4) los vertidos realizados en la quebrada Honda (de origen doméstico, turístico, agrícola, minero); 5) vertidos de agua residual urbana (alivios del colector perimetral al lago); 6) vertidos difusos del sector turístico con diferentes niveles de tratamiento; y, 7) el intercambio con el río Chicamocha regulado por operación de la compuerta [32].

El lago recibe flujos desde la quebrada Honda (escorrentía superficial, afloramientos subterráneos, efluentes de las actividades domésticas, turísticas, mineras y agrícolas), precipitación directa y desde el acuífero libre sobre el cual fue construido. Los afloramientos superficiales y subterráneos se suman al balance hídrico junto con los flujos naturales (evaporación, precipitación) y se reflejan en el nivel del agua. La naturaleza salina del humedal se atribuye, en primera instancia, a las aguas termominerales y mineralizadas que afloran y se almacenan en el lago o que ingresan al sistema a través de quebrada Honda. [32]

El Lago Sochagota ha sido transformado natural y antropogénicamente durante las últimas décadas en lago mesosalino esto debido al caudal tan pequeño (en terminas de flujos en ríos) que se libera por la compuerta hacia el río Chicamocha, también por el bajo aporte de su única cuenca, por las aguas termominerales que se dan por la falla geológica de Boyacá y el afloramiento e intercambio de agua con el acuífero.

Figura 6

Modelo conceptual de todas las interacciones en el lago Sochagota con sus consecuencias

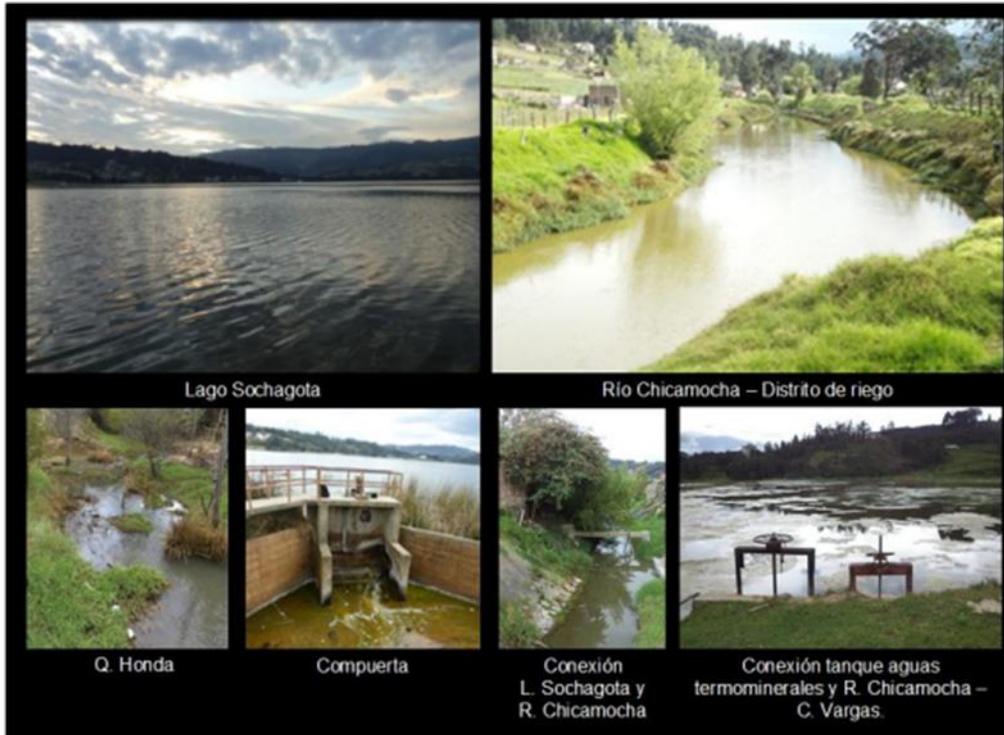


Nota. Modelo conceptual del lago Sochagota para la aplicación de la metodología. Tomado de: O. Usaquén., Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas, tesis doctoral. Dpto. De ciencias y técnicas del agua y del medio ambiente, Universidad de Cantabria, Santander. Colombia, 2017.

En resumen, tres fuentes principales de contaminación/interacciones se identifican en el Lago Sochagota: 1) vertidos del sistema urbano (alivios del sistema de alcantarillado perimetral); 2) aguas residuales de los sistemas de tratamiento del sector turístico (contaminación difusa); y, 3) la quebrada Honda – río Salitre (aguas residuales domésticas, del sector turístico, la actividad agrícola y de la minería del carbón). El humedal se regula con fines de aprovechamiento agrícola, por lo tanto, su efluente se conduce al río Chicamocha, sumándose a vertidos y aportes de interés regional. [32]

Figura 7

Sistema local de las conexiones con el sistema agrícola regional



Nota. Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas. Tomado de: O. Usaquén., Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas, tesis doctoral. Dpto. De ciencias y técnicas del agua y del medio ambiente, Universidad de Cantabria, Santander. Colombia, 2017.

Las diferentes interacciones que mantiene el lago se determina que las fuentes con más influencia en el estado salino del agua del lago Sochagota es su afluente natural (quebrada honda – río salitre) y los afloramientos de aguas termales y termominerales que se producen por la falla geológica del departamento de Boyacá, se determinan que estos dos factores son los más influyentes ya que, 1) las aguas termominerales y termales pasan principalmente iones los cuales suben la salinidad en el agua y, 2) las implementaciones que tiene la quebrada honda – río salitre en su recorrido como “sumidero” de los efluentes que producen la industria agrícola, la minera y los habitantes del departamento de Boyacá, causa que al llegar al lago Sochagota no solo llegue con

material orgánico sino con diferentes compuestos que se implementan en la agricultura y metales que se presentan en la minería (las implicaciones sobre el agua de estos dos últimos factores se abarcaron en el capítulo 1), a esto también toca sumarle que la quebrada honda – río salitre también tiene afloramientos de aguas termales y termominerales; en conclusión el afluente del lago también ayuda a incrementar la salinidad del lago Sochagota.

Los factores anteriormente mencionados causan tres principales problemas en el lago Sochagota los cuales son: 1) generación de déficit hídrico, 2) alta eutrofización y 3) una alta salinización en el agua., pero como se mencionó al inicio de este trabajo, solo nos centraremos en el problema de la salinización del agua.

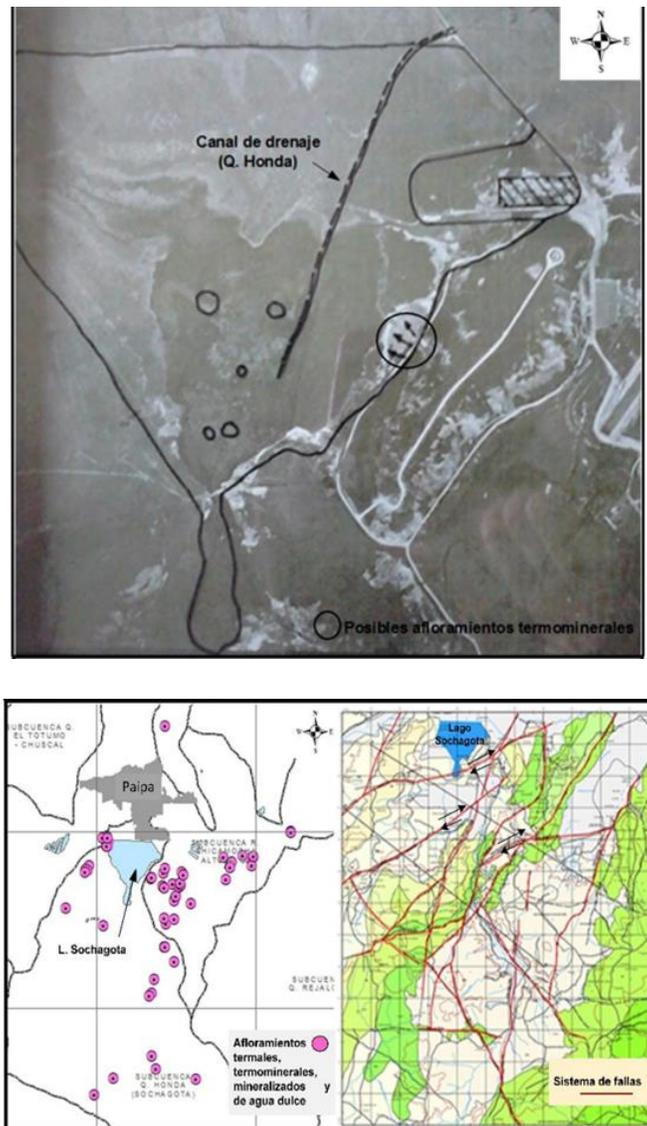
4.2 Focalización de los problemas del lago

El Lago Sochagota representa un humedal continental de importancia económica y ambiental, con problemas de eutrofización, salinización y déficit hídrico. El Lago Sochagota la principal fuente de sales disueltas corresponde a las aguas termales, termominerales y mineralizadas que afloran en su interior o que forman parte de su afluente principal (quebrada Honda), el lago Sochagota, la presión antrópica por vertidos de aguas residuales contribuye con el aporte de sales, nutrientes, entre otros elementos, que actúan sinérgicamente en detrimento de su calidad. Finalmente. las presiones naturales asociadas con las condiciones climáticas, constituyen un factor adicional que influye en la oferta y demanda del recurso, principalmente del sector agrícola, y pueden contribuir con aportes o disminuir la disponibilidad de agua en el sistema. [32].

El intercambio potencial con el acuífero libre puede explicarse considerando: 1) la preexistencia de afloramientos en la zona de inundación que hoy ocupa el lago; y, 2) el inventario de 70 afloramientos de agua termal, termomineral, mineralizada y dulce en el municipio de Paipa y en la subcuenca de la quebrada Honda, de los cuales existen al menos 25 pozos y nacimientos de origen subterráneo en las inmediaciones del lago, localizados, principalmente, en los sectores nor-oeste y sur. Así mismo, es importante considerar la evapotranspiración en el humedal y las dinámicas de riego en su área de influencia. [32]

Figura 8

Localización de posibles afloramientos termominerales en el Lago Sochagota 1956 y en su área de influencia



Nota. i) Vuelo IGAC C780, julio 25 de 1956. Fotografía aérea N°224 (imagen sup.); ii) Inventario de afloramientos subterráneos (imagen izq.); iii) disposición y control estructural de las zonas de descarga en puntos de intersección de fallas geológica (imagen der.). Tomado de: O. Usaquén., Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas, tesis doctoral. Dpto. De ciencias y técnicas del agua y del medio ambiente, Universidad de Cantabria, Santander. Colombia, 2017.

En las imágenes anteriores se puede apreciar los posibles afloramientos de aguas termominerales que se presentan en el lago Sochagota y sus alrededores, también se evidencian las fallas geológicas que están en municipios aledaños a Paipa.

Estas aguas termominerales y termales como están en la falla geológica de Boyacá y según la Subdirección Recursos del Subsuelo (INGEOMINAS) pertenecen al grupo de las alcalinas, sulfatadas, cloruradas y bicarbonatadas, y estas aguas termales tienen un alto contenido de sales de sulfato de sodio y calcio y también en cloruros de sodio.

Y por último se resalta que el área del lago Sochagota es potencialmente estratégica para la conservación de la biodiversidad, ya que el lago es de especial importancia dentro de los ecosistemas del departamento, por su elevada recarga y oferta hídrica que beneficia las comunidades que habitan zonas aledañas las cuales como ya se mencionó utilizan el río Chicamocha como agua de riego (Distrito de Riego del Alto Chicamocha (DRACH)).

Esta problemática a largo plazo podría afectar las propiedades fisicoquímicas del agua y comprometer, además, el suelo en el Distrito de Riego del Alto Chicamocha (DRACH), esto se debe a que la salinidad está relacionada con fenómenos ambientales como la aridez climática, reflejada por una baja pluviometría, en combinación con una elevada evapotranspiración, debida a una condición climatológica seca, la composición del suelo y, en este caso en particular, por surgencias hidrotermales. [33]

La salinización en los lagos y ríos (y en general en aguas superficiales de carácter dulce) trae consigo muchos problemas, tanto sociales como económicos y ecológicos, un claro ejemplo de este problema los ríos fronterizos (comprenden las cuencas de los ríos Dumaresq, Severn y Macintyre) en Australia [33], en estas cuencas por actividades humanas (agricultura y extracción de recursos) aumento la salinidad en el agua, esto llevo a la cuenca a presentar diferentes problemas tales como la reducción de la biodiversidad, alteraciones de las funciones de su ecosistema y afectar los servicios que presta el ecosistema (por ejemplo la pesca); este problema no solo afecto directamente a las cuencas sino también el agua de consumo humano y daño la infraestructura del lugar para su remediación el gobierno tuvo que invertir más de 700 millones de dólares.

Cabe resaltar que regular el contenido interno de sales es una tarea complicada y de gran coste energético para cualquier organismo, el poderse adaptar a concentraciones/niveles grandes de sal es complejo.

Con referente a lo anterior uno de los problemas más relevantes que causa la salinidad en muchos ecosistemas, es la limitación de la supervivencia de organismos de agua dulce, estas limitaciones generan efectos negativos, debido a que la salinidad es una condición ambiental que influye en su abundancia y desarrollo, toda vez que somete al organismo a un estrés osmótico, si este no se adapta a las concentraciones salinas. [33]

La Salinización en el lago Sochagota no solo se ve favorecida por los factores anteriormente mencionados sino también por dos condiciones externas; primero las condiciones operativas que tiene el lago, o sea la compuerta la cual ayuda a regular el flujo de agua que entra en el río Chicamocha, la apertura o cierre de la compuerta conllevan a una variación del nivel en el interior del humedal, afectando a la hidrodinámica y, en consecuencia, reduciendo o incrementando los efectos de salinización por dilución o acumulación de sales en el Lago Sochagota.

Figura 9

Apertura compuerta Lago Sochagota



Nota. Compuerta del lago Sochagota. Tomado de: Siete días Boyacá, “Abren compuertas del Lago Sochagota en Paipa”. [En línea]. Disponible en: <https://boyaca7dias.com.co/2018/10/18/abren-compuertas-del-lago-sochagota-en-paipa/>

La apertura de la compuerta del lago, se encuentran condiciones que pueden comprometer de manera importante la renovación del humedal. La compuerta se encuentra cerrada gran parte del año, siendo el único flujo de una fuga existente en la base de la estructura de regulación; para la que se ha medido un caudal entre 2 y 11 l/s lo que viene siendo entre 0.002 y 0.011 m³/s, a continuación, se muestra una tabla con los días de apertura de la compuerta. [32]

Tabla 5*Relación de aperturas de compuertas lago Sochagota*

AÑO	MES	DÍA	Duración apertura y descripción
2015			No se realizó apertura
2016	Marzo	3	Se permitió la habilitación del ducto transversal el cual transporta las aguas de las piscinas de enfriamiento hacia el Lago Sochagota con el fin de “inyectar oxígeno”, con un caudal de 47 litros por segundo
	Marzo	7	Trasvase del lago de enfriamiento hacia el lago Sochagota
	Julio	3	Mesa técnica para superar la contingencia del lago y nueva mortandad de peces.
	Julio	11	Emergencia, malos olores, mortandad de peces
	Octubre	14	Apertura compuerta por 72 horas.
2017	Enero	19	48 horas, (2:00 p.m.), apertura compuertas Sistema Paipa
	Marzo	17	96 horas, (10:00 a.m.), con apertura compuertas en la Copa
		31	50 horas, (8:00 a.m.), apertura compuertas Sistema Paipa
	Abril	17	50 horas, (8:00 a.m.), apertura compuertas Sistema Paipa
		11	50 horas, (6:00 a.m.), con apertura compuertas en Sistema Paipa y piscinas de enfriamiento de GENSA
	Mayo	12	72 horas, (8:00 a.m.), con apertura compuertas en Sistema Paipa y piscinas de enfriamiento de GENSA
		28	34 horas, (8:00 a.m.), con apertura compuertas en la Copa
	Octubre	2	56 horas, (7:00 a.m.), con apertura compuertas en la Copa
Noviembre	17	42 horas, (6:00 p.m.), con apertura compuertas en la Copa	
2018	Abril	19	48 horas, (8:00 am), con apertura compuertas en la Copa
	Mayo	9	Abertura por nivel máximo del lago Sochagota
2019			No se realizó apertura
2020	Noviembre	20	72 horas, (8:00 a.m.), con apertura compuertas la Copa y las dársenas de regulación de aguas termo-minerales

2021	Octubre	14	Se abren las compuertas del lago Sochagota junto con las compuertas del embalse la Copa
2022	Marzo	10	48 horas, con apertura compuertas la Copa

Nota. La tabla es una adaptación en donde se aprecian las aperturas de la compuerta del lago, el tiempo de esta y con sus razones. Tomada de: D. Sandoval., Evaluación de la calidad del agua en el lago Sochagota (Boyacá) mediante indicadores socio-ecológicos de base hidrodinámica, tesis de maestría. Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo Tomas, Tunja, Colombia, 2021.

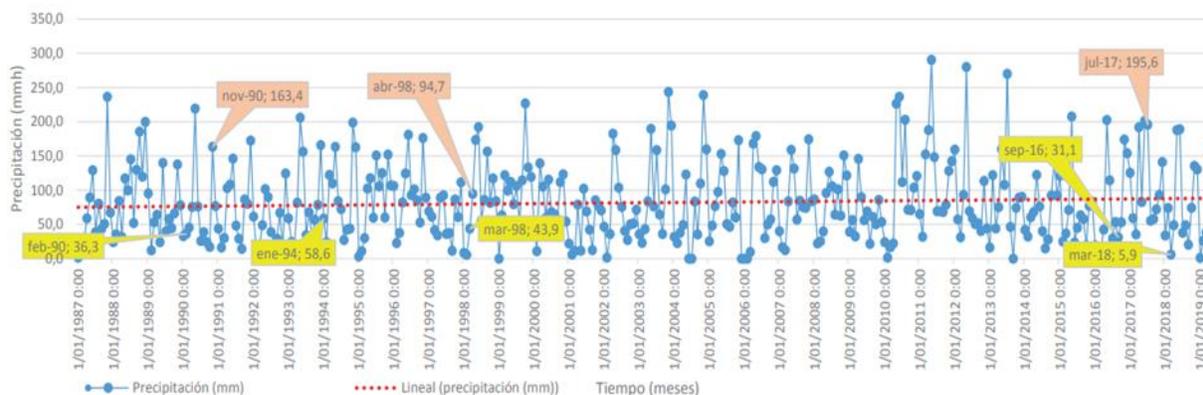
Antes de mencionar el segundo factor que favorece a la salinización del lago se aclara que una conductividad “normal” o aceptable para los lagos es de 50 a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [34].

El segundo factor externo que favorece la salinización en el lago son las condiciones climáticas, pero más específicamente las precipitaciones que ocurren en el departamento de Boyacá, se evidenciaron dos temporadas secas (bajas precipitaciones) y dos temporadas lluviosas (altas precipitaciones de carácter bimodal) en el año.

Los meses predominantemente secos son diciembre, enero, febrero, julio y agosto; mientras que las temporadas de lluvia se extienden desde finales de marzo hasta principios de junio, y desde septiembre hasta comienzos de noviembre. En los meses secos de principios de año, llueve de 4 a 6 días/mes; en los intermedios, en promedio 17 días lluvia/mes y en los meses de mayores lluvias puede llover entre 18 y 20 días/mes. Con el régimen de lluvias estimado sobre la cuenca aportante al lago, primero, se establecieron relaciones entre la ce (conductividad eléctrica) y las condiciones hidroclimáticas locales, segundo, se recopiló la variación de precipitación mensual y la ce, desde 1987 hasta junio del 2019. [33]

Figura 10

Precipitación total mensual 1987-2019



Nota. La figura representa las precipitaciones en el municipio de Paipa del año 1987 hasta el año 2019. Tomado de: J.C. Monroy Ramírez, A.J. Espinosa Ramírez y Jiménez Avella W.A., “Hidroclimatología local e impactos en el lago Sochagota, Paipa, Boyacá”. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina Vol. 31(1) pp. 53-72.

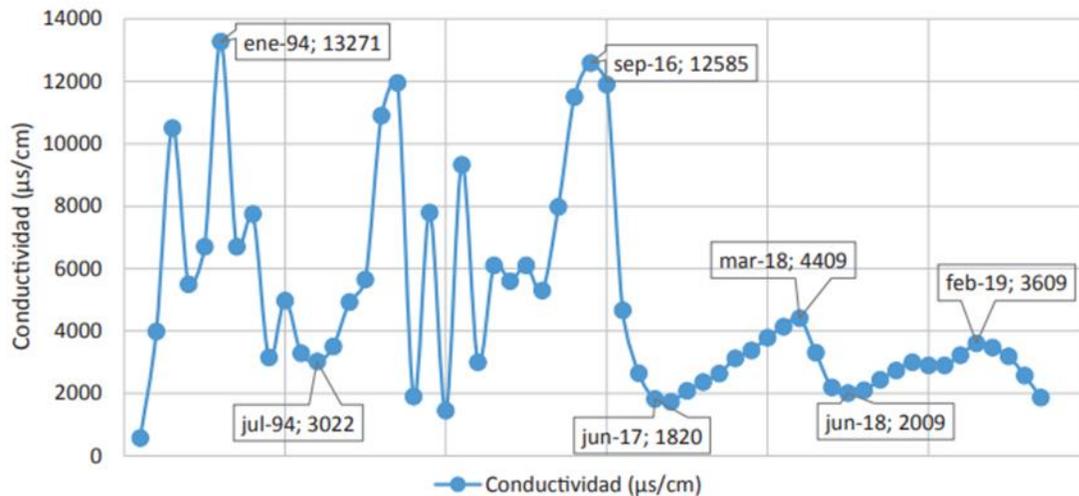
En la imagen 26 se puede ver el comportamiento de las precipitaciones sobre la cuenca a que alimenta el lago Sochagota. Las mayores precipitaciones ocurren en abril, mayo y noviembre, equivalente a la de los meses con mayores aportes de caudal al lago desde su microcuenca. El periodo seco fue en enero-abril. Se registran anualmente en forma reiterada los valores más críticos de precipitación y, por tanto, de menor entrada de caudal al lago durante los últimos 30 años, lo que favoreció el aumento en la concentración de sales para este periodo. [33]

Entre 1987 y 2019 registraron menores reportes de conductividad eléctrica (ce) para los meses que predomina una condición húmeda y de mayor precipitación (julio, abril y noviembre) con registros que oscilan en el rango 1500 - 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para los meses de condición seca (enero, febrero y marzo), se presentaron los registros más altos, oscilantes en el intervalo 4000 - 8000 $\mu\text{S}/\text{m}$, regularmente, debido a entradas de aguas termominerales, cargadas con sales, de su cuenca principal, y por afloramientos en su interior, cabe mencionar que en los periodos secos la evaporación en el lago aumenta y hay un menor caudal de agua salina proveniente de su afluente.

En el año 2016, hubo una alerta sanitaria en el lago y altos valores de ce. Esto evidencia estrés salino sobre los organismos del hidrosistema, por conductividades superiores a los 10 000 ($\mu\text{S}/\text{m}$), como en septiembre de 2020, que trajo consigo alteraciones del hidrosistema y mortandad de peces como la carpa común (*Cyprinus carpio*), la cual no toleró las condiciones del medio en ese momento, a pesar de ser una especie caracterizada por su capacidad de vivir en aguas con poca disponibilidad de oxígeno [33]. A partir de 2016, se declaró una emergencia sanitaria, como signo de alerta de los problemas que presentaba el lago, y se tomaron medidas como la apertura de la compuerta y la activación del ducto trasverso, que aporta aguas del río Chicamocha. Esto evidenció síntomas de mejora de calidad del agua, con disminución de la ce en los datos posteriores a septiembre de 2016.

Figura 11

Conductividad eléctrica del lago de Sochagota (1986-2019)



Nota. Este grafico representa el comportamiento de la conductividad eléctrica del lago Sochagota desde 1986 hasta 2019. Tomado de: J.C. Monroy Ramírez, A.J. Espinosa Ramírez y Jiménez Avella W.A., “Hidroclimatología local e impactos en el lago Sochagota, Paipa, Boyacá”. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina Vol. 31(1) pp. 53-72.

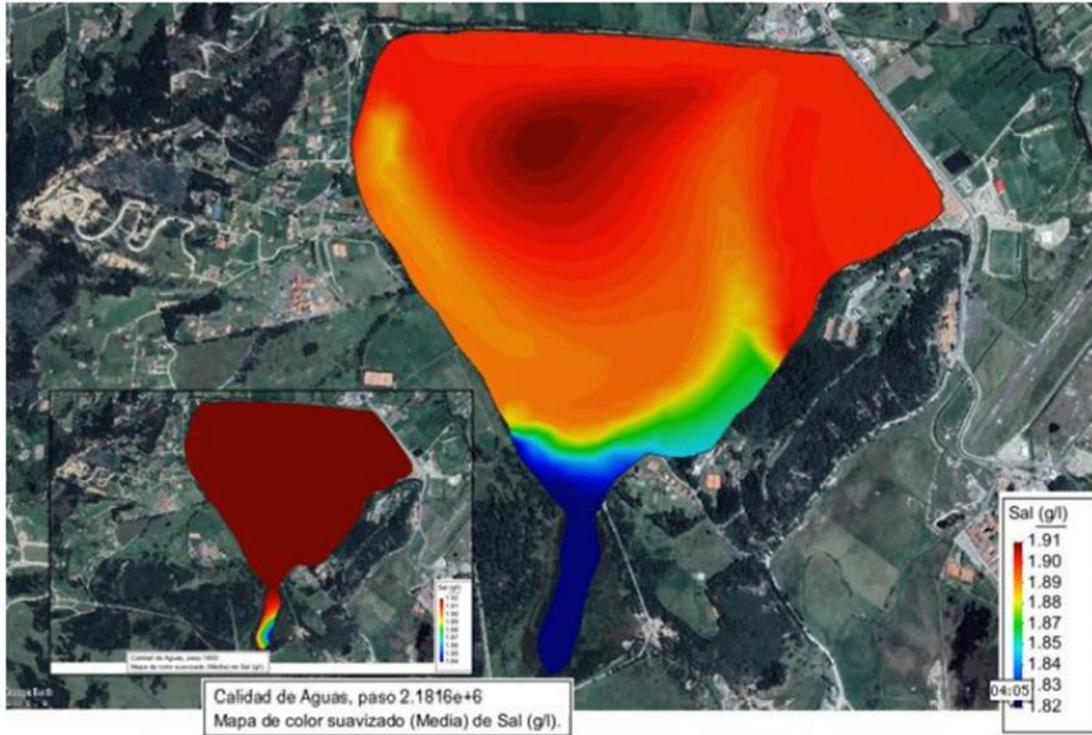
El lago Sochagota presenta dos escenarios con respecto a las precipitaciones, el primer escenario es el de condición húmeda o sea el de mayor precipitación y el segundo escenario el cual es el de condiciones secas o sea menores precipitaciones.

Las aguas ricas en sales y material iónico que ingresan al lago Sochagota (aguas provenientes del afluente y afloramientos de aguas termales) tienden a homogenizarse y variar ligeramente sus concentraciones en todo el cuerpo de agua, esto debido a la difusión. Para el escenario de mayores precipitaciones, el lago presenta un aumento en el ingreso de caudal proveniente del sistema quebrada Honda-río Salitre (afluente), además la apertura de la compuerta que regula el sistema, genera una renovación en la calidad del agua. [32]

Con lo anterior se puede afirmar que el lago tiende a tomar las características fisicoquímicas que trae el agua del sistema quebrada Honda-río Salitre. Con valores de salinidad que fluctúan entre 1,83 g/l hasta los 1,89 g/l. Se considera que, en general para los escenarios de condiciones húmedas, el lago se clasifica como holigohalino. [33]

Figura 12

Comportamiento de las sales a nivel mensual, durante una condición húmeda (mayores precipitaciones)



Nota. La imagen representa el comportamiento que adaptaría el lago en épocas de mayores precipitaciones. Tomado de: J.C. Monroy Ramírez, A.J. Espinosa Ramírez y Jiménez Avella W.A., “Hidroclimatología local e impactos en el lago Sochagota, Paipa, Boyacá”. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina Vol. 31(1) pp. 53-72.

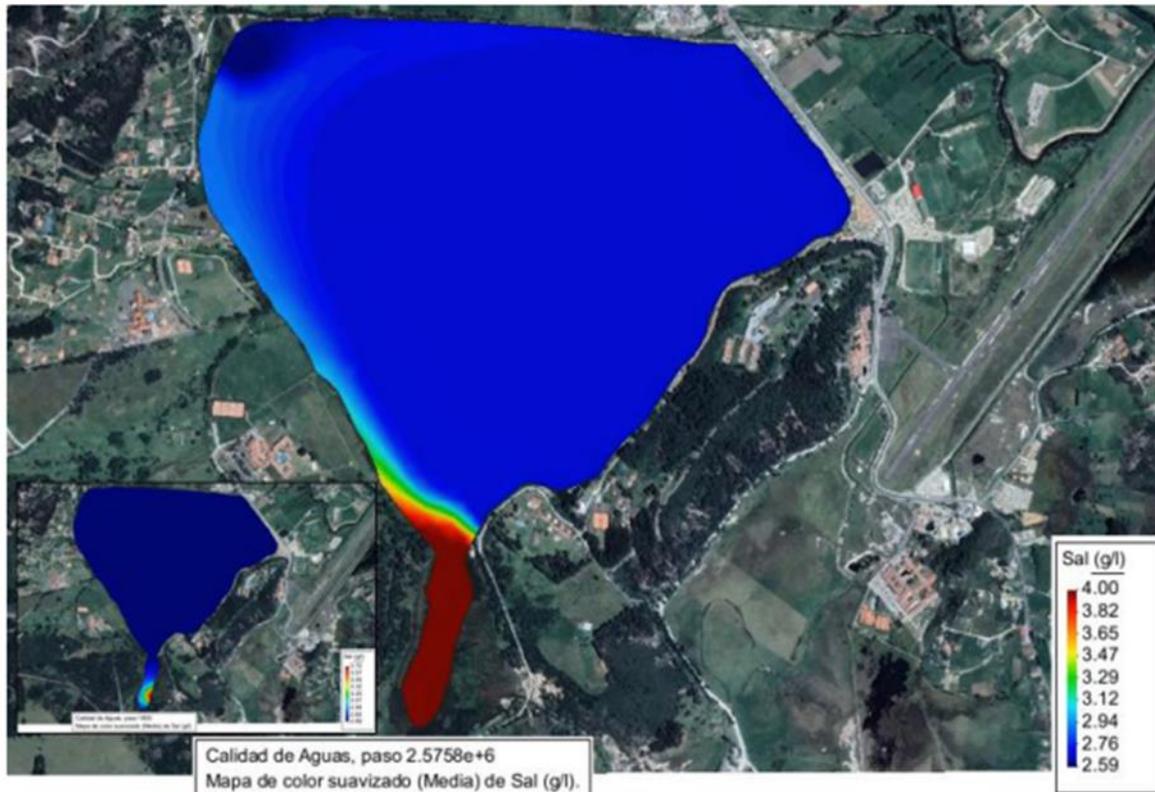
En el 2019 en periodos de menores precipitaciones se evidencio que la entrada de lago, aguas provenientes del afluente con cargas muy salinas con valor de 4,5 g/l. Mientras para el resto del lago, los valores oscilaban entre los 2,6 g/l y 2,3 g/l, esto se puede dar ya que, en la entrada principal del ecosistema, existen afloramientos de aguas termales y termominerales. [33]

Una estrategia que implementan para bajar o reducir el nivel de sales en el lago es la entrada de aguas provenientes del rio Chicamocha por el ducto transverso que tiene el lago, el ducto entro en funcionamiento en el año 2016, su funcionamiento básicamente

consiste en introducir aguas de baja salinidad al lago Sochagota. A continuación, se muestra el comportamiento de las sales con esta estrategia. [32]

Figura 13

Comportamiento de las sales a nivel mensual, durante una condición seca (menores precipitaciones)



Nota. En la imagen se evidencia el comportamiento que adaptaría en épocas de bajas precipitaciones. Tomado de: J.C. Monroy Ramírez, A.J. Espinosa Ramírez y Jiménez Avella W.A., "Hidroclimatología local e impactos en el lago Sochagota, Paipa, Boyacá". Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina Vol. 31(1) pp. 53-72.

El color azul de las figuras indica la entrada de aguas por el ducto transversal, esta zona presentó una conductividad eléctrica (ce) de 2800-2600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ya el cuerpo de agua presenta mayor concentración, y tiende a normalizar las concentraciones, entretanto, la variabilidad en cuanto a las demás zonas del lago para las concentraciones de ce no fue significativa.

Mencionando las principales causas de salinización que tiene el lago, las fuentes puntuales con mayor influencia sobre el lago y el problema que traen estos niveles de sal para la biodiversidad y los ecosistemas que lo padecen, ahora procedemos a ver las posibles soluciones que tienen estas aguas con altos niveles de salinización.

4.3 Estrategias y/o tecnologías para reducir la salinización en cuerpos de agua

Las soluciones que se pueden brindar para este tipo de problemáticas se les denomina métodos o técnicas de desalinización, entre las técnicas más implementadas para este tipo de problemáticas se encuentran métodos ya contextualizados en el marco teórico. Tal como lo son los métodos de filtración (osmosis inversa y nanofiltración), pero hay otros métodos para este tipo de problema:

4.3.1 Evaporación relámpago

Es un proceso de desalinización, en el cual el agua se introduce en gotas sobre una cámara a baja presión. Estas se convierten en vapor, se condensan posteriormente. Este proceso se repite hasta conseguir el grado de desalación óptimo. [35]

4.3.2 Electrodialisis

Consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través de una solución iónica. De esta manera el agua se desaliniza obteniéndose agua dulce. [35]

4.3.3 Intercambio iónico

Este proceso se basa en las propiedades que presentan ciertas sustancias insolubles capaces de intercambiar aniones o cationes cuando se ponen en contacto con un electrolito. Es usado en la desalinización de agua salobre con altas concentraciones y no requiere de altas presiones, ni un extenso tratamiento previo o un aporte de energía térmica alto. Sin embargo, el agotamiento de la resina limita un poco la funcionalidad de este proceso al igual que los grandes volúmenes con los que las resinas se deben regenerar. [35]

4.3.4 Plantas desalinizadoras

Son plantas las cuales convierten el agua de mar o aguas con una cantidad de iones considerables a agua potable, estas plantas implementan y/o tienen 4 etapas (captación de agua, pretratamiento, tratamiento y purificación y postratamiento). [35]

Los métodos anteriores son los más implementados y de cierta forma los más estandarizados a nivel industrial, pero hay un método el cual es relativamente nuevo y tiene un amplio campo de aplicabilidad para este tipo de problemáticas y problemáticas similares, se le conoce como Fitotecnologías.

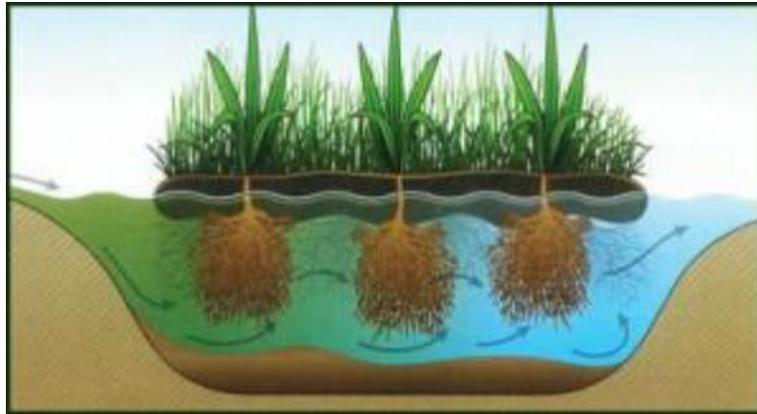
4.4 Fitotecnología (humedales flotantes)

El término Fitotecnología describe la aplicación de la ciencia y la ingeniería para estudiar problemas y dar soluciones que involucran plantas. Aunque el término no se usa ampliamente, es útil en la comprensión de la importancia de las plantas y su papel beneficioso en ambos sistemas sociales y naturales. El uso de plantas como tecnologías para ayudar a abordar los desafíos ambientales. [36]

Los humedales artificiales usan procesos naturales, como aquellos de los humedales naturales, para la remoción de contaminantes del agua y están constituidos por plantas, microorganismos asociados y suelo. Los humedales artificiales se pueden clasificar en humedales construidos y humedales flotantes. Los humedales construidos contienen plantas que crecen enraizadas en sedimentos o en un sustrato (plantas emergentes) y el agua contaminada fluye entre los tallos o las raíces. Por otro lado, en los humedales flotantes se usan plantas emergentes que crecen sobre una estructura flotante y las raíces están completamente sumergidas en el agua. [37]

Figura 14

Representación de un humedal artificial

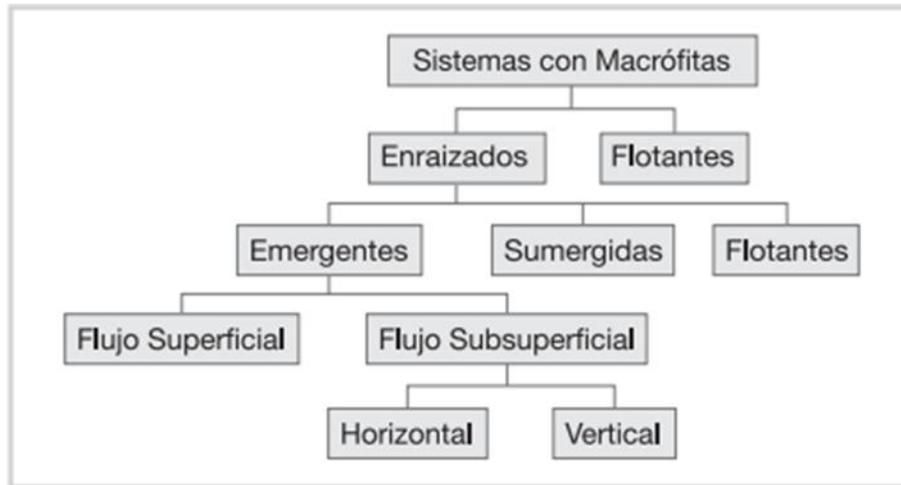


Nota. Representación de un sistema de humedales flotantes. Tomado de: J.P. Mojica F. y C.A. Chaves T. Estudio de humedales flotantes para la mejora de calidad de agua de escorrentía. Caso: edificio de parqueaderos de la pontificia universidad javeriana, Facultad de ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2015.

La fitotecnologías o fitorremediación o también llamada humedales flotantes o humedales artificiales son sistemas de depuración para aguas superficiales o subterráneas contaminadas, este proceso consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente.

Figura 15

Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas



Nota. La imagen demuestra los sistemas de macrófitas y sus respectivas divisiones de clasificación. Tomado de: O. Delgadillo, A. Camacho, L.F. Pérez y Andrade M., Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2010.

La fitorremediación aprovecha la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo, el tratamiento de aguas contaminadas para su depuración con este proceso/técnica se lo realiza mediante sistemas que tienen tres partes principales: recogida, tratamiento y evacuación al lugar de restitución. [36]

La Fitotecnología básicamente emplea plantas para la remediación (entiéndase remediación por eliminación) del medio ambiente, las macrófitas ayudan a eliminar muchas formas de contaminantes, pero en general ayudan a eliminar contaminantes tales como metales en el agua, productos ampliamente utilizados en la industria de la agricultura como los plaguicidas y la industria de los hidrocarburos.

Se pueden construir humedales para que traten fuentes de contaminación muy puntuales tales como las siguientes:

- Aguas domésticas y urbanas.
- Aguas industriales, incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos, alimentación, refinerías y mataderos entre otros.
- Aguas de drenaje de extracciones mineras.
- Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana.
- Tratamiento de fangos de depuradoras convencionales, mediante deposición superficial en humedales de flujo subsuperficial donde se deshidratan y mineralizan [36]

Un punto a favor de estos humedales artificiales es que las diversas plantas que se implementan en la construcción de los mismos, ayudan a impedir que la contaminación que traen fuentes como el viento, la lluvia y aguas subterráneas se extiendan a otras zonas.

Se han identificado una amplia diversidad de especies que se emplean para este fin. Algunas de ellas, debido a su gran capacidad para acumular metales pesados, reciben el nombre de hiperacumuladoras. Por definición, estas plantas deben acumular al menos 100 µg/g (0.01 % peso seco) de Cd y As; 1000 µg/g (0.1 % peso seco) de Co, Cu, Cr, Ni y Pb; y 10 000 µg/g (1.0 % peso seco) de Mn. Esta tecnología se hace más efectiva a través de la manipulación genética, lo que mejora la capacidad de remediación de las plantas; se han diseñado especies vegetales con una mayor capacidad de degradación de contaminantes orgánicos o de acumulación de metales pesados. Algunas plantas genéticamente modificadas (GM) están adaptadas específicamente para la fitorremediación de Cd, Hg o bifenilos policlorados (PCB's) [38].

Cabe aclarar que la contaminación hacia el ambiente se produce por diversos factores tales como la incorporación de cualquier tipo de energía, organismo o sustancia, el cual afecta las características de los ecosistemas y a su vez la biodiversidad, esto llega a afectar y modificar negativamente las propiedades y capacidades para poderlas degradar; la entrada de estos factores se realiza como consecuencias de actividades antropogénicas (mayormente) y también de forma natural, los contaminantes se clasifican de forma general en: orgánicos e inorgánicos.

En general, los mecanismos involucrados en la remoción de contaminantes son de tres tipos:

- Físicos (sedimentación, filtración, adsorción, volatilización)
- Químicos (precipitación, hidrólisis, reacciones de óxido-reducción o fotoquímicas)
- Biológicos (resultado del metabolismo microbiano, del metabolismo de plantas o de procesos de bioabsorción). [38]

Este tipo de tecnologías se basan en los mecanismos fisiológicos básicos que tienen lugar en las plantas y en los microorganismos asociados a ellas, tales como: transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición, es por esto que se cree que dependiendo del tipo de contaminación que se presente y se quiera tratar las tecnologías de fitorremediación se pueden utilizar como medio de contención (rizofiltración, fitoestabilización y fitoinmovilización) o eliminación (fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización), para este tipo de clasificaciones toca tener en cuenta dos factores; condiciones del sitio y el nivel de limpieza requerido.

Tabla 6

Mecanismos de fitorremediación

Proceso	Mecanismo	Contaminantes
Fitoestabilización	Complejación	Orgánicos e inorgánicos
Fitoextracción	Hiperacumulación	Inorgánico
Fitovolatilización	Volatilización a través de las hojas	Orgánicos e inorgánicos
Fitoinmovilización	Acumulación en la rizosfera	Orgánicos e inorgánicos
Fitodegradación	Uso de plantas y microorganismos asociados para degradar contaminantes	Orgánico
Rizofiltración	Uso de raíces para absorber y adsorber contaminantes del agua	Orgánicos e inorgánicos

Nota. En la tabla se puede apreciar los principales mecanismos en los que se pueden desenvolver la fito tecnología. Tomado de: A.E. Delgadillo López, C.A. González

Ramírez, F. Prieto García, J.R. Villagómez y O. Acevedo Sandoval. "fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación", *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, pp.597-612, 2011.

Estos humedales artificiales pueden aplicar diversos tipos de plantas dependiendo el tipo de contaminación a tratar. A continuación, se mencionan las plantas que más se ven involucradas en las técnicas de fitorremediación:

- Fitoestabilización: *Hyparrhenia hirta* (Pb); *Zygophyllum fabago* (Zn); *Lupinus albus* (Cd, As); *Anthyllis vulneraria* (Zn, Pb, Cd); *Deschampsia cespitosa* (Pb, Cd, Zn); *Cardaminopsis arenosa* (Cd, Zn); *Horedeum vulgare*, *Lupinus angustifolius* y *Sécale cereale* (As); *Lolium italicum* y *Festuca arundinaceae* (Pb, Zn); y *Brassica júncea* (Cd, Zn, Cu, Mn, Fe, Pb). [39]
- Fitoextracción: *Thlaspi caerulescens* (Cd); *Sedum alfredii*, *Viola baoshanensis* y *Vertiveria zizanioides* (Zn, Cd, Pb); *Alyssum múrale*, *Trifolium nigriscens*, *Psychotria douarrei*, *Geissois pruinosa*, *Homalium guillainii*, *Hybanthus floribundus*, *Sebertia acuminata*, *Stackhousia tryonii*, *Pimelea leptospermoides*, *Aeollanthus biformifolius* y *Haumaniastrum robertii* (Ni); *Brassica júncea*, *Helianthus annuus*, *Sesbania drummondii* (Pb); *Brassica napus* (Cu, Pb, Zn); y *Pistia stratiotes* (Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) [39]
- Fitovolatilización: *Salicornia bigelovii*, *Brassica júncea*, *Astragalus bisulcatus* y *Chara canescens* se han empleado para la remediación de sitios contaminados con Se. [39]
- Rizofiltración: *Scirpus lacustris* (Cd, Cu, Pb, Mg, Fe, Se, Cr), *Lemna gibba* (Pb, As, Cu, Cd, Ni, Cr, Al, Fe, Zn, Mn), *Azolla caroliniana* (Hg, Cr Sr, Cu, Cd, Zn, Ni, Pb, Au, Pt), *Elatine Manda* (As), *Wolffia papulifera* (Cd), *Polygonum punctatum* (Cu, Cd, Pb, Se, As, Hg, Cr, Mn) y *Myriophyllum aquaticum*, *Ludwigina palustris* y *Mentha aquatic* (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni) [39]

La Fitotecnología tiene un amplio campo de aplicabilidad para diferentes tipos de contaminación que se presentan en el ambiente; mencionando también que las modificaciones genéticas para la variedad de plantas que se pueden implementar, ayuda a tener mejores eficiencias de limpieza en los medios a los que se quieren aplicar, ahora se va a enfocar este tipo de tecnologías a la problemática del lago Sochagota, donde su problema radica en la salinización que posee el agua en ciertas temporadas del año.

De la fitorremediación se destaca una técnica en específico para esta problemática, dicha técnica se le conoce como Fitodesalinización, aunque esta técnica se ha implementado más en la recuperación de suelos se podría aplicar también en la remediación de fuentes hídricas con niveles de sales no aptos para la habitad, tal como lo es el caso del lago Sochagota.

La Fitodesalinización implementa plantas macrófitas, esto ya que este tipo de plantas tienen la particularidad de ser tolerantes a la sal y crecen en suelos o aguas de alta salinidad, entrando en contacto con agua salada a través de sus raíces o por niebla salina, como en semidesiertos salinos, manglares, pantanos y lodazales y costas; también tienen la característica de acumular sodio, y también son capaces de tolerar grandes concentraciones de iones de sodio (Na^+) y iones cloruros (Cl^-).

Figura 16

Plantas Halófilas en su habitad

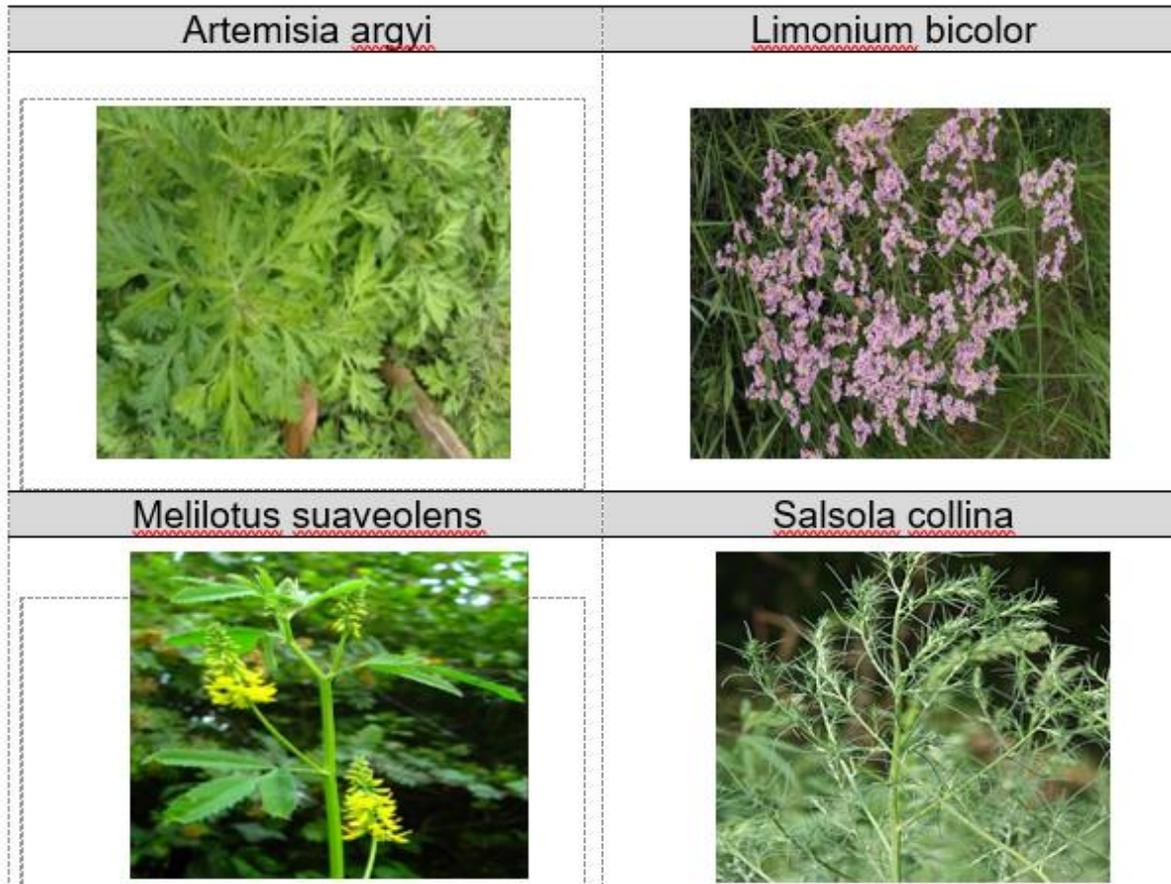


Nota. En la imagen se aprecia las macrófitas en su habitad. Tomada de: JardineriaON.
(s.f.). “¿Qué son las halófitas?”[En línea].
<https://www.jardineriaon.com/halofitas.html>[Acceso: octubre 12, 2022].

Los tipos de plantas Halófilas que se podrían implementar para tratar en la salinización en el lago Sochagota son los siguientes: *Artemisia argyi*, *Limonium bicolor*, *Melilotus suaveolens* y *Salsola collina*.

Tabla 7

Imágenes de plantas con posible aplicación en Fitodesalinización en fuentes hídricas



Nota. En este cuadro se pueden apreciar 4 tipos de familias de plantas con posible aplicación para el tratamiento de aguas salinas.

Se establecen estas familias de plantas ya que se probaron en experimentos en macetas con tres tipos de suelos salinos recolectados en Tianjin (Distrito Da gang, Distrito Xiqing y Condado Jixiang). Las propiedades fisicoquímicas de los suelos y las concentraciones de iones se evaluaron tanto antes como después del crecimiento de las plantas utilizadas, y se observó en todos los ensayos que las concentraciones de iones Na y Cl disminuyeron después del crecimiento de las plantas halófitas. [40].

Lloyd y Buckley reportaron una planta de la familia de las macrófitas la cual encaja perfectamente en esta problemática, dicha planta se conoce como *Acrostichum aureum*,

esta planta es idónea para este problema, ya que se caracteriza por ser una macrófita acuática, reguladora y extractora de sales disueltas en mangles, pantanos y ciénagas, que presentan elevados valores de salinidad en sus aguas, actuando como una macrófita desalinizadora.

La condición de macrófita acuática-halófito del *Acrostichum aureum*, le permite registrar un crecimiento favorable, en aguas con amplios rangos de salinidad, esta tolerancia salobre, desde el punto de vista biológico influye de manera positiva, en sus mecanismos de desarrollo reproductivo y vegetativo; cabe resaltar que *Acrostichum aureum* es una macrófita acuática del grupo de las *Enraizadas* emergentes, de ecosistemas halófitos, es decir, que prospera fenológicamente en aguas con altas concentraciones salinas y también que es una especie con potencialidad Bio-indicadora de salinidad y acidez en zonas agrícolas y pecuarias con problemas de fertilidad de suelos producto de periodos largos de inundación; es también una especie que tiene gran capacidad para ser utilizada como planta desalinizadora de ecosistemas acuáticos. [41]

La *Acrostichum aureum* se clasifica biológicamente de la siguiente manera: Reino: Plantae, División: Pteridophyta, Clase: Pteridopsida, Orden: Polypodiales, Familia: Pteridaceae, Género: *Acrostichum* y Especie: *A. aureum* [41].

Figura 17

Acrostichum aureum



Nota. En la imagen se puede apreciar la planta propuesta para el tratamiento de la salinidad del agua con la implementación de humedales flotantes. Tomado de: National Parks. (s.f.). “*Acrostichum aureum* L.” [En línea]. <https://www.nparks.gov.sg/florafaunaweb/flora/1/5/1535>[Acceso: octubre 12, 2022].

Con lo anterior y destacando el potencial que tienen los diferentes tipos de plantas para la Fitodesalinización para su aplicación en los diferentes cuerpos de agua superficiales, se dispone a explicar el diseño de los diferentes tipos de humedales flotantes que pueden albergar las plantas mencionadas.

En la introducción de los humedales flotantes/artificiales (fitotecnologías) se mencionó de la clasificación que se les puede atribuir a estos humedales, acá se va a reforzar esta introducción; en esencia estos humedales se pueden clasificar según las macrófitas que se requieran implementar, para las macrófitas fijas al sustrato o sea las enraizadas o macrófitas flotantes libres.

Considerando la forma de vida de estas macrófitas, los humedales artificiales pueden ser clasificados en los siguientes sistemas:

- Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes: principalmente angiospermas sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos. El jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna* sp.) son las especies más utilizadas para este sistema. [36]

- Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas: comprenden algunos helechos, numerosos musgos y carófitas y muchas angiospermas. Se encuentran en toda la zona fótica (a la cual llega la luz solar), aunque las angiospermas vasculares sólo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos. [36]
- Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes: en suelos anegados permanente o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos. [36]

Los humedales basados en macrófitas enraizadas emergentes pueden ser de dos tipos, de acuerdo a la circulación del agua que se emplee: 1) humedales de flujo superficial, si el agua circula en forma superficial por entre los tallos de las macrófitas y 2) humedales de flujo subsuperficial, si el agua circula por debajo de la superficie del estrato del humedal. [36]

4.5 Tipos de humedales

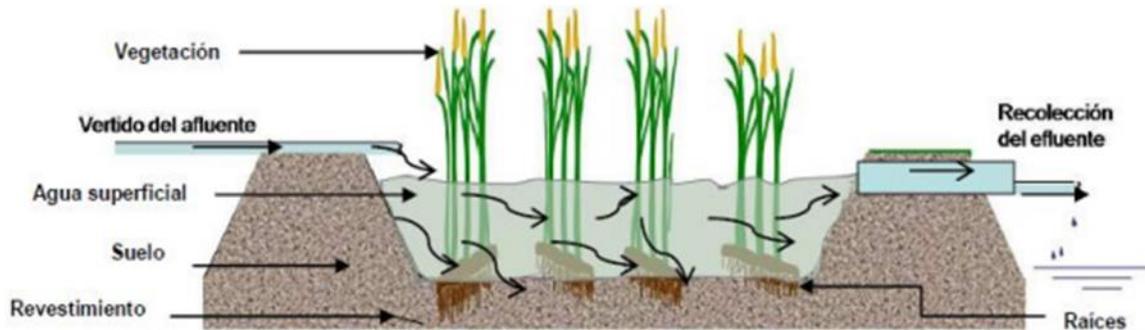
Ahora se va a desarrollar las características de los humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial, basados en macrófitas enraizadas emergentes, se habla de estos dos tipos de humedales ya que son los más desarrollados.

4.5.1 Humedales artificiales de flujo superficial

Los sistemas de flujo superficial (conocidos en inglés como surface flow constructed wetlands o free water surface constructed wetlands) son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, tienen menor profundidad (no más de 0,6 m) y tienen plantas. En términos de paisaje, este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, etcétera. Pueden constituirse, en lugares turísticos y en sitios de estudio de diferentes disciplinas por las complejas interacciones biológicas que se generan y establecen. [36]

Figura 18

Esquema humedales artificiales flujo superficial



Nota. En la imagen se puede apreciar como sería el diseño de los humedales artificiales de flujo superficial. Tomado de: Universidad de Alicante, "Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración", [En Línea]. Disponible: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/57213/1/Analisis_de_los_modelos_de_diseño_de_los_sistemas_na_Rabat_Blazquez_Jorge.pdf [Acceso: oct. 12, 2022].

4.5.2 Humedales de flujo subsuperficial

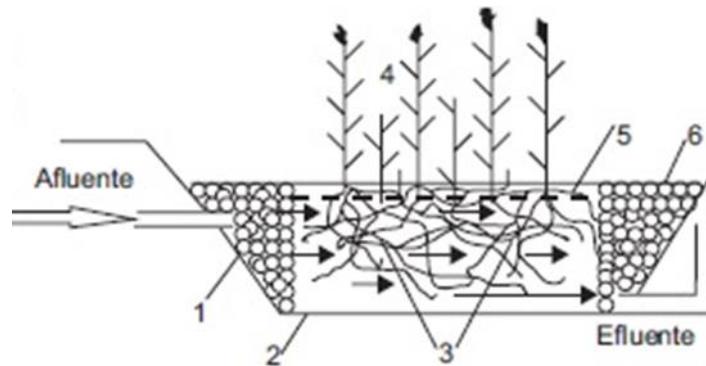
Los sistemas de flujo subsuperficial (conocidos en inglés como subsurface flow constructed wetlands), se caracterizan por que la circulación del agua en los mismos se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos: (a) en función de la forma de aplicación de agua al sistema: humedales de flujo subsuperficial horizontal y (b) humedales de flujo subsuperficial vertical. [36]

Un humedal artificial de flujo subsuperficial está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado. La grava es el medio más utilizado en Estados Unidos y Europa, aunque también se ha utilizado roca triturada, grava, arena y otro tipo de materiales del suelo. El medio se planta normalmente con los mismos tipos de vegetación emergentes presentes en las praderas

inundadas y, por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio. [42]

Figura 19

Esquema humedales de flujo subsuperficial

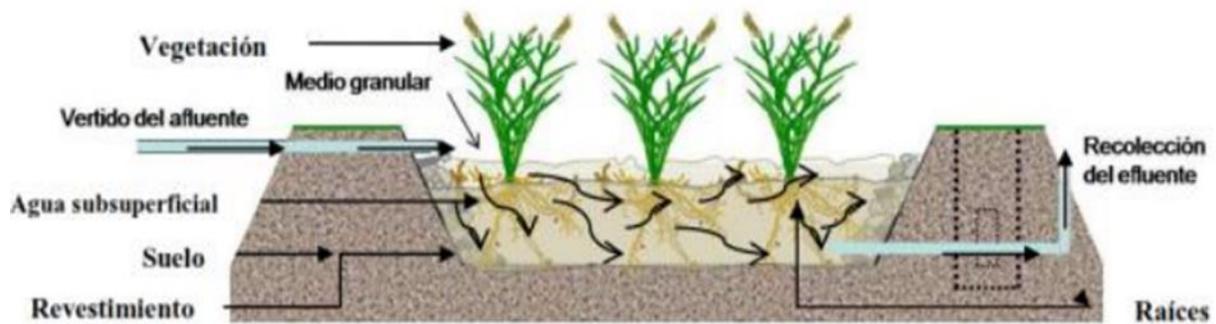


Nota. Esquema general de un humedal artificial de flujo subsuperficial, donde 1. Zona de distribución lleno del material seleccionado, 2. Zona de tratamiento, 3. Medio de filtración con material seleccionado, 4. Vegetación seleccionada, 5. Nivel de agua, 6. Zona de colección. Tomado de: Grupo de Investigación en Biociencias (GIB), Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, "Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia", [En Línea]. Disponible: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000300004 [Acceso: oct. 12, 2022].

4.5.2.a Humedales subsuperficiales de flujo horizontal. Son los sistemas más utilizados en Europa y tienen su origen en la investigación de Seidel (1967) y Kickuth (1977). El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas, el agua circula horizontalmente por el medio granular o sea rizomas y raíces de las macrófitas. Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo (Brix en Kolb, 1998). El agua ingresa en forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5 % a 1 %. El agua a tratar no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño. El sistema de recogida consiste en un tubo de drenaje cribado, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada al inicio. El diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm. La zona de plantación está constituida por grava fina de un solo diámetro, en entre 3 mm a 32 mm. Es fundamental que el agua a tratar que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (5-10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento [36]

Figura 20

Esquema Humedales subsuperficiales de flujo horizontal

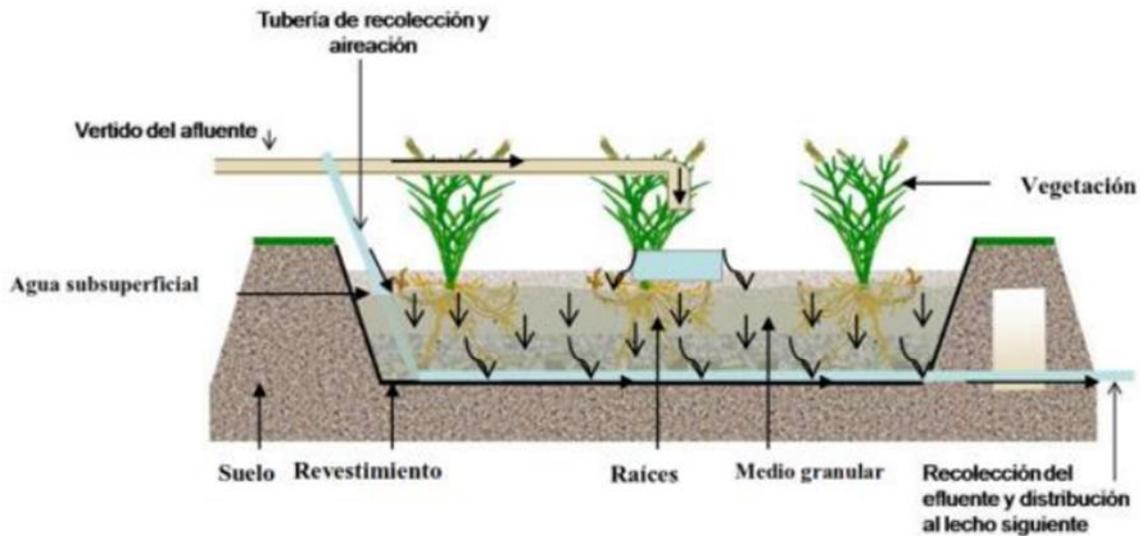


Nota. Esquema de humedal subsuperficial con flujo horizontal con sus partes. Tomado de: Universidad de Alicante, "Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración", [En Línea]. Disponible: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/57213/1/Analisis_de_los_modelos_de_diseño_de_los_sistemas_na_Rabat_Blazquez_Jorge.pdf [Acceso: oct. 12, 2022].

4.5.2.b Humedales subsuperficiales de flujo vertical. Los sistemas verticales con flujo subsuperficial son cargados intermitentemente. De esta forma, las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguidas por períodos de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno. Hay muchas posibilidades de variar la distribución de intervalos, la composición de la cama matriz, etcétera, y los resultados que se han obtenido son promisorios. También conocidos como filtros intermitentes, este tipo de humedales reciben las aguas a tratar de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua. Las aguas infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. La aplicación de agua se efectúa de forma intermitente, para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias. La vegetación emergente se planta también en este medio granular. Adicionalmente, para favorecer las condiciones aerobias del medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías cribadas con salidas al exterior. A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo. [36]

Figura 21

Esquema de Humedales subsuperficiales de flujo vertical



Nota. Esquema de un humedal subsuperficial de flujo vertical, con sus partes. Tomado de: Universidad de Alicante, "Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración", [En Línea]. Disponible: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/57213/1/Analisis_de_los_modelos_de_diseno_de_los_sistemas_na_Rabat_Blazquez_Jorge.pdf [Acceso: oct. 12, 2022].

La hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal construido porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario decisivo en su éxito o fracaso, por los siguientes motivos. 1) Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento. 2) Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, un sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (la pérdida combinada de agua por evaporación del suelo y transpiración de las plantas). 3) La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de raíces y rizomas y bloqueando la exposición al viento y al sol. [36]

Este mismo autor también resalta la importancia del sustrato y la vegetación para el diseño y construcción de los humedales flotantes.

Para la implementación de estos humedales toca tener en cuenta el diseño de los mismos, para diseñar un humedal artificial se debe hacer lo siguiente:

1. Se considera que el flujo a través del medio poroso en flujo pistón y en forma uniforme.
2. Tener en cuenta la ley de Darcy (flujos a través de medios porosos)
3. Se consideran reactores biológicos

Cabe resaltar:

1. Para poder intentar acercarse a un modelo ideal de flujo de pistón es de suma importancia realizar un buen diseño hidráulico y buena metodología para la construcción del humedal.
2. El flujo de agua en el interior del humedal (o sea cuando el agua entra en contacto con el humedal) debe romper las resistencias creadas por la vegetación, capa de sedimentos, raíces y sólidos acumulados en los humedales. [36]

4.6 Diseño de los humedales

Para el diseño completo de los humedales artificiales vistos anteriormente, toca tener en cuenta cuatro aspectos principales para la producción de cada uno, estos aspectos son aplicables para todos exceptuando el humedal subsuperficial de flujo horizontal.

Los 4 aspectos para poder diseñar y producir un humedal flotante son los siguientes:

1. Área necesaria
2. Profundidad del humedal
3. Pendiente (para romper la resistencia creada por la vegetación)
4. Sustrato

4.6.1 Cálculos pertinentes para el diseño de humedales subsuperficiales de flujo vertical

- 1 Área necesaria

Para hacer el cálculo del área del humedal toca tener en cuenta la población equivalente, la población hace referencia al DBO₅ (demanda biológica de oxígeno) más una carga

orgánica biodegradable, el DBO₅ debe ser de 60g de oxígeno/día, esto se expresa de la siguiente manera:

Formula 1 *población equivalente*

$$\text{Población equivalente (hab)} = \frac{\text{DBO}_5 \times \text{Caudal (m}^3/\text{día)}}{60 \text{ gDBO}_5/\text{día} \times \text{hab}}$$

Nota. En esta ecuación se observa como calcular la población equivalente de plantas que van a ocupar el humedal flotante. Tomado de: O. Delgadillo, A. Camacho, L.F. Pérez y Andrade M., Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2010.

También se puede calcular el área en base en la tasa hidráulica de aplicación de acuerdo con Cites y Tchobanoglous:

Formula 2 *Área superficial*

$$\text{Área superficial (As)} = \frac{Q}{\text{THA}}$$

Nota. En esta ecuación se observa como calcular y/o estimar el área superficial que ocuparía un humedal. Tomado de: O. Delgadillo, A. Camacho, L.F. Pérez y Andrade M., Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2010.

Formula 3 *Tasa hidráulica de aplicación*

$$\text{THA} = \frac{\text{THC}}{F}$$

Nota. En esta ecuación se observa como calcular la tasa hidráulica que necesitaría el humedal para su funcionamiento. Tomado de: O. Delgadillo, A. Camacho, L.F. Pérez y Andrade M., Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2010.

Donde:

Q = caudal m³/día

THA = Tasa hidráulica de aplicación (mm/día)

THC = Tasa de carga hidráulica (mm/día)

F = Frecuencia dosificación (dosis/día)

2 Profundidad del humedal

Anteriormente se mencionaron las profundidades que estos humedales pueden tener para este humedal la profundidad suele ser de unos 60 – 80 cm.

3 Pendiente

La pendiente de la superficie del humedal es plana (0%), este debe ser realizado con mucho cuidado para evitar que se formen charcos de agua sobre la superficie. La pendiente del fondo o lecho del humedal varía de 0.5 a 2% pero generalmente se utiliza una pendiente ligera del 1% [36]

4 Sustrato

El sustrato puede estar hecho por diversas capas de materiales ya estandarizados, esto según el tipo de uso que se le quiera dar al humedal, a continuación, se muestra una tabla con los diferentes materiales:

Tabla 8

Características del sustrato para humedales verticales

	Tratamiento primario	Tratamiento secundario
Capa superficial	h>30 cm, grava fina, diámetro efectivo de 2-10 mm	h>30 cm, grava fina, diámetro efectivo de 25-40 mm
Intermedia	h=10-15 cm de grava fina, diámetro efectivo de 5 a 20 mm	h=10-20 cm de grava fina, diámetro efectivo de 3 a 10 mm
Drenaje	h=10 cm de grava fina, diámetro efectivo de 20-40 mm	h=10 cm de grava fina, diámetro efectivo de 20-40 mm

Nota. La tabla muestra las principales características que tienen los humedales en diferentes fases de un tratamiento de aguas residuales. Tomado de: O. Delgadillo, A. Camacho, L.F. Pérez y Andrade M., Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2010. nota: este tipo de humedales se han implementado más en aguas residuales de allí el nombre de las columnas, h = altura del humedal.

Para este tipo de humedales se pueden implementar diferentes materiales como los siguientes:

Tabla 9

Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales verticales

Tipo de material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Conductividad hidráulica, ks (m ³ /m ² /día)
Arena Gruesa	2	100 - 1000
Arena gravosa	8	500 - 5000
Grava fina	16	1000 - 10000
Grava media	32	10000 - 50000
Roca gruesa	128	50000 - 250000

Nota. Estos materiales se han implementado en los humedales para aguas residuales y han tenido buenos resultados. Tomado de: O. Delgadillo, A. Camacho, L.F. Pérez y Andrade M., Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2010.

Estos humedales tienen una condición, la condición radica en mantener una simetría rectangular o cuadrada y que la superficie del humedal tenga una pendiente de 0%.

Tabla 10

Factores de diseño de humedal subsuperficial de flujo vertical

Factor	Unidad	Intervalo	Valor usual
Medio filtrante			
Arena fina lavada	mm	0.25 - 0.75	0.35
Grava fina	mm	2.00 - 8.00	2 - 5 mm
Profundidad	cm	45 - 90	60
Coefficiente uniformidad	%	3 - 6	< 4
Porcentaje finos	%	2 - 5	< 4

Drenaje			
Clase (tubería perforada)			
Tamaño	in	3 - 4	4
Pendiente	%	0.1 - 1	0.5
Grava de drenaje	mm	20 - 40	40
Distribución agua			
Diámetro tubería	in	1 - 2	1.5
Distancia entre tuberías	mm	0.5 - 1.2	0.6
Orificio distribución	mm	3 - 8	6
Distancia entre orificios	mm	0.5 - 1.2	0.6
Parámetros diseño			
Carga hidráulica	l/m ² *día	40 - 60	50 <
Carga orgánica	kg DBO/m ² *día	0.0025 - 0.01	0.005
Dosificación			
Frecuencia	Veces/día	4 - 24	12
Volumen/orificio	l/orif*dosis	0.6 - 1.1	0.9
Tiempo aplicación	minutos	2 - 15	5

Nota. Factores a tener en cuenta para el diseño de humedales. Tomado de: O. Delgadillo, A. Camacho, L.F. Pérez y Andrade M., Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2010.

4.6.2 Cálculos pertinentes para el diseño de humedales subsuperficiales de flujo horizontal

Para el diseño de este humedal se requiere un aspecto adicional, entonces los aspectos a tener en cuenta serían 5 y son los siguientes:

Área necesaria

El cálculo del área necesaria o superficial se realiza en función al contaminante que se desea disminuir, eliminar o remover. Y se implementa la siguiente ecuación:

Formula 4 Área superficial para humedales horizontales

$$A_s = \frac{Q \times \ln\left(\frac{C_0}{C}\right)}{K_T \times h \times \eta}$$

Nota. En esta ecuación se observa como calcular el área superficial del humedal para su funcionamiento. Tomado de: O. Delgadillo, A. Camacho, L.F. Pérez y Andrade M., Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2010

Donde:

Q = Caudal de diseño del humedal (m³/día)

C = Concentración efluente (mg/l)

C₀ = Concentración afluente (mg/l)

K_T = Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura

h = Profundidad humedal (m)

η = Porosidad del medio granular (% en fracción)

La constante de reacción se calcula de la siguiente manera:

Formula 5 *Constante de reacción*

$$K_T = 1,104 \times 1,06^{T_2-20}$$

Nota. En esta ecuación se observa la expresión de la constante de reacción, esta constante es dependiente de la temperatura del cuerpo de agua en interés. Tomado de: O. Delgadillo, A. Camacho, L.F. Pérez y Andrade M., Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2010.

Donde: T_2 es la temperatura del agua en °C

Profundidad humedal y Pendiente

La profundidad del humedal ronda entre los 0,3 a 1 m (valor usual 0,6m), usualmente con una pendiente de 0,1 a 1%, siendo el valor usual de 0,5%.

Sustrato

<< Es el medio donde crecen las plantas, los microorganismos y se realizan los principales procesos de depuración. Para el diseño se recomienda utilizar grava con menos de 30 mm (3/4") de diámetro. Si se utiliza grava con diámetros muy grandes se origina un incremento en la velocidad del paso del agua, resultando en un flujo turbulento y que no se cumpla la ley de Darcy para el diseño. Caso contrario ocurre con grava de tamaño demasiado pequeño, esta reduce la velocidad del paso de agua originando zonas con presencia de agua en la superficie y flujos preferenciales, pero tienen la

ventaja de proporcionar una mayor área superficial para la actividad microbiana y la adsorción. >> [36]

Tabla 11

Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales

Tipo de material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Conductividad hidráulica, ks (m ³ /m ² /día)	Porosidad, n%
Arena gruesa	2	100 - 1000	28 - 32
Arena gravosa	8	500 - 5000	30 - 35
Grava fina	16	1000 - 10000	35 - 38
Grava media	32	10000 - 50000	36 - 40
Roca gruesa	128	50000 - 250000	38 - 45

Nota. Estos materiales son los que más se han implementado en el diseño de estos tipos de humedales y han tenido buenos resultados en su implementación. Tomado de: O. Delgadillo, A. Camacho, L.F. Pérez y Andrade M., Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2010.

Relación (largo – ancho)

Para esta parte es necesario considerar la ley de Darcy, esto para los flujos en un medio poroso.

Formula 6 Principio de Darcy para flujo en medios porosos

$$A_c = \frac{Q}{(k_s \times S)}$$

Nota. En esta ecuación se observa como calcular el área vertical del humedal para su funcionamiento. Tomado de: O. Delgadillo et al, "Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales," .

Donde:

Ac= área vertical en m²

Q= caudal medio en m³/s

Ks= Conductividad hidráulica (m/s)

S = pendiente (m/m)

Para calcular el ancho del humedal se debe tener en cuenta el área vertical y el nivel del agua a tratar; y para calcular el largo del humedal se debe tener en cuenta el ancho y el área superficial del humedal (formula 6 y 7 respectivamente), a continuación, se muestran las fórmulas pertinentes para estos cálculos:

Formula 7 Cálculo del ancho del humedal.

$$W = \frac{A_c}{h}$$

Nota. En esta ecuación se observa como calcular el ancho del humedal para su funcionamiento. Tomado de: O. Delgadillo, A. Camacho, L.F. Pérez y Andrade M., Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2010.

Formula 8 Cálculo del largo humedal.

$$L = \frac{A_s}{W}$$

Nota. En esta ecuación se observa como calcular la longitud del humedal para su funcionamiento. Tomado de: O. Delgadillo, A. Camacho, L.F. Pérez y Andrade M., Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2010.

Dónde: A_s = Área superficial del humedal (m^2) y W = ancho del humedal (m).

Una vez habiendo calculado la relación largo-ancho (L/A), se recomienda que mientras mayor es la relación largo-ancho se tiene mejor depuración de las aguas, pero se tiene problemas de cortocircuitos, flujos preferenciales, presencia de agua sobre el lecho de grava y otros. Por ello se recomienda relación larga – ancho de: 2 a 1, 3 a 1 y 4 a 1. [36]

Tabla 12*Parámetros de diseño de humedal subsuperficial de flujo horizontal*

Parámetro	Unidad	Intervalo	Valor usual
Tiempo de retención hidráulico	días	4 -15	7
Profundidad agua	m	0.1 - 0.8	0.6
Área	m ²	2.5 - 5	
Carga orgánica	gDBO ₅ *día /m ²	3.7 -5	< 11
Carga orgánica	kg DBO ₅ *día	< 70	-
Carga hidráulica	(m ³ /m ²)*día	0.1 - 0.2	-
Características constructivas			
Grava ingreso o salida	mm	50 - 100	50
Grava media	mm	3 - 6	19
		5 - 10	
		6 - 12	
Coeficiente de uniformidad		3 - 5	< 5
Profundidad media	m	0.7 - 1.5	0.7
Pendiente	%	0 - 1	0.5
Relación largo - ancho	-	2:1 - 7:1	3:1
Drenaje			
Tubería perforada - tamaño	in	3 - 4	4
Distribución de agua			
Tubería perforada - canal	in	2 - 4	3

Nota. Se muestran las características y parámetros básicos para el diseño de los humedales subsuperficiales. O. Delgadillo, A. Camacho, L.F. Pérez y Andrade M., Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2010.

5. CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SALINIDAD PRESENTES EN EL AGUA DEL LAGO SOCHAGOTA

En el presente capítulo se va a caracterizar fisio-química mente el agua del lago Sochagota de acuerdo a estudios que le realizaron en años posteriores y la caracterización que Corpoboyacá le hizo en el año 2021.

5.1 Resoluciones año 2019

Antes de empezar con la caracterización del lago se menciona primero que la entidad la corporación autónoma regional de Boyacá (Corpoboyacá) en el año 2019 emite una resolución (resolución – 3666 – 2019 – objetivos – calidad) de acuerdo a la ley 99 de 1993 y el decreto 1076 de 2015, en la cual estipulan cierta tolerancia de vertidos al lago, para poder alcanzar unos objetivos de calidad para el agua.

Esta resolución resalta lo siguiente:

1. << Ningún usuario del recurso hídrico podrá generar vertimientos directos al lago Sochagota
2. El encabezamiento y la parte resolutive de la presente Resolución deberán ser publicados en el boletín y en la página WEB de la Corporación (Corpoboyacá).
3. El presente acto administrativo rige a partir de su publicación y deroga las disposiciones que le sean contrarias.
4. Contra el presente acto administrativo no procede recurso alguno de conformidad con lo previsto en el artículo 75 del Código de Procedimiento Administrativo y de lo Contencioso Administrativo.
5. Establecer para el cuerpo de agua del Lago Sochagota, los objetivos de calidad, definiendo los usos genéricos para el recurso hídrico, como se presenta a continuación: >> [56]

Tabla 13*Objetivos propuestos para el cuerpo de agua del Lago Sochagota*

Ubicación	Coordenadas	Usos actuales	Objetivo de calidad	Parámetros	Largo Plazo (15 años)
Desde el punto de entrada al lago (P1) hasta el punto (P8)	Punto 1	Uso recreativo contacto secundario	Uso recreativo contacto primario	pH	5 - 9
				OD (mg/l)	5
				DBO ₅ (mg/l)	5
				Nitratos (mg/l)	5
				Coliformes fecales (NMP/100ml)	200
				Coliformes totales (NMP/100ml)	1000

Nota. La tabla muestra los parámetros que se quieren obtener en el lago Sochagota en un periodo de 15 años. Tomado de: PROAGUA, “Resolución 3666-06 NOV 2019, Por medio de la cual se establecen los objetivos de Calidad de agua en el Lago Sochagota”, Boyacá, Colombia, 06, nov, 2019. [PDF], Disponible: <https://www.corpoboyaca.gov.co/proyectos/manejo-integral-del-recurso-hidrico/calidad-hidrica/>. Acceso: oct,11,2022

Cabe resaltar que, para realizar el diagnóstico de la calidad del agua, de las características físicas y usos actuales del lago Sochagota, se implementaron estaciones de monitoreo distribuidas en el espejo de agua del lago, de la siguiente manera:

Tabla 14*Estaciones de monitoreo del Lago Sochagota*

Punto	Estación	Coordenadas Geográficas		Altura msnm
		Latitud	Longitud	
1	Entrega del rio salitre al lago Sochagota	1127990,6	1105889,7	2010
2	Playa del lago	1128858,6	1106417	2010
3	Muelle diagonal al restaurante la fragata	1129535,8	1105617	2010

4	Lago - sur oeste	1128817,7	1105930,6	2010
5	Lago - centro	1129145	1106103,4	2010
6	Lago - nor este	1129272,2	1106594,2	2010
7	Lago - alrededor compuerta	1129599,5	1106644,2	2010
8	lago - norte	1129617,6	1106176,1	2010

Nota. La tabla nos indica la ubicación exacta de las estaciones donde se hizo el monitoreo al lago para la obtención de los datos. Tomado de: PROAGUA, “Resolución 3666-06 NOV 2019, Por medio de la cual se establecen los objetivos de Calidad de agua en el Lago Sochagota”, Boyacá, Colombia, 06, nov, 2019. [PDF], Disponible: <https://www.corpoboyaca.gov.co/proyectos/manejo-integral-del-recurso-hidrico/calidad-hidrica/>. Acceso: oct,11,2022

Lo mismo pasa con el afluente natural del lago (Quebrada Honda – río salitre), la entidad ambiental (Corpoboyacá) estipulo unos objetivos para las descargas que llegan o hacen directamente sobre la quebrada Honda – rio Salitre, los objetivos estipulados para el afluente del lago son los siguientes:

1. << Los usuarios que generen vertimientos en los tramos previamente descritos deberán cumplir con los Objetivos de Calidad establecidos en la presente Resolución, sin perjuicio del cumplimiento de los criterios de calidad previstos en la Resolución 3382 del 01 de octubre de 2015 expedida por CORPOBOYACÁ según la destinación genérica del recurso hídrico.
2. Los usuarios que generen vertimientos en los afluentes de la corriente principal de la quebrada Honda, deberán cumplir los Objetivos de Calidad establecidos en el presente artículo, aplicando los criterios según el tramo de confluencia.
3. Los usuarios que descargan sus aguas residuales sobre la corriente principal y los afluentes de los tramos de la quebrada Honda descritos en el artículo primero del presente acto administrativo, deben adoptar los objetivos de calidad establecidos dentro del presente Acto Administrativo, y en consecuencia quedan con la obligación de revisar los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimiento (PSMV) y permisos de vertimiento aprobados por la Corporación y en el evento de ser necesario solicitar las modificaciones del caso para dar cabal cumplimiento a los mismos

4. Establecer para la corriente principal de la quebrada Honda, los objetivos de calidad definiendo los usos genéricos para el recurso hídrico, como se presenta a continuación:>> [43]

Tabla 15*Objetivos propuestos para la quebrada Honda – río Salitre*

Ubicación	Usos actuales	Objetivo calidad	Parámetros	Largo plazo (15 años)
Tramo 1	Uso agrícola y pecuario	Uso para la preservación de flora y fauna	pH	5.5 - 9
			OD (mg/l)	5
			DBO5 (mg/l)	<5
			Fosfatos (mg/l P-PO4/l)	0.025
			Nitratos (mg/l)	5
			SST (mg/l)	< 50
			Turbiedad (UNT)	< 100
			Hierro (mg/l)	0.1 Cl
			Coliformes fecales (NMP/100ml)	< 1000
			Coliformes totales (NMP/100ml)	< 1000
Tramo 2	Uso agrícola, pecuario y de consumo humano	Consumo humano y domestico con desinfección	pH	6.5 - 8.5
			OD (mg/l)	4
			DBO5 (mg/l)	4
			Fosfatos (mg/l P-PO4/l)	10
			Nitratos (mg/l)	250
			SST (mg/l)	20
			Turbiedad (UNT)	10
			Hierro (mg/l)	400

			Coliformes totales (NMP/100ml)	1000
			pH	5 - 9
			OD (mg/l)	5
			DBO5 (mg/l)	5
			Nitratos (mg/l)	5
			Coliformes fecales (NMP/100ml)	200
			Coliformes totales (NMP/100ml)	1000
Tramo 3	Uso pecuario y agrícola	Uso recreativo contacto primario		

Nota. En la siguiente tabla se especifican las utilidades que le da la comunidad a los diferentes tramos de la quebrada hondarío salitre. Tomado de: PROAGUA, “Resolución 4458-23 DIC 2019, Por medio de la cual se establecen los objetivos de Calidad de agua en la subcuenca de la Quebrada Honda”, Boyacá, Colombia, 23, dic, 2019. [PDF], Disponible: <https://www.corpoboyaca.gov.co/proyectos/manejo-integral-del-recurso-hidrico/calidad-hidrica/>. Acceso: oct,11,2022.

Como bien se mencionó, estos objetivos que se plantearon en las resoluciones son a un periodo de largo plazo (15 años), esto ya que se espera que sin importar las condiciones climáticas que se presenten en el municipio de Paipa el lago Sochagota siempre mantenga una buena condición de su agua.

Cabe aclarar que también se fijaron unos objetivos para el río Chicamocha, esto se menciona ya que como se sabe el Chicamocha es un río fundamental para el departamento de Boyacá, más específicamente para el municipio de Paipa y municipios aledaños, y como se sabe el lago Sochagota tiene mucha influencia sobre el río Chicamocha.

Los objetivos establecidos por la entidad Corpoboyacá para el río Chicamocha se dividen por tramos del río, dichos tramos los especifica la misma entidad con descripciones para cada uno y los objetivos planteados a largo plazo, esta información se puede obtener en la página de Corpoboyacá.

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores el lago Sochagota presenta un problema de salinización en el agua gracias a dos fuentes, la primera fuente es su afluente natural (Quebrada Honda - río Salitre) y los afloramientos de aguas termominerales y termales que se originan tanto en las intermediaciones del lago Sochagota como en su afluente, esto pasa por la falla geológica que tiene el departamento de Boyacá, teniendo esto presente se dispone a hablar de los parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua; y en segunda lugar se va a caracterizar tanto el río Salitre como el lago Sochagota, esta caracterización se va a hacer de dos formas, la primera es de forma bibliográfica la cual va a cubrir una gran variedad de parámetros y la segunda es de forma experimental en la cual se va a mostrar la salida a campo que se realizó para posteriormente tomar unas muestras del lago y medir, conductividad y pH.

La implementación de nuevas metodologías que involucren más de dos parámetros para la valoración de la calidad del agua toma cada vez más importancia, los índices de calidad del agua engloban varios parámetros en su mayoría fisicoquímicos y en algunos casos microbiológicos que permiten reducir la información a una expresión sencilla, conocida como: índices de calidad del agua (ICA) e índices de contaminación del agua

(ICO). En la actualidad los indicadores desarrollados involucran desde un parámetro hasta más de 30, pudiendo agruparse en diferentes categorías como: contaminación por materia orgánica e inorgánica, eutrofización, aspectos de salud, sustancias suspendidas y disueltas, nivel de oxígeno, características físico-químicas y sustancias disueltas. En este capítulo se presenta una revisión de literatura de diferentes ICA e ICO utilizados en Colombia y diferentes países de América y Europa. [44]

Los indicadores ICA e ICO básicamente son una expresión de un número de parámetros que permiten valorar el recurso hídrico para un determinado uso, estos son presentados en forma de número, rango, descripción verbal, símbolo o color. Para Ball y Church (1980), el cálculo de los índices tanto ICA e ICO se basan en tres pasos consecutivos, que son: 1. Selección de parámetros o variables: se puede considerar entre dos o más parámetros. La elección depende en gran medida del criterio de un experto, como también de la información existente, los criterios de tiempo, localización y su importancia como estándar de calidad. Las variables OD, temperatura, coliformes, pH, SS (sólidos suspendidos), turbidez, transparencia, nitratos, fosfatos, grasas, color y olor, mediante las cuales se puede evaluar de la fuente las características organolépticas, efecto sobre la vida acuática y la salud humana. [44]

De lo anteriormente mencionado se relaciona el parámetro de sólidos suspendidos con la problemática de este trabajo el cual es la salinización ya que se puede estimar la conductividad del agua estudiar y/o tratar con los valores de TDS (sólidos disueltos totales) y viceversa, este parámetro va muy de la mano con los sólidos suspendidos, se menciona esto porque este parámetro es una forma de medir las diferentes conductividades que se presenten en el agua a tratar.

Antes de empezar con la caracterización físico-química del lago Sochagota y del río Honda (mediante información obtenida de la bibliografía consultada), se van a mencionar algunos de los factores que llegan a afectar la conductividad:

1. El agua dulce que se pierde por evaporación aumenta la conductividad y la salinidad de la masa de agua.
2. La temperatura es directamente proporcional a la conductividad

3. La tierra y las rocas descargan iones en las aguas que fluyen a través y por encima de ellas, la geología de una cierta zona determina la cantidad y el tipo de iones.

5.2 Caracterización

Antes de empezar con la caracterización encontrada en la bibliografía se mencionan los parámetros máximos aceptables permisibles para el agua de riego, a continuación, se muestra una tabla con los parámetros relacionados con la salinización en cuerpos de agua superficiales.

Tabla 16

Parámetros para el agua de riego

Parámetros	Símbolo	Unidad	Valor máximo
Salinidad			
Conductividad Eléctrica	CE	μS/cm	3000
Acidez o basicidad	pH	pH	8.5
Total sólidos en solución	TSD	mg/L	2000
Cationes y aniones			
Calcio	Ca ²⁺	meq/L	20
Magnesio	Mg ²⁺	meq/L	5
Sodio	Na ²⁺	meq/L	40
Carbonatos	CO ₃ ²⁻	meq/L	0,1
Bicarbonatos	HCO ₃ ³⁻	meq/L	10
Cloro	Cl ⁻	meq/L	30
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	meq/L	20
Nutrientes			
Nitrato - nitrógeno	NO ₃ - N	mg/L	10
Amonio - nitrógeno	NO ₄ - N	mg/L	5
Fosfato - fósforo	PO ₄ - P	mg/L	2
Potasio	K ⁺	mg/L	2

Nota. La tabla muestra los valores máximos aceptables de parámetros fisicoquímicos para el agua de riego. Tomada de: Interpretación de un análisis de agua para riego. [En Línea]. Disponible: <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/interpretacion-analisis-agua-riego>. [Acceso: oct, 11, 2022].

Se trae a colación esta tabla ya que parámetros estándar para ríos y lagos no hay establecidos, esto porque dependiendo de las condiciones en las cuales se encuentren

estos cuerpos de agua y la naturaleza de los mismos sus parámetros cambiaran, pero como se mencionó el lago Sochagota tiene una gran influencia sobre el río Chicamocha el cual lo utilizan como fuente de riego para cultivos de la región, esta tabla nos ayudara a comparar parámetros del agua de riego vs los parámetros encontrados en la bibliografía y los obtenidos en la salida a campo.

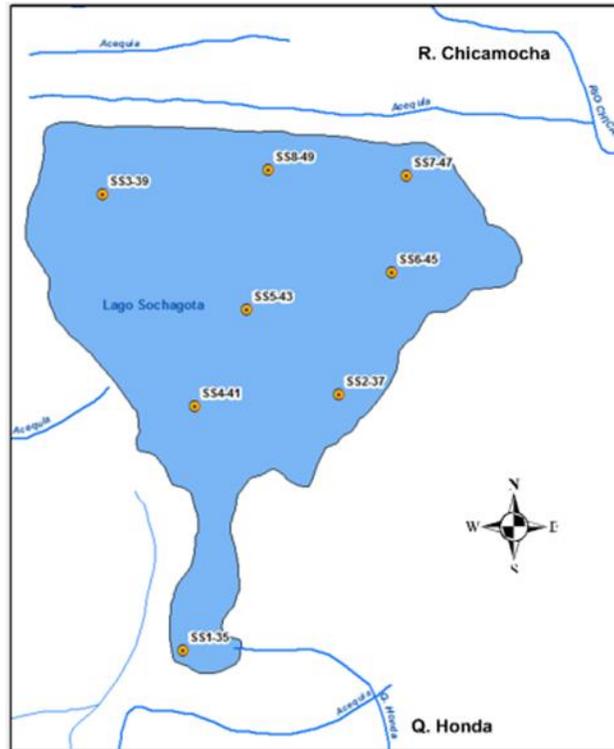
La caracterización inicialmente se empezó con búsquedas bibliográficas, de estas búsquedas se encontraron que, en los años 2015,2017, 2019 y 2021 se habían realizados estudios en el lago Sochagota, teniendo como tal una recopilación de información en diferentes años sobre la problemática del lago.

5.2.1 Año 2015

Para el año 2015 la entidad Corpoboyacá realizó una caracterización en diferentes puntos del lago y estos fueron sus resultados:

Figura 22

Localización de las estaciones de evaluación de calidad en el Lago Sochagota



Nota. La imagen ilustra los puntos en los cuales se tomaron las muestras para su análisis físico-químico en el año correspondiente. Tomado de: O. Usaquén., Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas, tesis doctoral. Dpto. De ciencias y técnicas del agua y del medio ambiente, Universidad de Cantabria, Santander. Colombia, 2017.

Tabla 17*Calidad físico-química y bacteriológica del Lago Sochagota en el año 2015*

Parámetro	M	N	Media	Mínimo	Máximo	Desv.	C.V.
Acidez (mg/L CaCO ₃)	2	16	1.35	1.00	9.60	1.57	116.59
Alcalinidad Total (mg/L CaCO ₃)	2	16	440.56	106.00	879.00	154.26	35.01
Carbono Orgánico Total (mg/L)	2	16	31.84	1.50	299.00	51.18	160.75
Clorofila a (µg/L)	2	16	107.22	21.00	187.00	58.77	54.81
Cloruros (mg/L)	2	16	1183.4	535.00	3060.00	495.08	41.83
Coliformes fecales (NMP/100mL)	2	16	439.62	27.00	1600.00	496.24	112.88
Coliformes totales (NMP/100mL)	2	16	73944.7	6120.00	251000.00	70739.4	95.67
Color real (UPC)	2	16	35.67	18.00	88.00	12.16	34.10
Conductividad (dS/m)	2	16	11.0	5.56	24.2	3.68	33.48
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	2	16	105.50	2.50	1120.00	195.04	184.88
Disco de Secchi (m)	2	16	0.17	0.06	0.30	0.07	44.36
DQO (mg/L)	2	16	189.06	10.00	1710.00	291.18	154.01
Dureza Cálctica (mg/L CaCO ₃)	2	16	101.65	62.40	124.00	13.19	12.97
Dureza Magnésica (mg/L CaCO ₃)	2	16	38.99	12.00	73.00	17.38	44.58
Dureza Total (mg/L CaCO ₃)	2	16	140.65	76.70	175.00	26.52	18.85
Fosforo soluble total (mg P/L)	2	16	0.22	0.06	2.30	0.43	190.86
Fosforo total (mg P/L)	2	16	0.27	0.06	3.00	0.54	201.04
Grasas y/o Aceites (mg/L)	2	16	0.34	0.34	0.30	0.00	0.00
Hierro total (mg/L)	2	16	11.59	0.04	327.00	57.60	497.00
Nitratos (mg N-NO ₃ - /L)	2	16	0.28	0.01	1.30	0.33	119.21
Nitrógeno amoniacal (mg N-NH ₃ - /L)	2	16	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00

Nitrógeno total (mg N/L)	2	16	1.50	1.50	1.50	0.00	0.00
Nitritos (mg N-NO ₂ /L)	2	16	0.02	0.00	0.30	0.05	264.97
Oxígeno disuelto (mg/L)	2	16	5.19	1.80	7.80	1.15	22.19
pH	2	16	8.89	5.56	9.70	0.78	8.77
Silicio (mg/L)	2	16	3.36	1.50	27.90	4.70	139.93
Sodio (mg/L)	2	16	2395.41	598.00	7630.00	1160.4	48.44
Sólidos disueltos (mg/L)	2	16	6304.88	3129.00	15020.00	2381.4	37.77
Sólidos suspendidos (mg/L)	2	16	1056.37	26.00	31900.00	5628.4	532.81
Sólidos totales (mg/L)	2	16	7361.25	3220.00	36100.00	5755.7	78.19
Sulfatos (mg/L)	2	16	3486.88	1830.00	7810.00	955.25	27.40
Temperatura ambiente (°C)	2	16	17.59	10.00	25.00	4.10	23.32
Temperatura del agua (°C)	2	16	19.28	14.00	24.00	1.95	10.14
Tensoactivos (mg/L LAS)	2	16	0.07	0.08	0.10	0.00	0.00
Turbiedad (NTU)	2	16	59.85	17.90	1000.00	172.71	288.55

Nota. M: número de campañas; N: número de puntos de evaluación (en superficie y a la profundidad del disco de Secchi) en 8 estaciones de calidad; Desv.: desviación estándar; C.V: coeficiente de variación. Tomado de: O. Usaquén., Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas, tesis doctoral. Dpto. De ciencias y técnicas del agua y del medio ambiente, Universidad de Cantabria, Santander. Colombia, 2017.

En este año (2015) y según los resultados de los análisis realizados el lago Sochagota se declaró en crisis, esto debido a que las altas concentraciones de dureza y sales disueltas en el lago y en la quebrada Honda – río salitre [dureza: 81 – 178 mg/l CaCO₃; alcalinidad: 167 – 909 mg/l CaCO₃; conductividad: 4.93 – 23.2 dS/m] sugieren tres problemas fundamentales (déficit hídrico, eutrofización y salinización). [32]

5.2.2 Año 2017

En el año 2017 implementaron metodologías ambientales partiendo de la caracterización realizada por Corpoboyacá en el año 2015, dichas metodologías son tres, las cuales se denominan como “potencial”, este “potencial” se enfoca en tres aspectos fundamentales, los aspectos son problemas anteriormente mencionados (eutrofización, salinización y déficit hídrico).

El potencial de salinización diario (Ps) es el indicador que evalúa la posibilidad de que un dominio (global/sistema, local/celda) supere unas salinidades de referencia. Una salinidad de referencia se define como el máximo contenido de sales disueltas que admite la actividad crítica bajo diferentes condiciones o límites de aceptabilidad. El potencial de salinización evalúa la susceptibilidad diaria de un dominio a salinizarse. Este descriptor se define como el porcentaje en el cual varía la salinidad del dominio en cada paso de tiempo (ΔT_c), con respecto a su condición natural de salinidad (S_0). [32]

Para su cálculo se introduce en el dominio la concentración de iones disueltos (S_0) correspondiente con la salinidad mínima en el ciclo de gestión o geogénica. En cada paso de tiempo se calcula la concentración de iones en solución (conductividad, salinidad o su equivalente) transcurridas 24h. Si no se dispone de información registrada en el sistema, el uso de modelos o herramientas de simulación debe permitir obtener la salinidad en el dominio. Para ello, se considera, como mínimo, el efecto de las condiciones climáticas (precipitación, evaporación, nivel de los sistemas adyacentes, dirección e intensidad del viento), hidrológicas (caudales de entrada y salida) y de operación (apertura/cierre de compuertas). El potencial de salinización de un dominio se calcula diariamente durante el ciclo de gestión mediante la siguiente expresión:

$$P_s = \frac{S_t - S_0}{S_0} \times 100$$

Nota. Ecuación del potencia de salinización. Tomado de: O. Usaquén., Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas, tesis doctoral. Dpto. De ciencias y técnicas del agua y del medio ambiente, Universidad de Cantabria, Santander. Colombia, 2017.

Donde:

- Ps: Potencial de salinización diario (%).
- So: Salinidad mínima en el ciclo de gestión o geogénica (dS/m o su equivalente).
- St: Salinidad del dominio en el tiempo t (cada ΔT_c) (dS/m o su equivalente).

Para el potencial de salinización se debe tener en cuenta la evolución temporal y la variación espacial que se llega a presentar en los cuerpos de agua a estudiar, estas dos características para poder hallar dicho potencial se apoyan en los siguientes parámetros y/o factores:

1. El área en tiempo inicial y final
2. Profundidad en la columna de agua inicial y final
3. Volumen del dominio inicial y final
4. Concentración de iones en solución mínima en función de la naturaleza del sistema
5. Masa de iones en la solución inicial y final
6. Medición del tiempo en el periodo de gestión

Teniendo la información necesaria se calcula el potencial de salinización, se valora la susceptibilidad a la salinización. Los potenciales de salinización en cada periodo de tiempo, en la evolución temporal, así como cada celda, en la variación espacial, se clasifican en función de cuatro categorías de susceptibilidad frente al incremento de sales disueltas: muy alta, alta, moderada y baja, considerando umbrales de referencia. Metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas máximos de salinización (PSmax1, PSmax2, PSmax3) por encima de los cuales el cultivo se vería afectado en su rendimiento. [32]

Tabla 18*Susceptibilidad vs Umbrales*

Susceptibilidad a la salinización	Umbrales
Muy alta	$P_{SI} \geq P_{Smax1}$
Alta	$P_{Smax2} \leq P_{SI} < P_{Smax1}$
Moderada	$P_{Smax3} \leq P_{SI} < P_{Smax2}$
Baja	$P_{SI} < P_{Smax3}$

Nota. Psi: Potencial de salinización global diario o potencial de salinización medio durante el ciclo de gestión en una celda. PSmax1, PSmax2, PSmax3: Umbrales para la valoración de la susceptibilidad frente a la salinización. Tomado de: O. Usaquén., Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas, tesis doctoral. Dpto. De ciencias y técnicas del agua y del medio ambiente, Universidad de Cantabria, Santander. Colombia, 2017.

Los potenciales de salinización máximos (PSmax1, PSmax2, PSmax3) se calculan a partir de la salinidad del agua de riego para tres valores de referencia (SR1, SR2, SR3). Los potenciales de salinización máximos se calculan para la condición más crítica, esto es el cultivo menos tolerante a la salinidad de los existentes o potenciales en el sistema. Las siguientes expresiones permiten calcular estos potenciales de salinización límite:

Formula 10 Fórmulas de potenciales de salinización máximos.

$$P_{smax1} = \frac{S_{R1} - S_0}{S_0} \times 100$$

$$P_{smax2} = \frac{S_{R2} - S_0}{S_0} \times 100$$

$$P_{smax3} = \frac{S_{R3} - S_0}{S_0} \times 100$$

Nota. Ecuaciones relacionadas con el potencial de salinización. Tomado de: O. Usaquén., Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas, tesis doctoral. Dpto. De ciencias y técnicas del agua y del medio ambiente, Universidad de Cantabria, Santander. Colombia, 2017.

Donde:

- SR1: Conductividad eléctrica del agua de riego a 25°C para una reducción del rendimiento en el cultivo del 50% (dS/m o su equivalente).
- SR2: Conductividad eléctrica del agua de riego a 25°C para una reducción del rendimiento en el cultivo del 10% (dS/m o su equivalente).
- SR3: Conductividad eléctrica del agua de riego a 25°C sin restricción en la mayoría de los cultivos (dS/m), se considera un valor igual o inferior a 0.75 para fracciones de lixiviación inferiores a 0.2. [32]

En el estudio se concluyó que el potencial de salinización refleja adecuadamente la susceptibilidad del humedal al cambio en la concentración de iones en solución (al igual como se mencionó en el capítulo 2, el lago en los periodos de baja precipitaciones tiende a salinizarse en su totalidad) y, su categorización facilita la evaluación e identificación de pérdidas potenciales de productividad en los cultivos que utilizan el agua con fines de riego, en otras palabras, que el lago afecta directamente el estado del agua del río Chicamocha el cual lo implementan para riego de cultivos.

5.2.3 Año 2019

En este año se hace énfasis en la conductividad eléctrica (CE), esto ya que la (CE) va de la mano con la salinización en los cuerpos de agua dulce tal como lo son los lagos, en el estudio publicado en la revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina implementaron el software Iber 2.5 para poder comparar los datos de conductividad eléctrica en las dos condiciones que presenta el lago (precipitaciones altas y bajas).

La conductividad eléctrica del agua (CE) se usa generalmente como indicador de salinidad. La presencia de sales disueltas en el agua está relacionada con el valor de su CE, ya que aportan cargas eléctricas interactuando como iones en movimiento, cabe resaltar que la CE es una medida indirecta de la concentración de sales de una solución, basada en el hecho de que, si bien el agua pura es mala conductora de la electricidad a las sales disueltas les sucede lo contrario.

Debido a que la corriente eléctrica se transporta por medio de iones en solución, la conductividad aumenta cuando aumenta la concentración de iones. De tal manera, que la conductividad va en aumento cuando el agua disuelve compuestos iónicos. Los rangos

de la conductividad dependen del tipo de agua que se maneje: Agua Ultra Pura = 5.5×10^{-6} S/m, agua potable = 0.005 – 0.05 S/m y agua del mar ≥ 5 S/m [34]

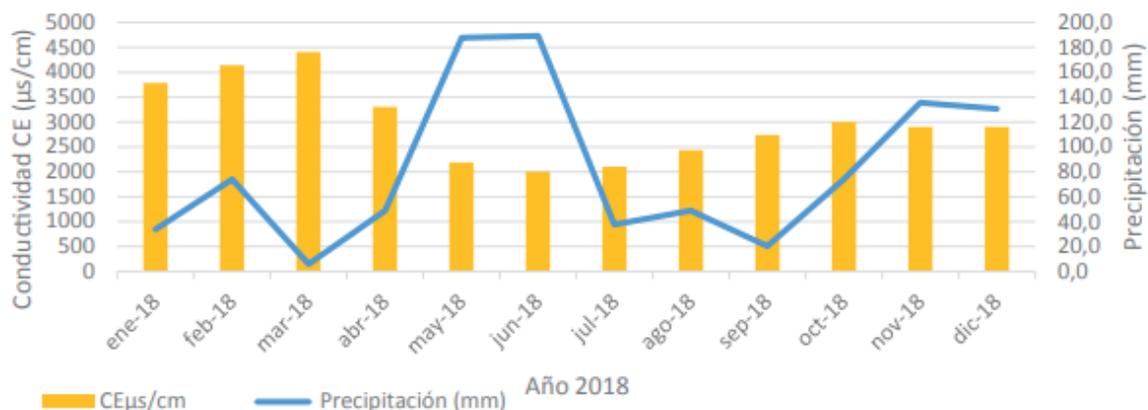
El estudio recopiló registros del lago desde 1987 hasta 2019, en dichos registros y datos se evidenciaron dos temporadas o condiciones que tenían un comportamiento similar respecto a las condiciones climatológicas que se presentaban al transcurso de los años.

Las condiciones que tenían un comportamiento similar al pasar de los años son dos (altas precipitaciones y bajas precipitaciones), a estas condiciones se les suma dos fenómenos climáticos los cuales influyen aún más en el estado salino del agua del lago en ciertas temporadas de los años, fenómenos como el “Niño” y la “Niña”, estos fenómenos reportaron en el estudio una afectación a la variabilidad hidrológica, esto sucede porque los fenómenos modifican condiciones regionales como lo son las precipitaciones. [33]

En el estudio se reportaron valores (resultado de las simulaciones) cercanos y mayores a los 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en épocas de el “Niño” las bajas precipitaciones; y menores de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con presencia de La Niña, por el aumento de las lluvias. Cabe resaltar que el estudio registro desde los primeros meses que empezaron a recolectar información una relación entre las precipitaciones y la conductividad eléctrica, a continuación, se muestra un diagrama el cual relaciona las precipitaciones registradas en el año 2018 vs la conductividad eléctrica presente en las mismas (se aclara que en el estudio tomaron el año 2018 por la cantidad de información recolectada).

Figura 23

Conductividad eléctrica vs precipitación



Nota. Los datos para la elaboración de la gráfica fueron sacados de la recopilación teórica del estado del agua, documentos de la alcaldía de paipa, Corpoboyacá y del Ideam. Tomado de: J.C. Monroy Ramírez, A.J. Espinosa Ramírez y Jiménez Avella W.A., “Hidroclimatología local e impactos en el lago Sochagota, Paipa, Boyacá”. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina Vol. 31(1) pp. 53-72.

Con las salidas al campo que realizaron los autores del estudio, se obtuvieron diferentes valores de conductividad eléctrica, antes de mostrar los datos obtenidos en estas salidas al campo se van a mostrar los puntos que tomaron para el muestreo:

Tabla 19*Identificación y coordenadas de puntos evaluados*

Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
Entrada río salitre	200 m delante de entrada del río Salitre	Centro del lago	Muelle de los Jarillones	Muelle de la Fragata	Compuerta salida
Coordenadas					
x=5,7529059	x=5,7547539	x=5,7631755	x=5,76273	x= 5,76764	x= 5,731155
y= -73,11854	y= -73,12078	y= -73,11198	y= -73,115	y= -73,1259	y= -73,12592

Nota. En la tabla se pueden apreciar los puntos testeados con sus respectivas coordenadas. Tomado de: J.C. Monroy Ramírez, A.J. Espinosa Ramírez y Jiménez Avella W.A., "Hidroclimatología local e impactos en el lago Sochagota, Paipa, Boyacá". Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina Vol. 31(1) pp. 53-72.

Tabla 20*Variables in situ en cada punto de muestreo para calibrar modelo y escenarios*

	Variable	Muestreos					Promedio
		1	2	3	4	5	
		10/03/2019	9/06/2019	4/08/2019	1/09/2019	20/10/2019	
Punto 1	CE	3469	1626	2620	7810	7250	4555
	T	16	16	18	18	17	17
Punto 2	CE	3660	1593	2730	2980	3730	2939
	T	19	16	17	17	17	17
Punto 3	CE	3530	2110	2660	2980	3320	2920
	T	19	16	18	18	16	17
Punto 4	CE	3680	2220	2620	2980	3070	2914
	T	21	16	18	18	18	18
Punto 5	CE	3300	2300	2740	3000	3260	2920
	T	21	15	18	18	18	18
Punto 6	CE	3570	2220	2670	2980	3280	2944
	T	22	15	18	18	18	18

Nota. Los muestreos 1 y 3 se hicieron en condiciones de bajas precipitaciones y los muestreos 2,4 y 5 se realizaron en condiciones de altas precipitaciones; Conductividad eléctrica (ce) en micro-Siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$); temperatura en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$). Tomado de: J.C. Monroy Ramírez, A.J. Espinosa Ramírez y Jiménez Avella W.A., "Hidroclimatología local e impactos en el lago Sochagota, Paipa, Boyacá". Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina Vol. 31(1) pp. 53-72.

Con estos resultados de la conductividad eléctrica este estudio concluyo que en el año 2019 el lago Sochagota se caracteriza siempre como un sistema halino y llega a considerarse mesosalino (concentraciones mayores a $4500 \mu\text{S}/\text{cm}$) cuando las condiciones del sistema lo propician. También que mediante los resultados obtenidos empíricamente se verificó que el movimiento de las sales en el lago es un proceso muy uniforme, que evidencia dos comportamientos típicos. El primero, en la entrada al sistema con mayores concentraciones de salinidad; y para el resto del cuerpo de agua, con menor magnitud, siempre conservando uniformidad. [33]

5.2.4 Año 2021

En el año 2021 la entidad Corpoboyacá realizo unos estudios en todo el departamento de Boyacá, estos estudios se enfocaban en las fuentes hídricas tanto superficiales como

subterráneas que tiene el departamento, el estudio que realizaron fue una caracterización físico-química de dichas fuentes.

A continuación, se muestra los puntos en los cuales testearon el lago Sochagota y la quebrada honda:

Figura 24

Puntos testeados en el Sochagota y en el rio salitre



Nota. Puntos críticos para el muestreo de la campaña de Corpoboyacá. Tomado de: Corpoboyacá. (s.f.). "Calidad hídrica". [En línea]. Disponible: <https://www.corpoboyaca.gov.co/proyectos/manejo-integral-del-recurso-hidrico/calidad-hidrica/>. [Acceso: oct,12,2022].

Esta campaña realizada por Corpoboyacá se realiza con el propósito de garantizar un uso adecuado de las fuentes hídricas que tiene el departamento, para cumplir esto Corpoboyacá junto con las alcaldías de los municipios y empresas de análisis hídricos han llevado a cabo a partir del año 2015 y en forma gradual y anual jornadas de monitoreo tanto a las principales fuentes hídricas como a los vertimientos puntuales de

los municipios de la jurisdicción de la Corporación con el fin de tener información que permita definir sus cargas contaminantes al recurso hídrico.

Estos monitores los han realizado en diferentes ubicaciones del mismo cuerpo de agua, a estos monitoreos se les han realizado 98 pruebas de calidad, donde se evidencia un análisis de la trazabilidad de los diferentes parámetros como: pH, dbo, dco, oxígeno disuelto, nitritos, nitratos, coliformes, y se hace la comparación con el cumplimiento de los objetivos de calidad en los respectivos puntos de cada cuenca (las técnicas aplicadas para los análisis están en los anexos).

Ahora se muestran los resultados obtenidos en estas caracterizaciones realizadas para las dos fuentes hídricas. Cabe aclarar que en toda la caracterización que realizaron solo se va a extraer los factores anteriormente mencionados (conductividad y temperatura), y también se va a traer el pH que poseía el agua a la hora de hacer el muestreo (para ver toda la caracterización que realizó Corpoboyacá dirigirse al anexo 1 y 2).

En primera instancia se van a mostrar los resultados de la quebrada Honda, para esta caracterización se tomaron muestras de 4 diferentes puntos y cada punto está relacionado con una estación de monitoreo:

Tabla 21

Muestreo 1, estación inicial de la quebrada Honda

PARÁMETRO	TÉCNICA DE ANÁLISIS	UNIDADES	Estación 1: Sobre la Quebrada Honda aguas arriba de la confluencia con la Quebrada Cortaderal
IN SITU CONDUCTIVIDAD	Electrometría	µS/cm	85,7
IN SITU PH	Electrométrico	Unidades de pH	7,82
IN SITU TEMPERATURA	Termométrico	°C	11,2

Nota. En la tabla se evidencia los parámetros fisicoquímicos más relevantes para este trabajo, la tabla es una adaptación de los anexos anteriormente mencionados.

Tabla 22*Muestreo 2, segunda estación de la quebrada Honda*

PARÁMETRO	TÉCNICA DE ANÁLISIS	UNIDADES	213462 - Estación 2: Sobre la Quebrada Honda entre la confluencia con la Quebrada Cortaderal y la Quebrada Alitajo
IN SITU CONDUCTIVIDAD	Electrometría	μS/cm	86,7
IN SITU PH	Electrométrico	Unidades de pH	8,47
IN SITU TEMPERATURA	Termométrico	°C	13,6

Nota. En la tabla se evidencia los parámetros fisicoquímicos más relevantes para este trabajo, la tabla es una adaptación de los anexos anteriormente mencionados.

Tabla 23*Muestreo 4, Ultima estación de la quebrada Honda*

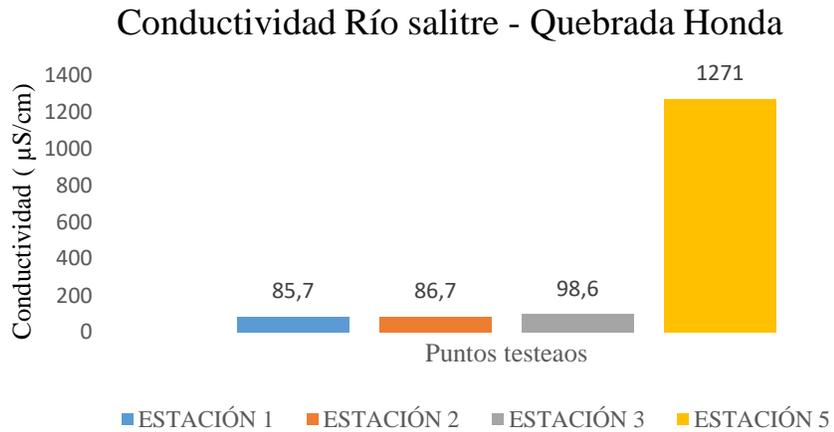
PARÁMETRO	TÉCNICA DE ANÁLISIS	UNIDADES	213464 - Estación 3: Sobre la Quebrada Honda entre la confluencia con la Quebrada Olitas y la Quebrada Tunal
IN SITU CONDUCTIVIDAD	Electrometría	μS/cm	98,6
IN SITU PH	Electrométrico	Unidades de pH	7,18
IN SITU TEMPERATURA	Termométrico	°C	15,8

Nota. En la tabla se evidencia los parámetros fisicoquímicos más relevantes para este trabajo, la tabla es una adaptación de los anexos anteriormente mencionados.

Como se evidencia a medida que el recorrido de la quebrada Honda – río salitre se va acercando al lago Sochagota la conductividad va en aumento, esto se puede deber a que hay mayores afloramientos de aguas termales y termominerales en esta zona y también que hay mayor actividad que incide en esta conductividad.

Figura 25

Conductividad presente en la quebrada salitre en los diferentes puntos testeados



Nota. Los datos para la elaboración de la gráfica se extrajeron de los resultados compartidos en la campaña realizada por Corpoboyacá (ver anexos).

La caracterización realizada en el lago Sochagota, se tomaron 10 puntos de muestreo para poder realizar una caracterización completa del estado del agua del lago Sochagota.

Tabla 24*Coordenadas de los puntos testeados*

Zona muestreada	Entrega del río Salitre al lago Sochagota	La playa del lago	Muelle diagonal al restaurante la Fragata	Lago - Sur oeste	Lago - Centro	Lago - Nor este	Alrededor compuerta de la salida del lago	Lago - Norte	Inicio Ducto Transverso Gensa	Salida Ducto Transverso al Lago Sochagota
LATITUD	05°45'24,8``	05°45'38,1``	05°46'00,2``	05°45'37,0``	05°45'37,0``	05°45'51,8``	05°46'02,4``	05°46'03,1``	05°46'16,8``	05°46'01,4``
LONGITUD	73°07'14,2``	73°07'00,6``	73°07'26,3``	73°07'16,1``	73°07'16,1``	73°06'55,0``	73°06'53,1``	73°07'08,4``	73°08'12,2``	73°07'34,7``

Nota. La tabla muestra las coordenadas correspondientes a los puntos testeados en la campaña realizada por Corpoboyacá, (la tabla es una adaptación de la información, ver anexos).

Tabla 25

Caracterización Lago Sochagota

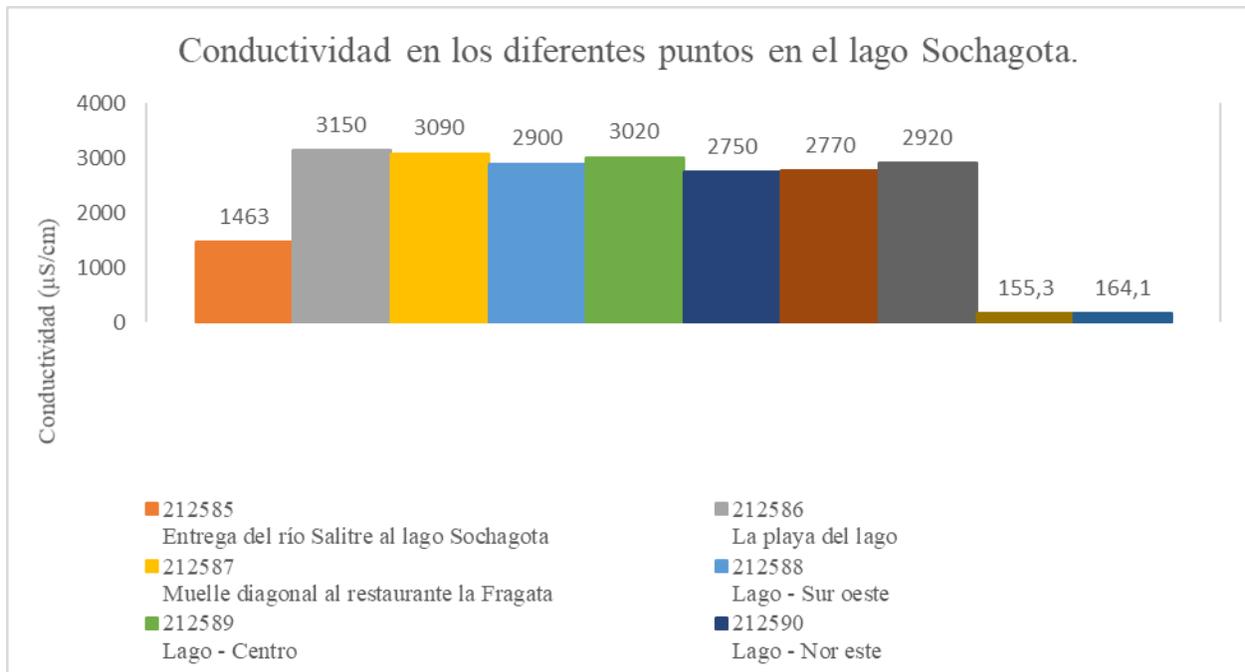
PARÁMETRO	TÉCNICA DE ANÁLISIS	UNIDADES	212585 Entrega del río Salitre al lago Sochagota	212586 La playa del lago	212587 Muelle diagonal al restaurante la Fragata	212588 Lago - Sur oeste
In Situ Conductividad	Electrometría	μS/cm	1463	3150	3090	2900
In Situ pH	Electrométrico	Unidades de pH	6,62	9,21	9,26	9,27
In Situ Temperatura	Termométrico	°C	21,1	22,4	24	23,1
212589 Lago - Centro	212590 Lago - Nor este	212629 Alrededor compuerta de la salida del lago	212630 Lago - Norte	212631 Inicio Ducto Transverso Gensa	212632 Salida Ducto Transverso al Lago Sochagota	
3020	2750	2770	2920	155,3	164,1	
9,26	9,26	9,15	9,19	6,80	6,57	
23,1	22,8	22,3	23	20,2	19,7	

Nota. En la tabla se evidencia los parámetros fisicoquímicos más relevantes para este trabajo, la tabla es una adaptación de los anexos anteriormente mencionados.

La conductividad en todo el lago no es muy elevada en comparación a otras zonas del mismo, solo en ciertas zonas (playa del lago, cerca al restaurante Fragata y en el centro del lago) la causa de esto puede ser la misma razón que en la quebrada Honda; estas conductividades sobrepasan en el rango estándar para estos cuerpos de agua el cual es de 50-500 μS/cm. [34]

Figura 26

Datos de conductividad en las diferentes zonas testeadas dentro del Lago Sochagota



Nota. Los datos para la elaboración de la gráfica se extrajeron de los resultados compartidos en la campaña realizada por Corpoboyacá (ver anexos).

En la gráfica 2 (figura 26) se puede apreciar con más claridad cuáles son los puntos y/o zonas dentro del lago las cuales presentan una conductividad alta en comparación a las demás zonas, llama la atención que uno de los puntos con poca conductividad es la entrada de la quebrada Honda hacia el lago o sea su afluente, esto resalta que los posibles afloramientos de aguas termales y termominerales si tienen gran influencia sobre el estado del del agua en el lago.

Por último, se muestran los resultados obtenidos en la campaña realizada por Corpoboyacá de los pozos termominerales cerca al lago (estos pozos están en zonas turísticas), en esta ubicación hay un posible afloramiento de aguas termominerales en la parte interna del lago (para ver la caracterización completa de los pozos dirigirse al anexo3):

Tabla 26

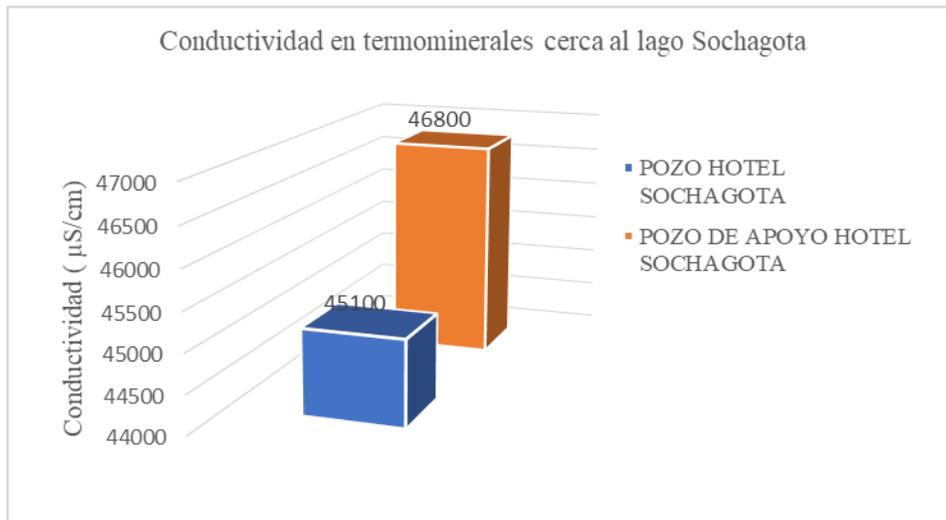
Caracterización pozos termales cerca al lago Sochagota

NOMBRE DEL PUNTO		POZO HOTEL SOCHAGOTA	POZO DE APOYO HOTEL SOCHAGOTA
PARAMETRO	UNIDADES	VALOR	VALOR
IN SITU CONDUCTIVIDAD	$\mu\text{S/cm}$	45100	46800
IN SITU PH	Unidades de pH	7,32	6,8
IN SITU TEMPERATURA	$^{\circ}\text{C}$	50,9	53,3
IN SITU TEMPERATURA	$^{\circ}\text{C}$	50,9	53,3

Nota. En la tabla se evidencia los parámetros fisicoquímicos más relevantes para este trabajo, la tabla es una adaptación de los anexos anteriormente mencionados.

Figura 27

Conductividad de pozos termales cerca a los afloramientos del lago



Nota. Los datos para la elaboración de la gráfica se extrajeron de los resultados compartidos en la campaña realizada por Corpoboyacá (ver anexos).

A continuación, se presenta la ubicación de estos pozos y la ubicación de los posibles afloramientos del lago en su interior:

Figura 28

Relación pozos termales de hotelería con afloramientos internos en el lago



Nota. En esta imagen se observa un pozo de aguas termales en custodia de un hotel y posible afloramiento termal en el lago, estos dos casi en el la misma zona, imagen de arriba. Tomada de: Google maps. Google. (s.f.). Indicaciones para llegar al lago Sochagota [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps/search/lago+sochagota/@5.7514269,-73.1340936,14.25z?hl=es> [Acceso: 6, oct, 2022]., imagen inferior. Tomada de: O. Usaquén., Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas, tesis doctoral. Dpto. De ciencias y técnicas del agua y del medio ambiente, Universidad de Cantabria, Santander. Colombia, 2017.

En la zona demarcada con un círculo azul se puede presenciar la ubicación espacial de los pozos termominerales cuyas conductividades se muestran en la gráfica 3, en la foto inferior se puede presenciar el posible afloramiento de agua termal o termomineral que posee el lago, en esta misma zona es donde se reporta una conductividad alta (en comparación a las demás) en la caracterización del lago Sochagota.

Ya para finalizar este capítulo se va a describir la campaña que se realizó en el lago Sochagota para dar una caracterización propia sobre el estado del agua, esta caracterización cuenta con los mismos parámetros que se han visto por el momento (Conductividad, temperatura y pH). El pH es un factor que se debe tener en cuenta ya que estas aguas deben estar entre los rangos de alcalinidad ($\text{pH} = 7-14$), y en el rango de aguas con cloruros y sulfatos (6.8-7.5).

De la caracterización mediante bibliografía se puede concluir que desde que se empezó a monitorear el lago se ha evidenciado altas conductividades, conductividades que sobrepasan abruptamente los $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ [34], estos resultados se pueden interpretar como una mayor concentración de iones disueltos en el agua del lago, esta afirmación se apoya en que las concentraciones de iones cloruros en algunas partes del lago sobrepasan los $250 \text{ mg}/\text{l}$ (ver anexos).

En la campaña que se realizó se tomaron muestras en dos diferentes puntos del lago Sochagota, los puntos de muestreo fueron los siguientes:

Figura 29

Punto de muestreo 1



Nota. Imágenes superior derecha e inferior fueron tomadas en la campaña realizada e imagen superior izquierda fue tomada de: Google maps. Google. (s.f.). Indicaciones para llegar al lago Sochagota [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps/search/lago+sochagota/@5.7514269,-73.1340936,14.25z?hl=es> [Acceso: 6, Oct, 2022].

Figura 30

Punto de muestreo 2



Nota. Imágenes superior derecha e inferior fueron tomadas en la campaña realizada e imagen superior izquierda fue tomada de: Google maps. Google. (s.f.). Indicaciones para llegar al lago Sochagota [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps/search/lago+sochagota/@5.7514269,-73.1340936,14.25z?hl=es> [Acceso: 6, Oct, 2022].

Los puntos se escogieron por su fácil accesibilidad ya estando en campo, también para la selección de estos puntos se tuvo en cuenta la actividad que se da a lo largo del lago, por lo cual se seleccionó un punto lo más cercano a la desembocadura del afluente (punto 2) y el otro en la zona que da hacia la compuerta del lago (punto 1).

Para las muestras tomadas del punto 1 se les dio una denominación de 001S001 y 002S001 donde los números antes de la S hacen referencia al número de muestra y los que están después hacen referencia al lugar/sitio. En este orden de ideas para el sitio dos las muestras quedan clasificadas de la siguiente manera 001S002 y 002S002; la S hace referencia al lago Sochagota.

Figura 31

Muestras tomadas en los dos puntos del lago



Nota. En la imagen se observan las muestras analizadas en el laboratorio.

Las pruebas que se le realizaron a estas muestras fueron conductividad y pH, se aclara que las pruebas no se realizaron en campo sino en los laboratorios de la universidad, a continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Figura 32

Muestra 001S001



Nota. La imagen evidencia los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a las muestras tomadas en el lago.

Tabla 27

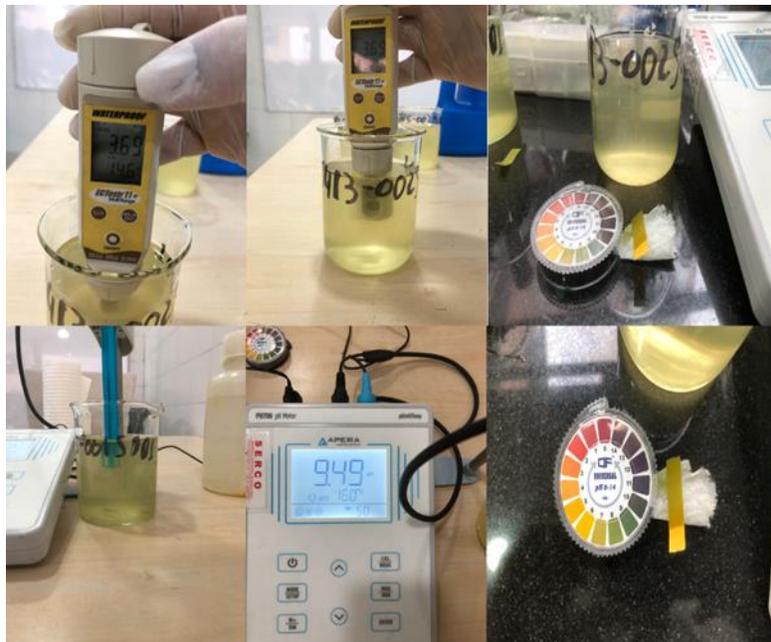
Resultados prueba 001S001

001S001		
Parámetro	unidad	valor
Conductividad	μS	3280
pH	pH metro	9,62
	cinta	8-9
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	14,7

Nota. La tabla compila los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.

Figura 33

Muestra 002S001



Nota. La imagen evidencia los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a las muestras tomadas en el lago.

Tabla 28

Resultados prueba 002S001

002S001		
Parámetro	Unidad	Valor
Conductividad	μS	3690
pH	pH metro	9,5
	Cinta	8-9
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	14,6

Nota. La tabla compila los resultados obtenidos en las pruebas realizadas

Figura 34

Muestra 001S002



Nota. La imagen evidencia los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a las muestras tomadas en el lago.

Tabla 29

Resultados muestra 001S002

001S002		
Parámetro	unidad	valor
Conductividad	μS	4030
pH	pH metro	9,43
	cinta	8-9
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	14

Nota. La tabla compila los resultados obtenidos en las pruebas realizadas

Figura 35

Muestra 002S002



Nota. La imagen evidencia los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a las muestras tomadas en el lago.

Tabla 30

Resultados muestra 002S002

002S002		
Parámetro	unidad	valor
Conductividad	μS	4020
pH	pH metro	9,57
	cinta	8-9
Temperatura	°C	14,2

Nota. La tabla compila los resultados obtenidos en las pruebas realizadas

Figura 36

Conductividad muestras



Nota. Los datos para la elaboración de la gráfica se extrajeron de los resultados compartidos en la campaña realizada por Corpoboyacá (ver anexos).

Los resultados obtenidos con respecto a la conductividad en la campaña realizada evidencia que el lago Sochagota aún muestra un alto nivel de conductividad, esto porque la conductividad eléctrica en ríos y lagos puede variar ampliamente, pero generalmente

se encuentra en un rango de 50-500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [34], es evidente que la conductividad sobrepasa el rango “normal” en que debería estar este parámetro.

Cabe aclarar dos cosas; la conductividad se midió con un conductivímetro el cual da un valor en la unidad de miliSiemens (mS), se hace la correspondiente conversión para la unidad con la que se ha desarrollado la conductividad eléctrica en este trabajo (microsiemens [μS , uS]); cabe resaltar el valor resultante de las muestras del punto 2, estas muestras tienen la conductividad más alta, estos valores nos confirman que la desembocadura de la quebrada Honda – río salitre si tiene influencia en el estado del lago; por último se menciona que la recolección de estas muestras se realizaron en el mes de abril el cual es un mes que entra en la temporada de altas precipitaciones, esto según la hidroclimatología del municipio de paipa.

6. ESTRATEGIA DE REMEDIACIÓN PARA LOS PARÁMETROS DE SALINIDAD DEL LAGO CONSIDERANDO SU POTENCIAL IMPLEMENTACIÓN EN EL SITIO

En este capítulo se estructuró una estrategia de remediación para la calidad del agua en el lago Sochagota, esta estrategia de remediación se va a basar en todo lo contextualizado y descrito en los capítulos anteriores.

Como se mencionó en el capítulo 4, la salinización del agua en el lago Sochagota se debe a dos principales fuentes: 1) a la quebrada Honda – río salitre y 2) a los posibles afloramientos de agua termales y termominerales que se presentan en el interior del lago. Para estructurar una estrategia se van a tener varios factores en cuenta, factores tales como la financiación que se les debe realizar a ciertos métodos, el área que requieran la implementación de dichos métodos, la eficiencia que se obtendría y por último la viabilidad que tendría su aplicación en campo.

En el capítulo inicial se mencionaron diferentes tipos de contaminación que hay en la variedad de cuerpos superficiales de agua (ríos y lagos), básicamente todas las remediaciones se basaban en las tres etapas de tratamientos de aguas residuales, y esto se puede relacionar de cierta forma con las remediaciones que existen para tratar el problema de la salinidad en el agua, se relaciona de la forma en que para el tratamiento de aguas residuales existen plantas cuya abreviación es PTAR (planta de tratamiento de aguas residuales); y para el tratamiento de la salinización existe su equivalente cuya denominación es “plantas desalinizadoras”.

Como se mencionó en el capítulo 4 estas plantas se basan o se rigen por 4 etapas para su funcionamiento; la primera etapa consiste en la captación de agua, esta etapa es el inicio de todo el proceso; la segunda etapa consiste en un pretratamiento, acá el agua captada se somete a un primer tamizado para posteriormente separar la carga biológica y otros contaminantes; la tercera etapa consiste en un tratamiento y purificación, en esta etapa cada proceso a implementar requiere de membranas, conductos e instalaciones con buen espacio para su implementación y por último la cuarta etapa consiste en un postratamiento Es una zona de almacenamiento donde el agua que ha sido tratada se separa según el tipo de aplicación final que vaya a tener, en algunos casos requiere ser

re- mineralizada para cumplir con normativas de consumo local. Finalmente es distribuida por la red de abastecimiento.

Para la implementación de esta técnica/método desalinizador de agua se necesitan de espacios muy amplios para la aplicación de las diferentes etapas que conllevan, una buena inversión tanto para la adecuación del terreno como para los equipos y para el personal que se emplee para esta planta, y se descarta también porque estas plantas generan ciertos residuos los cuales afectan la biodiversidad que tienen a su alrededor teniendo en cuenta las características geográficas del lago Sochagota se descarta completamente la aplicación de esta técnica/método.

Figura 37

Planta desalinizadora Chile



Nota. Estas plantas tienen un enfoque más hacia las aguas saladas por naturaleza o sea aguas marinas. Tomado de: Structuralia, "Plantas desalinizadoras: ¿qué son y cómo funcionan?", [En línea]. Disponible: <https://blog.structuralia.com/plantas-desalinizadoras> [Acceso: oct,16,2022].

Lo mismo pasaría con las otras soluciones/técnicas nombradas en el capítulo 3, soluciones como las siguientes: desalinización térmica, destilación, congelación, electrodiálisis y evaporación relámpago, estas técnicas necesitan de áreas muy grandes

(área la cual no tiene el lago Sochagota) para su buen funcionamiento, y también requieren de equipos secundarios que las hagan funcionar por lo cual la inversión que requieren es considerable para su ejecución; cabe mencionar que este tipo de soluciones/técnicas fueron pensadas para un contexto industrial mas no ambiental y por ende estos equipos vienen diseñados para caudales de ciertos rangos y caudales continuos, este aspecto tampoco lo suple el lago Sochagota por lo que básicamente es un depósito estático y el único caudal que le entra es el de su afluente el cual es muy pequeño como para implementar estas técnicas.

Las técnicas que se podrían aplicar son intercambio iónico y humedales artificiales (Fitotecnología); se tienen en cuenta ya que estas técnicas no necesitan de una gran área para su implementación en comparación con las técnicas anteriores, y también tienen teóricamente mejores rendimientos y eficiencias para la remoción de iones.

Se enfatiza en el área ya que las zonas donde se deben aplicar estos métodos son en los afloramientos termales y en su afluente natural, la razón de él porque estas zonas se abarco en el capítulo 4 y se menciona esto ya que el área de aplicabilidad y/o implementación de estos métodos en el lago no es viable para métodos que requieran de grandes zonas como los ya mencionados.

Figura 38

Zona de desembocadura del afluente natural del lago (quebrada honda - río salitre)



Nota. En esta imagen se puede evidenciar a la Izq. Imagen satelital proporcionada por Corpoboyacá, Dere. Área aproximada para la implementación de métodos. Tomada de: Google Earth. (s.f.). Indicaciones para llegar al lago Sochagota [En línea]. <https://earth.google.com/web/@5.75465705,-73.1215944,2494.15733476a,1268.81197072d,35y,2.85085098h,0t,0r> [Acceso: 19,oct,2022].

Como se observa en la imagen anterior, la quebrada Honda-río salitre tiene una compleja geografía para la aplicación de métodos convencionales para tratar el agua entrante al lago, claro está que aunque tiene un área amplia para la construcción y acondicionamiento de procesos de tratamiento a gran escala no es lo más viable, esto se debe a que un atractivo del lago es la naturaleza que lo rodea y también porque el lago está en proceso de ser un área protegida por su biodiversidad la cual lo rodea.

Anteriormente se mencionó el método de intercambio iónico, este método se tiene en cuenta porque ha sido la solución y propuesta de solución para problemas similares como el de este trabajo, un ejemplo de esto es el trabajo “Alternativa de tratamiento de aguas provenientes de piscinas termales de paipa para el posterior vertimiento en el río Chicamocha” el cual su problemática radica en las aguas termales y termominerales que se implementan en el sector turístico del municipio de Paipa y después se vierten en el río Chicamocha sin ningún tratamiento previo; estas aguas termales están por el mismo

fallo geológico que tiene Boyacá, o sea estas aguas tienen la misma composición que los posibles afloramientos del lago Sochagota.

En este trabajo la solución propuesta fue un pre tratamiento con carbón activado granular y un proceso de intercambio iónico, en el cual dieron la posibilidad de implementar dos resinas para el intercambio (Amberlite ira-67 e hidróxido de sodio); también resaltaron las condiciones de operabilidad para poder aplicar el secuenciamiento.

Tabla 31

Condiciones empleadas para el secuenciamiento de tratamiento de aguas termales

Condiciones del proceso	Fase 1: adsorción por carbón activado granular
Temperatura del efluente	20 °C
Temperatura carbón activado	21 - 25 °C
pH del efluente	6,38 - 7,54
Tiempo de equilibrio	16 h
Relación sólido líquido	12,5 g/L
Fase 2: Intercambio Iónico	
pH de operación	0 - 7
Temperatura máxima de operación	60 °C
Caudal	25484,4 L/h
Tiempo de duración del ciclo	15 h
Agente regenerante	Solución NaOH al 4%
Tiempo de regeneración	2,5 h

Nota. La tabla muestra los parámetros establecidos en la etapa operativa del intercambiador iónico propuesto en el trabajo. Tomado de: L. Duarte y M. Mosquera, “Alternativa de tratamiento de aguas provenientes de piscinas termales de paipa para el posterior vertimiento en el río Chicamocha”, [En línea]. Disponible: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/182>.

Este método (intercambio iónico) se trae a colación porque en lo que respecta a su aplicabilidad en sitio y las eficiencias que se llegan a obtener (las cuales son superiores a un 92% de remoción) [45], sería una buena estrategia para esta problemática, pero no es la mejor alternativa para el problema puntual del lago Sochagota, esto porque comparte una característica similar con los métodos mencionados al inicio de este

capítulo, el intercambio iónico necesita de equipos secundarios y/o auxiliares, y materiales específicos para su funcionamiento; equipos como bombas para asegurar el caudal necesario, válvulas y tuberías de diferente material; en particular para el intercambio iónico se necesitaría que la columna a elaborar estuviera hecha de acero inoxidable.

Por ultimo quedan los humedales flotantes (Fitotecnología), de acuerdo a los pros y contras de las anteriores estrategias los humedales flotantes son la mejor opción a implementar, esto ya que como se especificó en el capítulo 4, no necesita de grandes áreas para su implementación (o sea no tienen un área predefinida) ya que el área que ocupan estos humedales depende de las propiedades del sitio como por ejemplo el caudal del río o lago y parámetros fisicoquímicos del mismo; no requieren de equipos secundarios para su funcionamiento y tampoco requieren de una fuente de energía para su funcionamiento ya que los diferentes procesos que realizan las diferentes plantas (ya mencionadas en el capítulo 4), las pueden realizar gracias a los rayos UV del sol (de ahí se constituye el término fito de fitosistemas, los cuales hacen fotosíntesis). [46]

La planta seleccionada para la remediación del lago Sochagota fue la *Acrostichum aureum*, cabe aclarar que *Acrostichum aureum*, no es una macrófita acuática verdadera, sin embargo, se le puede ubicar en esta categoría, puesto que convive en los ecosistemas acuáticos, en condiciones similares que las macrófitas, tales como; sistema radicular arenquimático tolerante a la inundación, adaptabilidad de crecer en sustratos húmedos, capacidad de extraer elementos minerales en aguas dulces y salinas, el género *Acrostichum*, tiene cuatro especies, dos se encuentran en la zona biogeográfica neotropical, entre estas; *A. Aureum* y *A. danaeifolium*, en relación a Venezuela *A. danaeifolium*, crece más en suelos húmedos y zonas costeras de los estados orientales, mientras que *A. Aureum*, es común encontrarlo, en ecosistemas acuáticos salobres de mangles, pantanos y ciénagas, ubicadas en la región occidental y llanera del país.[41]

Cabe aclarar que se seleccionó la *Acrostichum aureum* ya que esta especie de planta tiene muy buenos porcentajes de remoción con respecto a los parámetros de interés para este trabajo (cloruros, nitritos, nitratos ...), porcentajes que oscilan entre un 70% - 93% [41], pero también hay otra planta que resalta; el jacinto de agua (*Eichhorina Crassipes*).

Esta especie (*Eichhorina Crassipes*), alcanza reducciones de DBO₅ en el orden de 95 %, y hasta 90,2 % para la DQO. En el caso de los sólidos suspendidos se registran disminuciones con valores que se encuentran en el rango de 21 % y 91 % [46]. En cuanto al fósforo total y nitrógeno total, se alcanzaron máximas remociones de 91,7 % y 98,5 % respectivamente, siendo este último, el contaminante con mayor remoción. Los metales también han sido objeto de remoción, encontrándose porcentajes de máxima remoción desde 85 % hasta 95 % para el hierro, cobre, zinc, cadmio y cromo. [46]

Anteriormente se mostraron los valores máximos permisibles de los parámetros fisicoquímicos para el agua de riego, como ya se tiene un punto de comparación se dispone a mostrar los valores reportados en la campaña de saneamiento realizada por Corpoboyacá.

Tabla 32

Parámetros fisicoquímicos más relevante con respecto a la salinización en el lago Sochagota

Zona muestreada		Entrega del río Salitre al lago Sochagota	La playa del lago	Muelle diagonal al restaurante la Fragata	Lago - Sur oeste	Lago – Centro	Lago - Nor este	Alrededor compuerta de la salida del lago	Lago - Norte	Salida Ducto Transverso al Lago Sochagota
LATITUD		05°45'24,8``	05°45'38,1``	05°46'00,2``	05°45'37,0``	05°45'37,0``	05°45'51,8``	05°46'02,4``	05°46'03,1``	05°46'01,4``
LONGITUD		73°07'14,2``	73°07'00,6``	73°07'26,3``	73°07'16,1``	73°07'16,1``	73°06'55,0``	73°06'53,1``	73°07'08,4``	73°07'34,7``
Parámetro	Unidad	Datos								
Conductividad	μS/cm	1463	3150	3090	2900	3020	2750	2770	2920	164,1
Cloruros	mg Cl-/L	123	290,9	285,6	290,9	290,9	296,2	288,3	249,9	6,6
Alcalinidad Total	mg/L CaCo3	38	136	136	136	138	139	135	132	25
pH	Unidades de pH	6,62	9,21	9,26	9,27	9,26	9,26	9,15	9,19	6,57
Nitratos	mg N/L	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	1,5
Nitritos	mg N/L	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	0,051
Dureza Total	mg/L CaCO3	83	66	67	67	66	67	63	62	46
Sulfatos	mg/L SO4	79,7	64,8	40,7	39,5	53,6	49,6	60,6	83,8	36,7
Sodio	mg Na/L	246	457,2	440	445,4	398,2	405	423,8	494	7,8
magnesio	mg Mg/L	36	19	17	20	18	19	15	19	15
Nitrógeno Amoniacal	mg N/L	0,69	0,85	0,93	0,85	1,56	1,52	0,81	1,4	1,59
Fósforo	mg/L P	0,08	0,13	0,12	2,43	0,16	5,5	0,17	0,19	0,33
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	<5	8	12	12	13	14	18	14	31

Nota. La tabla muestra los puntos testeados por Corpoboyacá en el año 2021 en el lago Sochagota, esta tabla es una adaptación de todos los resultados de la campaña, se extrajeron los parámetros de interés para este trabajo, (datos extraídos de los anexos).

La tabla 30 muestra los resultados obtenidos en la campaña realizada por Corpoboyacá, es evidente que los parámetros en los cuales se ha enfocado este trabajo (Conductividad y pH) sobrepasan los rangos aceptables para el agua de riego, esto de por sí ya es alarmante porque nos da a entender que el lago sigue adoptando las características fisicoquímicas del afluente

Teniendo esto en cuenta, se dispone a presentar los porcentajes de remoción que presenta la macrófita *Acrostichum aureum* con respecto a los parámetros comparados con los datos presentados por Corpoboyacá, también con parámetros biológicos relevantes para estos cuerpos de agua superficiales:

Tabla 33

Porcentaje de remoción de Acrostichum Aureum

Parámetro	Unidad	% Remoción
Cloruros	mg/L Cl ⁻	98.2
Nitritos	mg/L N-NO ₂	82.06
Nitratos	mg/L N-NO ₃	76.6
DBO ₅	mg/L O ₂	99.83
DQO	mg/L O ₂	99.46
Coliformes totales	NMP/100mL	99.99

Nota. La tabla muestra los porcentajes que se pueden obtener en ciertos parámetros fisicoquímicos implementando la *Acrostichum Aureum* como planta base para el saneamiento del lago Sochagota, esta tabla es una adaptación. Tomado de: J. Iván et al, "Estudio preliminar de la técnica de Fitorremediación en vertimientos relacionados con aguas residuales industriales," 2019.

Para el diseño teórico del humedal flotante se debe tener en cuenta que tipo de humedal es el más adecuado para el lago Sochagota; el humedal más adecuado para la aplicación en el lago es un humedal subsuperficial de flujo horizontal, esto porque al aplicarlo en el sitio de interés (entrega de caudal de la quebrada honda-río salitre al lago Sochagota) cumple con unos prerrequisitos que lo hacen ideal para su aplicación, estos

prerrequisitos son que no requiere superficies grandes para su diseño y las bajas temperaturas no afectan a este tipo de humedales.

Diseño del humedal flotante de flujo subsuperficial horizontal:

Para el diseño del humedal se aplicaron las fórmulas contextualizadas e ilustradas en el capítulo 4 (fórmulas de la 4 a la 8) y los parámetros necesarios para el diseño se sacaron de los datos reportados por la campaña realiza por Corpoboyacá más específicamente de la entrega del afluente natural hacia el lago; se seleccionó este punto por la gran influencia que tiene el mismo con respecto a la salinización del lago.

Tabla 34

Datos para el diseño teórico del humedal subsuperficial de flujo horizontal

Datos para diseño humedal	UNIDADES	Valores
Caudal	m ³ /día	3040,00
Temperatura	°C	16,50
Concentración afluente	mg/L	10290,22
Concentración efluente	mg/L	5947,09
Profundidad humedal	M	0,60
Porosidad medio granular	%	0,75

Nota. En esta tabla se encuentran los datos necesarios para hacer la elaboración (diseño) de un humedal subsuperficial de flujo horizontal, esta tabla es una adaptación de los datos reportados en la campaña de Corpoboyacá (ver anexos).

A continuación, se muestran los resultados de las variables para el diseño del humedal, este humedal seria para la entrega de la quebrada honda hacia el lago Sochagota:

Tabla 35

Información para el diseño del humedal subsuperficial de flujo horizontal

Variables	Dato	unidades
Área superficial (As)	4237,66	m ²
Área vertical (Ac)	221,09	m ²
Ancho (W)	1,00	m
Largo (L)	4,00	m
Constante de reacción (KT)	0,87	-
Conductividad hidráulica (Ks)	2750,00	m/s

Nota. La tabla tiene los resultados correspondientes para el diseño del humedal más acorde al lago, el largo y el ancho para los humedales ya están estipulados, lo cual se dé un relación entre estos dos factores de 3:1 y 4:1 respectivamente [61]

La tabla 33 nos muestras las dimensiones teóricas que se dan para el diseño del humedal subsuperficial de flujo horizontal, como se mencionó se aplicaron las ecuaciones 4, 5, 6, 7 y 8 (ecuaciones las cuales corresponden para diseños de este tipo de humedal), para los cálculos se tuvieron en cuenta las condiciones fisicoquímicas de lago (estos datos se sacaron de los resultados reportados en la campaña de cuidado hídrico realizada por Corpoboyacá).

Básicamente estas ecuaciones aglomeran los parámetros mostrados en la tabla 32, donde las concentraciones de afluente y efluente hacen referencia a todos los parámetros con unidad de concentración (mg/L) que se pueden dar en el lago, entiéndase como “concentración afluente” a todos los parámetros con unidad de concentración que entran al lago Sochagota por parte de la quebrada honda- río salitre y por concentración efluente a los parámetros con unidades de concentración (mg/L) que se tienen en la compuerta del lago (estos parámetros son tanto orgánicos, inorgánicos como biológicos, los valores de estas concentraciones se pueden ver en los anexos que estudiaron el lago Sochagota).

El valor del caudal se extrajo de los datos publicados en la campaña de Corpoboyacá, más precisamente del caudal que le entrega la quebrada Honda al lago Sochagota, el ancho y el largo tienen dimensiones preestablecidas para este tipo de humedales, los

cuales tienen una relación de 2:1, 3:1 y 4:1 respectivamente [36], la constante de reacción como su nombre lo indica es una constante la cual relaciona la velocidad con la que los compuestos tóxicos y otros contaminantes son transformados y eliminados por las bacterias y otros organismos presentes en el humedal y esta constante es dependiente de la temperatura y por último la conductividad hidráulica es la capacidad de un material para permitir el flujo de agua a través de él la cual en este caso es la arena gravosa el material seleccionado.

Con respecto a la tabla 33 y los resultados de esta, se menciona en primera instancia que estos resultados son dependientes a las condiciones climatológicas que pueden llegar a presentar en el lago por eso se hace énfasis en que estos datos son teóricos, en segunda instancia se puede concluir que para las condiciones climatológicas en las cuales se hizo el muestreo se evidencia que al caudal es importante para poder determinar el área del humedal esto ya que a mayor caudal se va a necesitar una mayor área para el humedal.

Se recalca que para la aplicación de estos humedales es conveniente tener las dimensiones o en su defecto los límites espaciales (entiéndase por esto el espacio físico del lago y río) de la zona donde se piensa aplicar el humedal, esto con el fin de poder hacer una mejor distribución de los humedales a implementar.

A pesar de que el diseño teórico es dependiente de las condiciones de caudal que se dan en el lago, y que este diseño como se evidencio en la tabla 33 nos dan dimensiones un poco grandes, en esta estrategia se plantea la implementación de los humedales por secciones, básicamente la aplicación se daría de la siguiente forma:

Figura 39

Metodología de aplicación por secciones



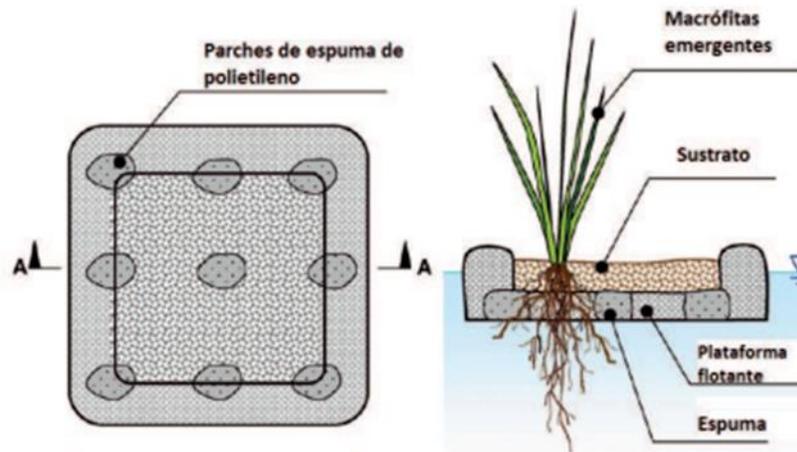
Nota. La imagen demuestra como sería la ubicación espacial de estos humedales en el lago Sochagota. Tomadas de: En esta imagen se puede evidenciar a la Izq. Imagen satelital proporcionada por Corpoboyacá, Dere. Área aproximada para la implementación de métodos. Tomada de: Google Earth. (s.f.). Indicaciones para llegar al lago Sochagota [En línea].<https://earth.google.com/web/@5.75465705,-73.1215944,2494.15733476a,1268.81197072d,3y,2.85085098h,0t,0r> [Acceso: 19,oct,2022]

Como se mencionó para los cálculos del diseño teórico se tomaron en cuenta las condiciones de la entrega de caudal que le da el afluente al lago, en el cual para esas condiciones nos da un área superficial de 4237 m² aproximadamente, como se evidencia en la imagen 38 esta estrategia plantea hacer don hileras de los humedales las cuales se deberán implementar o ubicar de forma casi horizontal al lago, aunque en los cálculos teóricos se estableció una longitud y un ancho de 4 y 1 m respectivamente, se deberían hacer 265 humedales con estas dimensiones para poder cumplir el área superficial de una hilera de los humedales (cada hilera sería de 2080 m² como se observa en la imagen 38), teniendo esto en cuenta y la sección de cada hilera se cumpliría el área superficial teórica calculada.

Los humedales flotante propuestos se compondrían de la siguiente manera:

Figura 40

Estructura de un humedal flotante para la estrategia en cuestión



Nota. La estructura de la izquierda deberá tener las dimensiones de largo y ancho mencionadas para la aplicación en el lago. Tomado de: J. Martelo and J. A. L. Borrero, "Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte". [En línea]. Disponible: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-91652012000100011.

La estrategia que se propone consiste en aplicar los humedales flotantes en los puntos críticos para el lago Sochagota, estos puntos son principalmente la desembocadura del afluente natural (quebrada Honda – río Salitre) esto porque su afluente tiene gran influencia con respecto a la salinidad del lago en temporadas de bajas precipitaciones.

La aplicación de estos humedales también sería en las zonas internas del lago, estas zonas vendrían siendo las que presentaron una mayor conductividad eléctrica (CE) esto porque la conductividad eléctrica se relaciona con la salinización del agua debido a que los iones presentes en el agua conducen electricidad de manera más eficiente, o sea, a medida que la concentración de sales aumenta en el agua, la conductividad eléctrica también aumenta. Con esto se determinan que los puntos internos al lago serían los siguientes:

- La playa del lago (Coordenadas 05°45'38,1'', 73°07'00,6'')
- Muelle diagonal al restaurante la Fragata (Coordenadas 05°46'00,2'', 73°07'26,3'')

- Lago – Sur-oeste (Coordenadas 05°45`37,0``, 73°07`16,1``)
- Lago – Centro (Coordenadas 05°45`47,0``, 73°07`36,1``)
- Lago – Nor-este (Coordenadas 05°45`51,8``, 73°06`55,0``)
- Alrededor compuerta de la salida del lago (Coordenadas 05°46`02,4``, 73°06`53,1``)
- Lago – Norte (Coordenadas 05°46`03,1``, 73°07`08,4``)

Estos puntos presentan una conductividad alta ($>2000 \mu\text{S}/\text{cm}$), es alta comparándola con la estándar para estos cuerpos de agua $500\text{-}2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ [34], por lo cual es ideal la aplicación de los humedales flotantes.

Se eligió el diseño de un humedal subsuperficial de flujo horizontal no solo por las razones mencionadas, sino también para aprovechar el flujo de agua que proviene de la quebrada Honda – río salitre. Para esta propuesta se tiene en cuenta tener un monitoreo similar al encontrado en la literatura, por ende, los monitoreos se deben hacer semanalmente para ver si los materiales y planta seleccionada para la construcción de los humedales son los ideales para ayudar a la reducción de contaminantes en el agua y sobre todo para evidenciar si la conductividad del agua y por ende los iones salinos van disminuyendo con el tiempo.

Cabe aclarar que los muestreos de esta estrategia se van a comparar con los parámetros máximos para el agua de riego, esto porque los valores del agua de riego nos ayudaran a identificar si realmente los parámetros de interés que son las sales presentes en el lago están disminuyendo.

Para esta estrategia es necesario hacer un reconocimiento del terreno, este reconocimiento se divide en las posibles pendientes que se pueden dar en el lago y la disponibilidad de terreno, también se requiere información sobre la hidroclimatología del municipio de Paipa, esto porque las precipitaciones, evapotranspiraciones, infiltraciones y flujos superficiales llegan a afectar no solo a los humedales y a las plantas que se encuentran en él, sino también al lago Sochagota; teniendo esta información se puede llegar a garantizar una implementación exitosa de los humedales.

Uno de los puntos fuertes de esta estrategia van hacer los monitoreos que se deben realizar, esto porque el funcionamiento de los humedales presenta particularidades que influyen en los muestreos, la particularidad más importante es que su capacidad de depurara se va a ver afectada por variaciones climatológicas que se dan a lo largo del año (temperatura, humedad, viento, etcétera); por esta misma razón la puesta en marcha de los humedales requiere de periodos largos de tiempo (meses hasta un año), se requiere de este tiempo puesto que los humedales están ligados a la madures biológicas de las plantas y por ende su poder de depuración.

Teniendo en cuenta lo anterior se propone que los monitores para ver el rendimiento de los humedales se deben hacer: 1) por lo menos un muestreo durante cada estación del año, para registrar y controlar la forma en que afecta a su funcionamiento, 2) los muestreos deben realizarse durante la mayor cantidad posible de meses (preferiblemente 4 por mes), desde el inicio de su operación y 3) la madurez de los sistemas se refleja en una capacidad depuradora más o menos constante, su disminución indica el inicio de algún problema por lo cual se deberá evaluar si el problema radica ya sea en las plantas seleccionadas o el loa materiales del humedal.

Para esta estrategia se hace énfasis en la planta *Acrostichum Aureum*, esta planta evidencio eficiencias de remoción superiores al 90%[41] en aguas con contaminantes similares a las del lago Sochagota. Se aclara que la cantidad de plantas a cultivar en este humedal dependerá del diseño del mismo y de la forma en cómo se distribuyan las plantas dentro del humedal.

Este porcentaje de remoción se le puede atribuir a las características epidérmicas, parenquimáticas, mecánicas, peciolares, xilemática y floemáticas que posee la *Acrostichum Aureum*, estas características biológicas catalogan a la *Acrostichum Aureum* como una bio-indicadora de salinidad y a su vez como una planta desalinizadora de ecosistemas acuáticos.

Los humedales flotantes no solo se tienen en cuenta por los factores y la metodología mencionada sino también por un factor estético, en Colombia la ley 2811 de 1974 (parte XII) habla sobre la protección de los recursos hídricos y la protección de sus paisajes,

los humedales flotantes ayudan a embellecer de cierta forma los lagos y ríos, ya que por su aspecto se camuflan con el ambiente.

Figura 41

Humedales Flotantes en “Los Lagos del Dique” en Xalapa, Veracruz



Nota. La imagen demuestra la aplicación de los humedales flotantes. Tomada de: E.J. Olgún, “Agua contaminada y Fitotecnología”, [En línea]. Disponible: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1715-agua-contaminada-y-fitotecnologias#:~:text=Las%20fitotecnolog%C3%ADas%20son%20E2%80%9CSoluciones%20Basadas,%3A%20agua%2C%20contaminaci%C3%B3n%2C%20fitotecnolog%C3%ADas.>

Y tanto en el lago Sochagota como en la quebrada Honda – río Salitre, los humedales embellecerían las zonas lo cual daría un atractivo al sector turístico del municipio.

Figura 42

Zonas donde se podrían aplicar los humedales flotantes



Nota. Estos puntos corresponden a la quebrada Honda y al lago Sochagota, sacadas de la campaña realizada para la caracterización.

Cabe aclarar que a pesar de que existe dos métodos aplicados para el saneamiento de lagos solo se tomó en cuenta la Fitotecnología esto porque este método tiene diversidad de aplicaciones para tratar diferentes problemas sobre el agua; en cambio la implementación de los microorganismos beneficiosos actualmente solo se aplica para lagos con una alta eutrofización.

Esta estrategia puede tener varias complejidades a la hora de su aplicación, dichas complejidades son:

- Elegir los materiales más idóneos para la elaboración de los humedales para el lago y la quebrada honda.
- Determinar la familia de plantas con mejor rendimiento en la reducción de sales.
- Dar una buena distribución a los humedales tanto a lo largo como ancho del lago (más que todo en los puntos mencionados) y la quebrada honda.
- En temporadas con lluvias evitar que los humedales se muevan (trasladen) y que se hundan.

Es importante mencionar que los humedales flotantes (Fitotecnología) ya se ha implementado con la planta *Acrostichum Aureum*, en esta aplicación se evidencio buenos rendimientos de remoción (80-90%) [41] con respecto a ciertos parámetros fisicoquímicos.

Figura 43

*Prototipo de humedal flotante con
Acrostichum Aureum*



Nota. En la imagen se presencia estéticamente el humedal flotante que realizaron para evidenciar la remoción de contaminantes con la planta *Acrostichum Aureum*. Tomado de: J.I. Díaz Recio y Ospina Vargas M.L., Estudio preliminar de la técnica de Fitorremediación en vertimientos relacionados con aguas residuales industriales, tesis pre. Facultad de Ingenierías, UNAD, Palmira, Colombia, 2019.

En este estudio realizado por Díaz Jorge y Ospina María [41], se realizaron 8 monitoreos en 60 días, en los cuales se obtuvieron los siguientes resultados respecto a los contaminantes:

Tabla 36

Datos iniciales y finales del tratamiento de agua residual con Acrostichum Aureum

Parámetro	Unidad de medida	Análisis inicial	Análisis final
Dureza total	mg/L CaCO ₃	115,65	266,00
Dureza Cálcica	mg/L CaCO ₃	31,95	52,11
Cloruros	mg/L Cl ⁻	262,75	4,72
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	45,43	292,30
Sulfatos	mg/L SO ₄	< 6,6	27,94
Sólidos suspendidos totales	mg/L	300,00	< 28,1
Sólidos sedimentales	mL/L	1,50	0,00
SAAM	mg/L	29,16	10,20
Fosfatos	mg/L P-PO ₄	1,73	< 0,1
Color aparente	UPC	300,00	30,00
Acidez	mg/L CaCO ₃	0,00	0,00
Nitritos	mg/L N-NO ₂	0,15	0,03
Nitratos	mg/L N-NO ₃	0,99	0,24
Cadmio	mg/L	< 0,1	< 0,1
Plomo	mg/L	< 0,1	< 0,1
Fosfato total	mg P/L	4,65	0,60
Turbiedad	NTU	681,00	1,97
Nitrógeno total	mg N/L	32,40	5,33
Grasas y aceites	mg/L	108,00	46,00
Amonio	mg/L N-NH ₃	0,20	0,12
pH	pH	6,90	7,90

Nota. En la tabla se evidencia la reducción de ciertos parámetros fisicoquímicos en un tiempo de 60 días con *Acrostichum Aureum*. Tomado de: J.I. Díaz Recio y Ospina Vargas M.L., Estudio preliminar de la técnica de Fitorremediación en vertimientos relacionados con aguas residuales industriales, tesis pre. Facultad de Ingenierías, UNAD, Palmira, Colombia, 2019.

No solo estos autores han tenido éxito en la aplicación de los humedales flotantes para hacer el proceso determinado como fitorremediación, también los siguientes autores han tenido éxito al aplicar cierto grupo de familias de plantas a aguas contaminadas con material orgánico, inorgánico y biológico:

En el trabajo de Yoma Isabel Mendoza Guerra, Fernando Luis Castro Echavez, Julio César Marín Leal y Elisabeth Hedwig Behling Quintero, que lleva por nombre “Fitorremediación como alternativa de tratamiento para aguas residuales domésticas de la ciudad de Riohacha (Colombia)” [53], implementaron plantas *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua común) para la depuración de aguas residuales domésticas, en este estudio monitorearon parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos como pH, oxígeno disuelto, amonio, ortofosfato, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), coliformes totales y fecales.

Los resultados muestran que la calidad del efluente tratado cumple en su mayoría con los límites máximos permisibles establecidos en la legislación Colombiana, obteniéndose la mejor eficiencia de remoción en las unidades con plantas, para porcentajes de remoción de 99,9% de amonio; 93,1% de ortofosfato; 93,9% de materia orgánica (DQO); 91,6% de materia orgánica (DBO5); 99,9% de coliformes totales y fecales. [53]

La metodología que se implementó en este estudio fue a escala laboratorio, en la cual implementaron seis cubetas de vidrio de: 0,25 m de ancho, 0,75 m de largo y 0,45 m de profundidad, y un volumen de 0,084 m³, de estas seis cubetas a tres se les aplicaron las *E. crassipes* y a las otras tres solo contenían el agua a tratar. Este estudio tardó un tiempo de 225 días y el sistema de tratamiento se dejó a la intemperie.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 37

Tabla comparativa de los valores obtenidos con E. crassipes

Parámetros	Control sin plantas	Control con plantas
pH	8,779	7,238
Oxígeno disuelto (mg/L)	2,95	1,266
Amonio (mg/L)	0,005	0,002
Ortofosfato (mg/L)	1,942	0,986
DQO (mg/L)	50,07	39,93
DBO (mg/L)	31,62	21,29

Nota. La tabla muestra los valores medio de los parámetros evaluados en el estudio. Tomado de: Fitorremediación como alternativa de tratamiento para aguas residuales domésticas de la ciudad de Riohacha (Colombia). [en línea]. Disponible: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702016000200004. [Acceso: ene, 16,2023].

Otro estudio realizado por Guiselle Negover Briñez Vásquez, Carlos Eduardo Solano Aconcha, Juan David Sandoval Echavarría, Angie Lorena Rojas Lomelin, Gilberto Agudelo Jiménez, que lleva por nombre “Fitorremediación de aguas contaminadas con componentes de amalgama de la preclínica de odontología de la Universidad Antonio Nariño, Ibagué (Colombia)”, evidencio que plantas acuáticas como las *Eichhornia crassipes* y las *Pistia stratiotes*, son buenas removedores de metales [54], las remociones obtenidas fueron superiores al 50% [54].

La metodología de este estudio es similar al de las aguas residuales domésticas, en recipientes de plástico de 40 cm x 30 cm x 10 cm se agrego el agua a tratar con las plantas en cuestión (*Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes*) y sin ellas, el estudio duro un tiempo de 20 días en los cuales el objetivo principal fue determinar la fitorremediación de estas plantas en las aguas resultantes en tratamientos de ortodoncia, en el estudio los parámetros en cuestión fueron las concentraciones de metales como el cobre, plata, mercurio y estaño, a continuación, se muestran los resultados de este estudio:

Tabla 38

Concentraciones del agua antes de la fitorremediación

Metal pesado	Unidad	Concentración	
		Máximo	Mínimo
Cobre (Cu)	mg/L	3,14	0,1
Estaño (Sn)	mg/L	1	1
Plata (Ag)	mg/L	0,05	0,05
Mercurio (Hg)	mg/L	0,006	0,001

Nota. La tabla evidencia los resultados obtenidos en el segundo estudio a resaltar. Tomado de: Fitorremediación de aguas contaminadas con componentes de amalgama de la preclínica de odontología de la Universidad Antonio Nariño, Ibagué (Colombia). [En línea]. Disponible: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actaodontocol/article/view/79359>. [Acceso: ene, 16, 2022].

En este estudio se realizaron monitoreo de concentraciones de los metales en cuestión durante 20 días y estos fueron los resultados de remoción con las plantas *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes*:

Tabla 39

Porcentaje de efectividad de remoción de metales pesados para las plantas acuáticas Eichhornia crassipes y Pistia stratiotes

Metal pesado	Pistia stratiotes		Eichhornia crassipes	
	Máx. - Mín.	Efectividad	Máx. - Mín.	Efectividad
Cu	8,160-7,230	11,40%	4,860-1,360	72,02%
Sn	2,440-1,000	59,02%	1,360-1,000	99,93%
Ag	0,050-0,050	0,00%	0,161-0,050	68,95%
Hg	2,770-0,072	97,40%	2,550-0,007	99,13%

Nota. La tabla evidencia la efectividad de las plantas macrófitas para el tratamiento de las aguas procedentes de tratamientos de ortodoncia. Tomado de: : Fitorremediación de aguas contaminadas con componentes de amalgama de la preclínica de odontología de la Universidad Antonio Nariño, Ibagué (Colombia). [En línea]. Disponible: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actaodontocol/article/view/79359>. [Acceso: ene, 16, 2022].

Los estudios que se mencionaron, aunque no son exactamente fitotecnologías aplicadas a cuerpos de agua superficiales (lagos, ríos...) tienen una relación con el lago Sochagota, esta relación es que comparten parámetros que contiene el lago y de cierta forma como se podrían reducir estos parámetros con las macrófitas mencionadas. Estos estudios demuestran también que la fitorremediación y/o Fitotecnología es viable para la depuración de aguas contaminadas, dependiendo del tipo de agua o en su defecto de los parámetros predominantes que posea el agua se podrán aplicar ciertas macrófitas para el tratamiento de aguas.

7. CONCLUSIONES

El lago Sochagota se ve muy afectado por diferentes aspectos los cuales incurren en problemáticas diferentes tanto en el agua como en la biodiversidad que posee, estos aspectos son tanto de tipo natural como antropogénico, en el cual el que tiene más influencia sobre el lago es el antropogénico; esto ya que al lago llegan corrientes con diferentes tipos de “cargas” (o sea corrientes provenientes del sector agrícola, minero y domestico).

Se determinó que el agua del lago y la quebrada honda se encuentra por fuera de los rangos establecidos en el año 2019 por Corpoboyacá, esto mediante la última caracterización físico-química que se le realizo al lago Sochagota y a la quebrada Honda – río Salitre (ver anexos).

Por medio de revisiones bibliográficas se determinaron dos puntos con mucha influencia en el lago Sochagota con respecto a los niveles de sal que presento el lago en diferentes años, estos puntos son primeramente el afluente natural del lago (quebrada Honda – río Salitre) y los afloramientos de aguas termales y termominerales que tiene el municipio de paipa por el fallo geológico del departamento de Boyacá. También se determinaron factores hidroclimáticas que favorecen a que el lago se empiece a salinizar en ciertas temporadas del año; y factores “humanos” tal como la apertura de la compuerta del lago.

El porcentaje de remoción teórico de contaminantes en humedales flotantes depende de diversos factores, como la composición química del contaminante, la concentración inicial, las condiciones ambientales, la estructura del humedal flotante y el tipo de microorganismos presentes. En general, los humedales flotantes pueden remover una amplia variedad de contaminantes, incluyendo nitrógeno, fósforo, metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos. Sin embargo, el porcentaje exacto de remoción de contaminantes en un humedal flotante puede variar considerablemente, y suele ser difícil de predecir con precisión.

En la tabla 39 se evidencia que en el lago Sochagota predominan más los cloruros que los sulfatos, esto por los datos obtenidos respecto a la concentración de los mismos, por lo cual la planta *Acrostichum aureum* es ideal para tratar el lago, esto porque tiene un buen porcentaje de remoción (más del 95%).

De acuerdo con las soluciones/estrategias mencionadas en los capítulos anteriores, se descartan varias estrategias por su complejidad e inversión que se les debe hacer para su funcionamiento, por lo cual la Fitotecnología resalta, esta tecnología fue y es la más viable teniendo en cuenta los factores tanto de las zonas de aplicación como de la misma tecnología; pero se aclara que es una solución a largo plazo.

Con el muestreo realizado en el lago Sochagota se pudo evidenciar que el punto muestreado más cercano a la desembocadura del río salitre tiene una conductividad más alta en comparación con el otro punto muestreado, aunque la conductividad no fue muy elevada en comparación a otros años se resalta que la estación del año influye en este comportamiento o tendencia de la conductividad.

La información mencionada con respecto a los niveles de conductividad en los diferentes tipos de aguas dan un rango y una clasificación en general para el agua dependiendo de sus valores de la conductividad eléctrica (CE), los puntos muestreados por Corpoboyacá en el lago Sochagota tienen en promedio una (CE) de 2238,24 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y haciendo su correspondiente conversión tenemos que la concentración eléctrica promedio del lago Sochagota es de 0.2238 S/m, este resultado nos indica que el agua del lago Sochagota si está teniendo una alta conductividad para ser un agua de un lago (agua dulce y/o potable), y también que el agua presenta una mayor interacción con sus afloramientos termales en temporadas de bajas precipitaciones.

En el estudio donde se extrajo y adapto la tabla del porcentaje de remoción (>90%) de *Acrostichum aureum* versus parámetros fisicoquímicos y biológicos cabe resaltar que estos resultados se dieron en un periodo de 60 días y con solo dos plantas *Acrostichum aureum*, con esto mencionado se puede llegar a concluir que para el lago Sochagota el periodo de remediación pueda ser más extenso por el caudal que entra al lago por su afluente natural y por la concentración de los diferentes compuestos ya mencionados que afectan a una salinización elevada en el lago.

De la estrategia propuesta se puede concluir que es una solución a largo plazo ya que la funcionalidad de las plantas dependen de factores externos tal como lo es el sol (rayos UV) para que puedan hacer la fotosíntesis y así realizar la fitorremediación, también se concluye que esta propuesta es la más viable puesto que permite avanzar hacia un

desarrollo sustentable, es decir, fundamentar sus actividades sobre tres principios esenciales, ser sustentable económicamente, socialmente y ambientalmente; en esta dirección, consideramos que esta propuesta cubre los tres campos.

De las caracterizaciones encontradas bibliográficamente se concluye que los humedales intercontinentales (lagos, lagunas ...) cuando están sometidos a grandes tensiones socio-ecológicas se evidencia una gran afectación hacia estos, un ejemplo de esto es el potencial de salinización del cual el lago es muy propenso a salinizarse, también el potencial de salinización representa la presencia de iones y sales en solución, este potencial refleja el efecto sinérgico de las tensiones naturales y antropogénicas que ocurren en el sistema, la elevada salinidad que presenta el lago y la sensibilidad frente a la salinización que tienen los cultivos que se desarrollan en sus inmediaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Alcaldía de Paipa, mi municipio (s.f.). "Pasado, Presente y Futuro". [En línea]. <https://www.paipa-boyaca.gov.co/mimunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>. [Acceso: julio, 20, 2022]
- [2]. G.R. Cifuentes, J. Jiménez Millán, C.P. Quevedo, A. Gálvez, J. Castellanos Roza y R. Jiménez-Espinosa, "Trace element fixation in sediments rich in organic matter from a saline lake in tropical latitude with hydrothermal inputs (Sochagota Lake, Colombia): The role of bacterial communities", *Science of The Total Environment*, p.2,2020.
- [3]. J.C. Monroy Ramírez, A.J. Espinosa Ramírez y Jiménez Avella W.A., "Hidroclimatología local e impactos en el lago Sochagota, Paipa, Boyacá". *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina* Vol. 31(1),pp. 53-72,jul.2021.
- [4] A.E. Leguizamón Díaz, "Determinación de los impactos ambientales del turismo en el lago Sochagota de la ciudad de paipa ", Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Duitama, Colombia.
- [5] L. M. Barco R., M. Méndez A., *Identificación de las características hidrológicas y sanitarias del lago Sochagota y de fuentes de agua termomineral en el municipio de paipa, Boyacá*, tesis pre. Facultad de ingenierías físico-químicas, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2010.
- [6] G.R. Cifuentes Osorio y J.D. Prado García, "Índices fisicoquímicos de contaminación: aplicación y diagnóstico de la calidad de las aguas de un lago alto andino (lago Sochagota - Colombia)". *Revista LASIRC* vol. 01 (3) pp. 9-11.
- [7] A.E. Leguizamón Díaz, "Determinación de los impactos ambientales del turismo en el lago Sochagota de la ciudad de paipa ", Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Duitama, Colombia.
- [8] L. Antonio Silva Rubio -Coordinador Andrea and B. Huertas, "Presentación 7 contenido Superintendencia de industria y comercio Grupo Banco de Patentes." [En línea]. Disponible: www.commons.wikimedia.org [Acceso: jul. 21, 2022].
- [9] E. Rodie, "Tratamiento de aguas residuales capitulo IV," México D.F., 2013

- [10] Belzona Inc., “Tratamiento de Aguas Residuales mapa de la Plata,” Miami, USA, 2010. Accessed: Apr. 22, 2021. [Online]. Available: https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf
- [11] HANNA instruments. (s.f.). “¿QUÉ ES EL PH?”, [En línea]. <https://www.hannacolombia.com/blog/post/447/que-es-el-ph>. [Acceso: jul, 10,2022].
- [12] Y. Solís Castro, L. Alberto Zúñiga Zúñiga, D. Mora Alvarado y D. Mora Alvarado. “La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica”. *Tecnología en Marcha*, vol. 31 (1), pp. 35–46, 2018, doi: 10.18845/tmv31i1.3495.
- [13] “Volumetría de precipitación.” Accessed: Apr. 21, 2021. [Online]. Available: <http://ing.unne.edu.ar/pub/quimica/ab2/TP4.pdf>.
- [14] J. D. Bolaños-Alfaro, G. Cordero-Castro, and G. Segura-Araya, “Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica),” *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 30, no. 4, p. 15, 2017, doi:10.18845/tmv30i4.3408.
- [15] J. Reynerio, F. Castillo, and P. González Hernández, “Aguas naturales, minerales y mineromedicinales Autores.”
- [16] Definición. DE, “TROFICO”, [En línea]. <https://definicion.de/trofico/>. [Acceso: 23ago,2022]
- [17] Nogueira, Vicente P. Q. *Qualidade da água em Lagos e Reservatórios* In: Porto, R. L. L.; Branco, S. M.; Cleary, R. W. et al. *Hidrologia ambiental*. v.3. São Paulo: Edusp: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1991.
- [18] Real Academia Española. “dársena”. *Diccionario de la lengua española* (23.^a edición). [En línea]. <https://dle.rae.es/d%C3%A1rsena>. [Acceso:23,ago,2022].

- [19] Dodds, Walter K. Ecología de las aguas dulces : conceptos y aplicaciones ambientales de la limnología. Whiles, Matt R. (2ª edición). Burlington, MA: Academic Press. ISBN 9780123747242. OCLC 784140625, 2010
- [20] Water on the web, “Columna de agua”. [En línea]. <http://waterontheweb.org/resources/glossary.html#W>
- [21] F. J. Monkhouse. Diccionario de términos geográficos. “Afluente”. Barcelona: Oikos-Tau Editores, 1978
- [22] The River Thames its geology. “Geography and vital statistics from source to sea”. 16 de mayo de 2010. Archivado desde el original el 16 de mayo de 2010., The-River-Thames.co.uk
- [23] Diccionario Abierto y colaborativo, “Significado de oligohalinos”. [En línea]. <https://www.significadode.org/oligohalinos.htm> [Acceso: 22,ago,2022].
- [24] Cirujano, S. Pródromo de la flora acuática española: aguas leníticas. Limnetica, 6(1), 277-281. [En línea]. <https://doi.org/10.23818/actas.06.35>
- [25] Diseño de Redes de Abastecimiento: El Depósito y la Red de Distribución, “Depósitos”, [En línea]. <https://cidta.usal.es/cursos/redes/modulos/libros/unidad%203/depositos.PDF>.
- [26] Ávila., J. Pablos and C. Pelayo, “Estudio Sobre Protección De Ríos, Lagos Y Acuíferos Desde La Perspectiva De Los Derechos Humanos.” Universidad nacional autónoma de México, 2018.
- [27] HIDROTEC, “*Tipos de aguas residuales: por qué es importante conocerlas*”. [En línea]. <https://www.hidrotec.com/blog/tipos-de-aguas-residuales/#que>. [Acceso: 20,ago,2022].
- [28] Cordochem Envitech, “TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES”. [En línea]. Disponible: <https://condorchem.com/es/tratamiento-de-aguas-residuales-industriales/>. [Acceso: 23, ago,2022]

- [29] INECOL. (s.f.). "Agua contaminada y fitotecnologías". [En línea]. Disponible: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1715-agua-contaminada-y-fitotecnologias>. [Acceso: 26, ago, 2022]
- [30] S. Ríos, R. Agudelo y L. Gutiérrez. "Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano." Febrero, 2017, [PDF], Disponible: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnsp/v35n2/0120-386X-rfnsp-35-02-00236.pdf>.
- [31] Biohac "Limpieza y estabilización de lagos y reservorios". [En línea]. Disponible en: <http://www.biohac.com/limpieza-y-estabilizacion-de-lagos-y-reservorios/#:~:text=Limpieza%20de%20lagos%20y%20plantas>.
- [32] O. Usaquén., Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas, tesis doctoral. Dpto. De ciencias y técnicas del agua y del medio ambiente, Universidad de Cantabria, Santander. Colombia, 2017.
- [33] J.C. Monroy Ramírez, A.J. Espinosa Ramírez y Jiménez Avella W.A., "Hidroclimatología local e impactos en el lago Sochagota, Paipa, Boyacá". Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina Vol. 31(1),pp. 53-72,jul.2021.
- [34] Lenntech. (s.f.). "Conductividad del agua". [En línea]. Disponible: <https://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/conductividad/conductividadagua.htm>
- [35] A. Cristaldi, "Chapter 10. Phytoremediation," The Handbook of Environmental Remediation, pp. 268, 2020. . DOI: 10.1039/9781788016261-00268.
- [36] O. Delgadillo, A. Camacho, L.F. Pérez y Andrade M., Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2010.

ADsicos%20como%20el%20color%2C%20el%20olor%2C%20el%20sabor,cloro%20libre%20o%20combinado%20residual.[Acceso: 10,sep,2022]

[45] ECOLECTA S.R.L. (s.f.). "REMEDIACIÓN AMBIENTAL". [En línea]. Disponible: <https://www.ecolectasrl.com/index.php/remediacion-ambiental>.

[46] J. Martelo y J. A. Lara Borrero, " Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte". Ingeniería y Ciencia. Vol. 08 (15) pp.10-24.

[47] Corpoboyacá. "Plan de ordenamiento del recurso hídrico de la cuenca alta y media del río Chicamocha". [En línea]. <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2019/09/informe-porhchicamocha.pdf>.

[48] EcuRed. (s.f.). "Río Chicamocha". [En línea]. Disponible: https://www.ecured.cu/R%C3%ADo_Chicamocha.

[49] aconsa, (s.f.) "Parámetros químicos de calidad del agua: ¿Cuáles incluye la normativa?". [En línea]. Disponible: [https://aconsa-lab.com/parametros-quimicos-calidad-agua-cuales-incluye-la-normativa/#:~:text=de%20consumo%20humano.-,Listamos%20par%C3%A1metros%20f%C3%ADsicos%20como%20el%20color%2C%20el%20olor%2C%20el%20sabor,cloro%20libre%20o%20combinado%20residual.\[Acceso: 10,sep,2022\]](https://aconsa-lab.com/parametros-quimicos-calidad-agua-cuales-incluye-la-normativa/#:~:text=de%20consumo%20humano.-,Listamos%20par%C3%A1metros%20f%C3%ADsicos%20como%20el%20color%2C%20el%20olor%2C%20el%20sabor,cloro%20libre%20o%20combinado%20residual.[Acceso: 10,sep,2022])

[50] ECOLECTA S.R.L. (s.f.). "REMEDIACIÓN AMBIENTAL". [En línea]. Disponible: <https://www.ecolectasrl.com/index.php/remediacion-ambiental>.

[51] iAgua. (s.f.). "¿Qué son las aguas termales?". [En línea]. Disponible: <https://www.iagua.es/respuestas/que-son-aguas-termales>. [Acceso: 10,oct,2022]

[52] Biohbac "Limpieza y estabilización de lagos y reservorios". [En línea]. Disponible en: <http://www.biohbacsas.com/limpieza-y-estabilizacion-de-lagos-y-reservorios/#:~:text=La%20aplicaci%C3%B3n%20del%20in%C3%B3culo%20biol%C3%B3gico,r%C3%A1pida%20de%20algas%20y%20plantas>.

- [53] Y.I. Mendoza Guerra, F.L. Castro Echavez, J.C. Marín Leal y E.H. Behling Quintero. " Fitorremediación como alternativa de tratamiento para aguas residuales domésticas de la ciudad de Riohacha (Colombia)." Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería de Universidad Del Zulia, Vol. 39 (2), pp. 71-79.
- [54] Briñez Vásquez G, Solano Aconcha C, Sandoval Echavarría J, Rojas Lomelin A, Agudelo Jiménez G. Fitorremediación de aguas contaminadas con componentes de amalgama de la preclínica de odontología de la Universidad Antonio Nariño, Ibagué Colombia. Acta Odont Col [en línea] 2019 [fecha de consulta: 27/ene/2023]; Vol.9(2). pp. 59-70. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actaodontocol/article/view/79359>
- [55] J. Martelo y J. A. Lara Borrero, " Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte". Ingeniería y Ciencia. Vol. 08 (15) pp.10-24.
- [56] PROAGUA, "Resolución 3666-06 NOV 2019, Por medio de la cual se establecen los objetivos de Calidad de agua en el Lago Sochagota", Boyacá, Colombia, 06, nov, 2019. [PDF], Disponible: <https://www.corpoboyaca.gov.co/proyectos/manejo-integral-del-recurso-hidrico/calidad-hidrica/>. Acceso: oct,11,2022

ANEXOS

ANEXO 1

RECOMENDACIONES

Antes de aplicar los humedales flotantes para el tratamiento “natural” de cualquier tipo de agua, es esencial hacerle un estudio fisicoquímico al agua para poder concluir que tipo de parámetros predominan en el agua a tratar y de esta forma implementar la familia o los grupos de familias de plantas más eficientes para el tratamiento.

Dependiendo del terreno en el cual se van a aplicar los humedales flotantes y las características del flujo del agua se pueden optar por los diferentes diseño que actualmente existen de estos humedales, también dependiendo del material con el que se construyan los humedales va hacer más fácil la aplicación de ciertos sutratos, y a su vez esto aumenta o reduce la efectividad del humedal.

Se recomienda medir la conductividad eléctrica para establecer la salinización ya que normalmente la concentración de sales se mide por titulación con nitrato de plata (AgNO_3), aunque este tipo de análisis es más costoso y toma más tiempo que las mediciones de conductividad eléctrica.

Se recomienda, que el presente trabajo sea alimentado con más información empírica, por ejemplo, la aplicación del humedal flotante con los materiales, dimensiones y los demás grupos de plantas dialogados en este trabajo (*Artemisia argyi*, *Limonium bicolor*, *Melilotus suaveolens* y *Salsola collina*).

Para poder determinar con exactitud qué tipo de planta (macrófitas) se puede implementar en los humedales para la reducción de sales, se debe realizar una experimentación completa con esta tecnología, esto va a permitir determinar varias cosas; como por ejemplo saber si el diseño teórico es viable para su aplicación, saber los materiales más adecuados para los humedales, también saber con exactitud que plantas son las que mejores eficiencias tendrían (esto varía según las características climáticas del año). Sin embargo, todo lo que se abarco y detallo en el capítulo 4 con referente a las fitotecnologías nos da una guía por donde se debe encaminar la implementación de estas tecnologías en el lago Sochagota.

ANEXO 2

Los anexos de este documento se encuentran en el documento adjunto, dichos anexos no son del autor, son datos reportados por un laboratorio contratado por Corpoboyacá