

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL LAGO SOCHAGOTA
(BOYACÁ) MEDIANTE INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICOS DE BASE
HIDRODINÁMICA**

DIEGO CAMILO GUIO SANDOVAL
Ingeniero Sanitario
Ingeniero Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN HIDROAMBIENTAL
TUNJA
2021

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL LAGO SOCHAGOTA (BOYACÁ)
MEDIANTE INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICOS DE BASE HIDRODINÁMICA**

DIEGO CAMILO GUIO SANDOVAL

Proyecto para optar al título de Magister en Ingeniería civil con énfasis en Hidroambiental

Asesores:

**Juan Pablo González Galvis
Doctor en Environmental Engineering**

**Olga Lucia Usaquén Perilla
Doctora en Ciencias y Tecnologías para la Gestión Ambiental de Sistemas Hídricos**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN HIDROAMBIENTAL
TUNJA
2021**

Tunja, 1 de octubre de 2021

En mi calidad de co-directora de la tesis: **evaluación de la calidad del agua en el lago Sochagota (Boyacá) mediante indicadores socio-ecológicos de base hidrodinámica**, desarrollada por el estudiante de la maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Hidroambiental Diego Camilo Guío Sandoval, manifiesto que este estudio da continuidad a mi tesis doctoral, titulada: **Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas**, la cual fue desarrollada y culminada en abril de 2017 en la Universidad de Cantabria (España). Por lo anterior, autorizo el uso de la información y del modelo hidrodinámico derivados de mi tesis doctoral y que han sido incluidos como parte de la tesis de maestría que a continuación se presenta. Con este estudio se avanza en establecer la correlación entre los indicadores socio-ecológicos y las variables de calidad del agua de importancia ambiental y sanitaria evaluadas en el caso de estudio.

En el mismo sentido, resalto como investigadora principal del proyecto (Contrato FP 44842-293 de 2018): **Resiliencia y gestión de sistemas socio-ecológicos estratégicos para la actividad agrícola, en escenarios de variabilidad climática. caso de estudio: lago Sochagota (Boyacá, Colombia)**, que esta tesis de maestría, así como, el apoyo a la formación del estudiante, forman parte de los productos del proyecto, lo cual busca contribuir con los procesos de fortalecimiento de la investigación regional.

El proyecto FP 44842-293 de 2018 fue ejecutado en el marco de la convocatoria 794 de 2017 - proyectos de I+D para el desarrollo tecnológico de base biológica del departamento de Boyacá, por los Grupos de investigación Gestión Ambiental, Procesos y Calidad del software, Gestión de Recursos Hídricos de la Universidad de Boyacá, como entidad ejecutora y en alianza con la Alcaldía de Paipa (Boyacá, Colombia), Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia), Fundación Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (Santander, España). Por lo anterior, se autoriza el uso de la información derivada del proyecto FP 44842-293 de 2018 y que ha sido referenciada como parte de la tesis de maestría.

Finalmente, se exonera a la Universidad Santo Tomás, al director y jurados de la tesis, de cualquier inconveniente que pudiera derivarse del uso de esta información como parte del estudio de maestría en mención, toda vez que las fuentes han sido debidamente referenciadas en el documento.



Olga Lucía Usaquén Perilla
Co- directora tesis de maestría

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis maestros, aquellos que han sido un ejemplo, que han guiado mis pasos y que día a día con sus enseñanzas me formaron: Mi madre, mis profesores y mis amigos.

Agradecimientos

Inicialmente agradezco a la universidad de Boyacá, quien me permitió participar en el grupo de Gestión del recurso hídrico, ya que esta investigación fue financiada con apoyo del Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia, el programa Colombia BIO y la Gobernación de Boyacá, con recursos del Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías, administrado por el Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación “Francisco José de Caldas”.

En segunda instancia al equipo interdisciplinario que forma parte del Proyecto SIE y a los actores involucrados (Corpoboyacá, IDEAM, Municipio de Paipa). A los aliados de la Universidad de Antioquia y del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.

Finalmente, agradezco a mis asesores Juan Pablo González Galvis y Olga Lucia Usaquén Perilla, quienes guiaron en el desarrollo del presente trabajo.

Nota de aceptación

Firma presidente Jurado

Firma Jurado

Firma Jurado

Resumen

Los sistemas hídricos se ven sometidos a tensiones naturales o de origen antrópico, que afectan el uso del agua, su disponibilidad, calidad, su estado ecológico y sostenibilidad. El presente estudio, se desarrolla en el marco del proyecto: Resiliencia y gestión de sistemas socio-ecológicos estratégicos para la actividad agrícola, en escenarios de variabilidad climática. Caso de estudio: lago Sochagota (Boyacá, Colombia) y se orienta, a establecer la relación entre variables de calidad del agua e indicadores socio-ecológicos de base hidrodinámica. La modelización numérica de la hidrodinámica y de los fenómenos de transporte en el lago, se emplea para la aplicación de la metodología OSSEM. Esta metodología vincula factores hidrológicos, climáticos, ocupación de área y el volumen de almacenamiento, con tensiones asociadas a la dinámica de oferta, uso y calidad del agua. Los efectos de salinización, déficit hídrico y eutrofización en el lago Sochagota, se evalúan mediante indicadores socio-ecológicos de base hidrodinámica.

El comportamiento de dichas variables se analiza bajo diferentes periodos climáticos (año 2015 (año fenómeno del niño) para los meses de febrero (periodo de mayor precipitación) y agosto (menor precipitación), 2016 el mes de octubre (mes con mayor precipitación) y 2017 para los meses de febrero (baja precipitación) y septiembre (precipitación media)), con el fin de establecer la correlación entre los indicadores y la calidad del agua (parámetros físico-químicos y microbiológicos) medidos en el mismo periodo de tiempo.

Empleando un modelo hidrodinámico desarrollado en el software Delft3D, se calculan los indicadores socio-ecológicos (potencial de renovación, potencial de salinización y potencial de déficit hídrico) en el Lago. Los resultados, permiten encontrar correlaciones significativas ($p < 0.01$) entre los indicadores y variables clave de calidad del agua, tales como DBO₅, DQO, clorofila a, sólidos totales y suspendidos, nitritos, nitratos, coliformes totales, entre otras.

Tabla de contenido

Resumen	vi
Tabla de contenido	vii
Lista de tablas	x
Lista de figuras	xiii
:	
1. Introducción	15
1.1. Objetivos de la investigación	20
1.2. Contribución de la investigación	20
1.3. Metodología de la investigación	22
1.3.1. Descripción del sistema.	24
1.3.2. Modelación hidrodinámica del sistema.	25
1.3.3. Cálculo y valoración de descriptores estratégicos.	26
1.3.4. Valoración de la susceptibilidad a eutrofización, salinización y déficit hídrico.	30
1.3.5. Evaluación de la gestión ambiental del sistema.	30
1.3.6. Correlación de los parámetros de Calidad, hidrodinámica e indicadores de gestión.	32
1.3.7. Generación de medidas de gestión.	32
1.4. Estructura de la tesis	33
2. Revisión de la literatura	34
2.1. Estudios de calidad del agua en lagos	34
2.2. Modelos hidrodinámicos en lagos	38
2.3. Otros modelos aplicativos y herramientas de software aplicados en lagos.	42
2.4. Sostenibilidad ambiental	48
2.5. Síntesis de revisión bibliográfica	51
3. Materiales y métodos	53

3.1. Calidad del agua medida en el lago Sochagota	53
3.1.1. Calidad ambiental.	56
3.2. Delft 3D	74
3.3. Datos de origen y calibración del modelo Delft3D para el sistema Lago Sochagota	74
3.4. Análisis estadístico de datos	77
3.4.1. Pruebas de bondad de ajuste.	77
4. Evaluación de la calidad del agua en el Lago Sochagota (Boyacá) mediante indicadores socio-ecológicos de base hidrodinámica.	81
4.1. Descripción del sistema	81
4.1.1. Actividades humanas.	82
4.1.2. Límites del sistema.	83
4.1.3. Características físicas y morfológicas.	83
4.1.4. Condiciones hidrológicas y climáticas.	85
4.1.5. Velocidad del viento	95
4.1.6. Condiciones de operación.	98
4.1.7. Análisis del comportamiento hidrodinámico del lago Sochagota mediante el uso de modelos distribuidos (DELFT 3D).	101
4.2. Cálculo y valoración de los descriptores estratégicos.	106
4.2.1. Cálculo y valoración del potencial de renovación.	106
4.2.2. Cálculo y valoración del potencial de salinización.	115
4.2.3. Cálculo y valoración del potencial de déficit hídrico.	122
4.3. Evaluación de la gestión ambiental	130
4.4. Correlación de los parámetros de calidad con los indicadores de base Hidrodinámica.	131
4.4.1. Pruebas de normalidad.	131
4.4.2. Análisis de correlación de Spearman.	134

5. Evaluación de diferentes escenarios	142
5.1. Cálculo de los descriptores estratégicos e índice OSI	153
6. Conclusiones	161
7. Recomendaciones	169
Referencias	170
8. ANEXOS	178

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1.1. Evaluación del índice OSI con base en la integración de la susceptibilidad a eutrofización, salinización y déficit hídrico	30
Tabla 3.1. Calidad medida en el Lago Sochagota	54
Tabla 3.2. Calidad medida en el lago Sochagota en abril 4 de 2015	57
Tabla 3.3. Calidad medida en el lago Sochagota en agosto 1 de 2015	59
Tabla 3.4. Calidad promedio medida en el lago Sochagota en abril 4 de 2015	62
Tabla 3.5. Calidad promedio medida en el lago Sochagota en agosto 1 de 2015	63
Tabla 3.6. Calidad medida en el lago Sochagota en octubre 24 de 2016	65
Tabla 3.7. Calidad promedio medida en el lago Sochagota en octubre 24 de 2016	67
Tabla 3.8. Calidad medida en el lago Sochagota en febrero 1 de 2017	69
Tabla 3.9. Calidad medida en el lago Sochagota en septiembre 1 de 2017	70
Tabla 3.10. Calidad medida en el lago Sochagota en febrero 1 de 2017	72
Tabla 3.11. Calidad medida en el lago Sochagota en septiembre 1 de 2017	73
Tabla 3.12. Resultados del proceso de calibración para el modelo Delft3D	76
Tabla 4.1. Relación de aperturas de compuertas lago Sochagota	100
Tabla 4.2. Criterios de evaluación del ajuste entre el nivel de agua medido y simulado en el humedal	103
Tabla 4.3. Criterios de ajuste para 2016 y 2017	104
Tabla 4.4. Criterios de evaluación RMSE	104
Tabla 4.5. Límites de Referencia del potencial de renovación (PR) para el Lago Sochagota	107
Tabla 4.6. Umbrales para la valoración de la susceptibilidad frente a la eutrofización, a partir de los valores de los descriptores estratégicos.	108
Tabla 4.7. Cálculo del potencial de renovación (PR) para el Lago Sochagota 4 abril 2015	109
Tabla 4.8. Cálculo del potencial de renovación (PR) para el Lago Sochagota 1 agosto 2015	110
Tabla 4.9. Cálculo del potencial de renovación (PR) para el Lago Sochagota 2016	111
Tabla 4.10. Cálculo del potencial de renovación (PR) para el Lago Sochagota 1 de febrero de 2017	114
Tabla 4.11. Cálculo del potencial de renovación (PR) para el Lago Sochagota 1 de septiembre 2017	114
Tabla 4.12. Conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo, en cultivos que se desarrollan en proximidades del Lago Sochagota	115

Tabla 4.13.	Umbrales para la valoración de la susceptibilidad frente a la salinización a partir de los valores de los descriptores estratégicos.	118
Tabla 4.14.	Cálculo del potencial de Salinización (Ps) para el Lago Sochagota 4 abril 2015	119
Tabla 4.15.	Cálculo del potencial de Salinización (Ps) para el Lago Sochagota 1 agosto 2015	119
Tabla 4.16.	Cálculo del potencial de Salinización (Ps) para el Lago Sochagota octubre 24 2016	120
Tabla 4.17.	Cálculo del potencial de Salinización (Ps) para el Lago Sochagota 1 febrero 2017	121
Tabla 4.18.	Cálculo del potencial de Salinización (Ps) para el Lago Sochagota 1 septiembre 2017	121
Tabla 4.19.	Límites de referencia del potencial de déficit hídrico (PWd) para el lago Sochagota	124
Tabla 4.20.	Umbrales para la valoración de la susceptibilidad frente al déficit hídrico a partir de los valores de los descriptores estratégicos.	125
Tabla 4.21.	Cálculo del potencial de déficit hídrico (Pw) para el Lago Sochagota 4 de abril 2015	126
Tabla 4.22.	Cálculo del potencial de déficit hídrico (Pw) para el Lago Sochagota 1 de agosto 2015	126
Tabla 4.23.	Cálculo del potencial de déficit hídrico (Pw) para el Lago Sochagota 24 de octubre 2016	128
Tabla 4.24.	Cálculo del potencial de déficit hídrico (Pw) para el Lago Sochagota 1 de febrero 2017	129
Tabla 4.25.	Cálculo del potencial de déficit hídrico (Pw) para el Lago Sochagota 1 de septiembre 2017	129
Tabla 4.26.	Evaluación del índice OSI para el Lago Sochagota 1 de septiembre 2017	130
Tabla 4.27.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov para los parámetros de Calidad e indicadores de base hidrodinámica (años 2015,2016,2017)	132
Tabla 4.28.	Prueba de spearman para los parámetros de Calidad e indicadores de base hidrodinámica (años 2015,2016,2017)	135
Tabla 4.29.	Análisis de correlación	137
Tabla 5.1.	Escenarios de simulación aplicación de la metodología OSSEM	142
Tabla 5.2.	Puntos de relevancia - Renovación esc. Actual	144
Tabla 5.3.	Puntos de relevancia - Renovación esc. 1 y 2	145
Tabla 5.4.	Coefficientes de variación espacial para los 3 escenarios.	146
Tabla 5.5.	Cálculo del coeficiente de variación espacial para los 3 escenarios.	147
Tabla 5.6.	Puntos de relevancia – Déficit hídrico esc. actual	148
Tabla 5.7.	Coefficientes de variación para los 3 escenarios	150
Tabla 5.8.	Coefficientes de variación para los 3 escenarios.	151
Tabla 5.9.	Coefficientes de variación para los 3 escenarios.	153
Tabla 5.10.	Resultados indicadores socio-ecológicos para los 3 escenarios del mes de octubre	154

Tabla 5.11.	Resultados categóricos indicadores socio-ecológicos e índice OSI para los 3 escenarios del mes de octubre.	154
Tabla 5.12.	Resultados categóricos indicadores socio-ecológicos e índice OSI para los 3 escenarios.	155
Tabla 5.13.	Resultados categóricos indicadores socio-ecológicos e índice OSI para el escenario actual.	156
Tabla 5.14.	Resultados categóricos indicadores socio-ecológicos e índice OSI para el escenario 1.	157
Tabla 5.15.	Resultados categóricos indicadores socio-ecológicos e índice OSI para el escenario 2.	158

Lista de figuras

	Pág.	
Figura 1.1	Localización del sistema socio-ecológico Lago Sochagota	17
Figura 1.2	Esquema metodológico.	23
Figura 3.1	Puntos de monitoreo	54
Figura 3.2	Muestreo Lago Sochagota 2015.	56
Figura 3.3	<i>Muestreo Lago Sochagota el 24 de octubre de 2016</i>	64
Figura 3.4	Muestreo Lago Sochagota 2017	68
Figura 4.1	Modelo conceptual del lago Sochagota para la aplicación de la metodología OSSEM	82
Figura 4.2	Información de terreno Lago Sochagota	84
Figura 4.3	Curvas del vaso de almacenamiento y condiciones de contorno Lago Sochagota	85
Figura 4.4	Nivel de agua en abril de 2015 en el Lago Sochagota	86
Figura 4.5	Caudal Quebrada Honda en abril de 2015	87
Figura 4.6	Precipitación y evaporación estación Tunguavita abril de 2015	88
Figura 4.7	Nivel de agua en agosto de 2015 en el Lago Sochagota	89
Figura 4.8	Caudal Quebrada Honda en agosto de 2015	89
Figura 4.9	Precipitación y evaporación estación Tunguavita agosto de 2015	90
Figura 4.10	Nivel de agua en octubre de 2016 en el Lago Sochagota	91
Figura 4.11	Caudal Quebrada Honda en Octubre de 2016	91
Figura 4.12	Precipitación y evaporación estación Tunguavita octubre de 2016	92
Figura 4.13	Nivel de agua en febrero de 2017 en el Lago Sochagota	92
Figura 4.14	Caudal Quebrada Honda en febrero de 2017	93
Figura 4.15	Precipitación y evaporación estación Tunguavita febrero de 2017	93
Figura 4.16	Nivel de agua en Septiembre de 2017 en el Lago Sochagota	94
Figura 4.17	Caudal Quebrada Honda en septiembre de 2017	94
Figura 4.18	Precipitación y evaporación estación Tunguavita septiembre de 2017	95
Figura 4.19	Rosa del viento estación Tunguavita año 2015	96
Figura 4.20	Velocidad del viento estación Tunguavita abril de 2015	97
Figura 4.21	Velocidad del viento estación Tunguavita agosto de 2015	97
Figura 4.22	Velocidad del viento estación Tunguavita octubre de 2016	97
Figura 4.23	Velocidad del viento estación Tunguavita febrero de 2017	98

Figura 4.24	Velocidad del viento estación Tunguavita septiembre de 2017	98
Figura 4.25	Nivel del agua en la zona de la compuerta año 2016	103
Figura 4.26	Nivel del agua en la zona de la compuerta febrero del 2017	104
Figura 4.27	Nivel del agua en la zona de la compuerta septiembre del 2017	104
Figura 4.28	Salinidad con respecto a los puntos de referencia	106
Figura 4.29	Variación de la concentración de trazador	110
Figura 4.30	Variación de la concentración de trazador 1 de febrero 2017	112
Figura 4.31	Variación de la concentración de trazador 1 de septiembre 2017	112
Figura 4.32	Análisis del nivel crítico en el Lago Sochagota	123
Figura 4.33	Anomalía de precipitación (mm) para noviembre y diciembre de 2015 y enero de 2016	127
Figura 5.1	Clúster realizado a partir del potencial de renovación en el escenario actual	143
Figura 5.2	Clúster realizado a partir del potencial de renovación en el escenario 1.	144
Figura 5.3	Clúster realizado a partir del potencial de renovación en el escenario 2	145
Figura 5.4	Clúster realizado a partir del potencial de déficit hídrico en el escenario actual.	148
Figura 5.5	Clúster realizado a partir del potencial de déficit hídrico en el escenario 1	149
Figura 5.6	Clúster realizado a partir del potencial de déficit hídrico en el escenario 2.	150
Figura 5.7	Clúster realizado a partir del potencial de salinización en los tres escenario.	151
Figura 5.8	Salinización escenario actual	152
Figura 5.9	Salinización escenario 1	152
Figura 5.10	Salinización escenario 2	153

1. Introducción

Los sistemas hídricos se han visto afectados históricamente a causa de la expansión urbana, agrícola e industrial, realizando intercambio de flujos, principalmente relacionados con las actividades antropogénicas en el área de influencia y con los factores climáticos (Smolders et al, 2015; Newton et al, 2014). Estos flujos pueden generar cambios en su estado ecológico, la sostenibilidad del sistema y características morfológicas, físicas, químicas, biológicas, entre otras (Newton et al, 2014). En este contexto, los sistemas hídricos pueden ser considerados sistemas socio- ecológicos, debido a la interacción humana con el sistema físico. En este caso el recurso agua es el que va a interactuar en el sistema socio ecológico prestando diferentes servicios o usos. (ten Brink et al, 2013; Andrade et al, 2004).

Uno de los principales usos del agua es el agrícola, el cual demanda el 70% del agua superficial y subterránea, de las cuales el 80% son cubiertas por la precipitación (Naciones Unidas, 1992). La agricultura ha sido relacionada con varias problemáticas, tales como la eutrofización, salinización, erosión, desertificación, uso del suelo, contaminación, toxicidad, entre otros (Oliveira et al, 2006; Hertwich et al, 2010). Por esta razón la evaluación de indicadores físico-químicos y biológicos, constituye una herramienta de estudio de los fenómenos que afectan el estado de los sistemas hídricos. Sin embargo, se hace necesario incorporar en el análisis factores climáticos, hidrológicos, hidromorfológicos, además de su relación con las actividades humanas en el área de influencia del sistema (Kondratyev et al, 2002; Dupas et al, 2015); Los sistemas hídricos relacionados con el uso agrícola presentan tres procesos principales con respecto su cambio: i) síntomas primarios y secundarios de eutrofización; ii) salinización; iii) cambio en la disponibilidad o uso del recurso (Liang et al, 2017; Cañedo et al., 2013; Finlayson et al, 2005; Verhoeven, et al, 2006 ; del Barrio et al., 2012).

Capítulo 1 - Introducción

Por otro lado, la intervención en los sistemas hídricos, ha generado una alteración significativa en la calidad del agua, afectando los sistemas económicos, sociales y ambientales; por esta razón diferentes entidades gubernamentales, ambientales, universidades y diversas organizaciones se han preocupado por evaluar el impacto antrópico sobre estos recursos hídricos, a través del estudio de la naturaleza química, física y biológica del agua, mediante programas de monitoreo (Samboni et al,2007).

El sistema de Lago Sochagota, está conformado por la Quebrada Honda – río Salitre (su principal afluente), el cual recibe la influencia de las actividades agrícolas, pecuarias, recreativas, mineras y en general del aprovechamiento del recurso en la cuenca. Dicho afluente recibe descargas provenientes de aguas termales, termominerales, mineralizadas y dulces, luego de su aprovechamiento con fines recreativos (Balnearios la Playa, los Delfines, etc), además de las que se encuentran en el área de influencia cercana al lago, que afloran en su interior o que se articulan con el sistema regional (río Chicamocha) a través de las estructuras conocidas como “dársenas” (Universidad de Boyacá, 2020).

El efluente del lago es regulado también mediante una compuerta que a través de un canal conduce el agua hacia el río Chicamocha. Si bien se han adelantado estudios orientados a establecer mecanismos de mejoramiento de la calidad del agua, la renovación del Lago y el establecimiento de políticas de manejo de las aguas termales, termominerales, mineralizadas y similares, es necesario profundizar en el diseño y formulación de un modelo de gestión que permita no solo una sincronización y regulación de apertura de las compuertas, tanto en el Lago Sochagota, sino en cada uno de los sistemas para el aprovechamiento del recurso, evaluando el efecto en la calidad del agua y en su uso potencial (agrícola en el distrito de riego, para consumo humano, etc).

Capítulo 1 - Introducción

El lago Sochagota se encuentra en la ciudad de Paipa -Boyacá, es un lago construido en el año 1956, sobre el área de drenaje del río Salitre o quebrada Honda, con fines de regulación agrícola y recreación (deportes náuticos). El Lago Sochagota es de gran importancia debido a su conexión con el río Chicamocha, principal fuente de abastecimiento y recurso agrícola en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Figura 1.1).

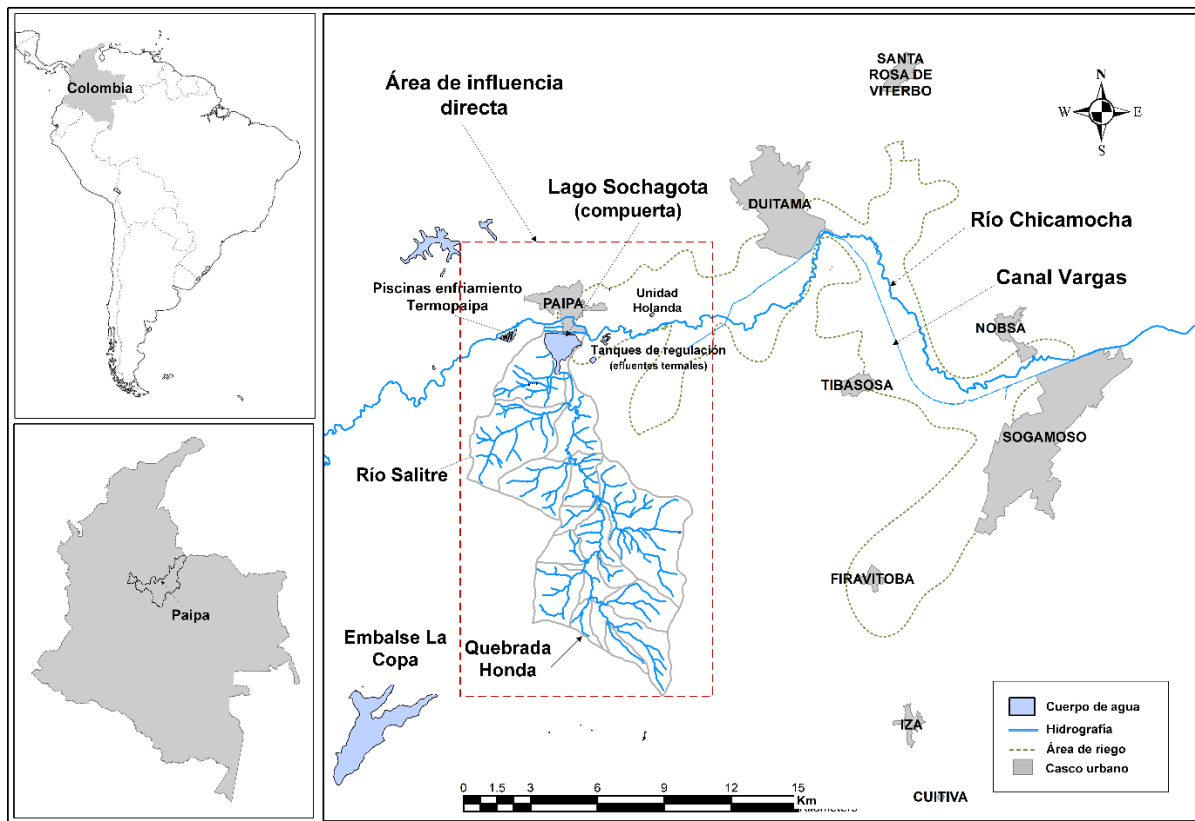


Figura 1.1. Localización del sistema socio-ecológico Lago Sochagota. Tomado de (Usaquén-Perilla, 2017)

El Lago presenta una superficie de 140 ha, con una profundidad media de 2.8 m, los aportes que contribuyen con caudales de diferente calidad son: i) aguas dulces (cuena de la quebrada Honda y río Salitre); ii) contribuciones de agua subterránea (aguas termales, termominerales en la cuena y en el acuífero); iii) precipitación y evaporación directa sobre el lago; iv) los vertidos realizados en la quebrada Honda (de origen doméstico, turístico, agrícola, minero); v) vertidos de

Capítulo 1 - Introducción

agua residual urbana (alivios del colector perimetral al lago); vi) vertidos difusos del sector turístico con diferentes niveles de tratamiento; y, vii) el intercambio con el río Chicamocha regulado por operación de la compuerta (figura 1.1). Usaquén (2017) afirma que:

El Lago ha experimentado un fuerte impacto antropogénico, tanto en el área de influencia cercana como en el ámbito regional. Las actividades agrícolas, pecuarias, recreativas, mineras y, en general, el aprovechamiento del recurso en la cuenca afluyente (526 captaciones en quebrada Honda, según el inventario realizado por la Autoridad Ambiental), se suma al desarrollo del sector turístico en los alrededores del Lago Sochagota, beneficiándose del paisaje y demás servicios que ofrece el Lago. (p 64).

En resumen, tres fuentes principales de contaminación se identifican en el Lago Sochagota: i) vertidos del sistema urbano (alivios del sistema de alcantarillado perimetral); ii) aguas residuales de los sistemas de tratamiento del sector turístico (contaminación difusa); y, iii) 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. El río Chicamocha constituye una de las fuentes de abastecimiento de Duitama y Tibasosa y del sector industrial (p.65).

En sistemas con información ambiental escasa o dispersa, debido a los costos asociados a monitoreo y medición de parámetros fisicoquímicos, es necesario buscar alternativas que permitan tener una evaluación constante de la calidad y sostenibilidad de los sistemas hídricos, es por esto que la información hidrodinámica y climatológica la cual es permanentemente evaluada se hace realmente útil, por lo cual, el uso de indicadores de base hidrodinámica constituye una alternativa que debe ser considerada. La metodología OSSEM (Usaquén Perilla et al, 2012) propone el uso

Capítulo 1 - Introducción

de indicadores socio-ecológicos de base hidrodinámica para optimizar los esfuerzos asociados al uso de variables de evaluación del sistema, sin desconocer la complejidad de los procesos y la disponibilidad de información asociada con variables medidas con frecuencia en los sistemas acuáticos.

La evaluación de sistemas hídricos mediante el uso de herramientas numéricas, ha contribuido con la comprensión de fenómenos complejos, en sistemas naturales y artificiales (Gómez et al, 2014). La presente tesis de maestría se adelanta como parte de los resultados y productos de formación que ha contemplado el proyecto: Resiliencia y gestión de sistemas socio-ecológicos estratégicos para la actividad agrícola, en escenarios de variabilidad climática. Caso de estudio: lago Sochagota (Boyacá, Colombia), para el fortalecimiento de capacidades científicas en la región. El objetivo es establecer la relación entre variables de calidad del agua e indicadores socio-ecológicos de base hidrodinámica propuestos en la metodología OSSEM, generando una alternativa para la evaluación de la calidad del agua del lago. La modelización hidrodinámica y de transporte, se realiza empleando la herramienta Delft3D, cuyos resultados permiten obtener los potenciales de renovación (eutrofización), salinización y déficit hídrico. La información de calidad del agua se adquiere a partir de estudios realizados por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá) y proyecto BIO293 (Universidad de Boyacá), mediante análisis de correlación, se vincula con los indicadores socio-ecológicos de base hidrodinámica.

Capítulo 1 - Introducción

1.1. Objetivos de la investigación

Objetivo general.

Evaluar la calidad en el Lago Sochagota (Boyacá) mediante indicadores socio- ecológicos de base hidrodinámica (potencial de salinidad, renovación y déficit hídrico).

Objetivos específicos.

Analizar el comportamiento hidrodinámico del lago Sochagota, para el periodo comprendido entre 2015 (abril y agosto), 2016 (octubre), y 2017 (febrero y septiembre), mediante el uso del modelo DELFT 3D.

Evaluar los indicadores socio-ecológicos de base hidrodinámica en el lago Sochagota aplicando la metodología OSSEM.

Establecer qué condiciones de calidad se ven más fuertemente vinculadas con la con los indicadores socio-ecológicos, mediante un análisis de correlación.

1.2. Contribución de la investigación

El municipio de Paipa ha desarrollado su economía entorno al turismo, donde se caracteriza el uso de aguas termales para actividades recreativas. En la actualidad las decisiones de manejo del lago Sochagota se realizan según la experiencia de las entidades encargadas y estudios particulares y no continuos, por otro lado, no se ha estudiado la capacidad de respuesta de la calidad ante diferentes escenarios climáticos u operación del sistema. Es decir, la calidad y la hidrodinámica del lago no se ha integrado.

Es por esto que las condiciones de calidad e hidroclimáticas en la cuenca del lago Sochagota, y en su área de influencia requieren estudios que permitan entender la dinámica de operación del lago, y encontrar herramientas que integren las diferentes variables facilitando la toma de decisiones para la operación y el manejo de la misma. Por otro lado, la información

Capítulo 1 - Introducción

ambiental que genera cada uno de los actores involucrados (Corpoboyaca, distrito de riego uso Chicamocha y alcaldía de Paipa), se encuentran en sistemas de información individuales e independientes, lo cual constituye una oportunidad de mejora en la gestión del sistema.

El presente estudio tiene por objeto aplicar una metodología de base hidrodinámica, para la evaluación de la calidad de agua identificando el vínculo entre los parámetros físico-químicos y los indicadores propuestos en la metodología OSSEM. La metodología fue desarrollada para sistemas hídricos en áreas de influencia agrícola, y ofrece una herramienta que permite realizar una evaluación de la operación de sistemas regulados. Para el caso de estudio lago Sochagota, se evalúa la sostenibilidad y la calidad del lago asociado a la información hidrodinámica, la apertura de compuertas e información climatológica local, la cual es permanentemente evaluada en el contexto regional. Por lo anterior, se puede comenzar una aproximación a la formulación de un modelo de gestión que contemple los efectos del manejo del agua proveniente del lago Sochagota, para mejorar su calidad y potencializar su uso (agrícola en el distrito de riego, para consumo humano, turístico en el lago, etc.). contemplando la variabilidad climática, hidráulica y la calidad del sistema.

Esta investigación busca una alternativa económica y viable para la evaluación de las condiciones de calidad del agua, partiendo de la hipótesis de su asociación con la hidrodinámica, por ejemplo, mediante escalas temporales de transporte (TTS), tales como los tiempos de residencia, renovación, drenado, exposición, tránsito, recuperación, entre otros. En este sentido, la calidad del agua se vincula con la hidrodinámica y con los efectos priorizados de eutrofización, déficit hídrico y salinización. Estos procesos ocurren en sistemas hídricos en función de la dinámica climática (precipitación, evaporación, viento) y del intercambio con el medio (cuena,

Capítulo 1 - Introducción

aguas residuales), con el origen y las tasas de aporte geogénico (erosión - disolución del suelo, rocas) y con factores asociados al uso del territorio, entre otros (Sumner & Belaineh, 2005). Una vez identificados los parámetros de calidad que se ven más fuertemente vinculados con los indicadores que evalúa la metodología OSSEM, se podrá utilizar esta herramienta para la toma de decisiones en pro del mejoramiento ambiental del Lago Sochagota. Generando así una herramienta de gestión que permita una correcta operación para el lago Sochagota, a partir de la simulación de diferentes condiciones climáticas y formas de operación, que constituyen escenarios de análisis para mantener la sostenibilidad y calidad del lago el cual descarga al Río Chicamocha.

1.3. Metodología de la investigación

Para el cumplimiento del presente trabajo, se aplicó la siguiente metodología (figura 1.1), la cual en primer lugar realiza el cálculo y valoración de los indicadores socio ecológicos de base hidrodinámica, posteriormente se correlacionarán los resultados de estos indicadores con la calidad físico-química y microbiológica medida históricamente en el Lago Sochagota, en diferentes puntos del sistema y finalmente, se analiza el efecto en los indicadores bajo diferentes escenarios de gestión con apoyo en herramientas de simulación hidrodinámica.

Una vez se identifican las variables de calidad con una correlación significativa con los indicadores de base hidrodinámica, se plantean escenarios que busquen maximizar los beneficios en el sistema socio-ecológico a partir de cambios que puedan ser controlados por los gestores del sistema, tales como, los flujos de entrada o la regulación del caudal de salida.

El planteamiento de escenarios forma parte del ciclo de gestión del sistema, por lo tanto, los cambios de operación propuestos se verán reflejados en los indicadores socio-ecológicos y por lo tanto en la calidad del agua en el sistema.

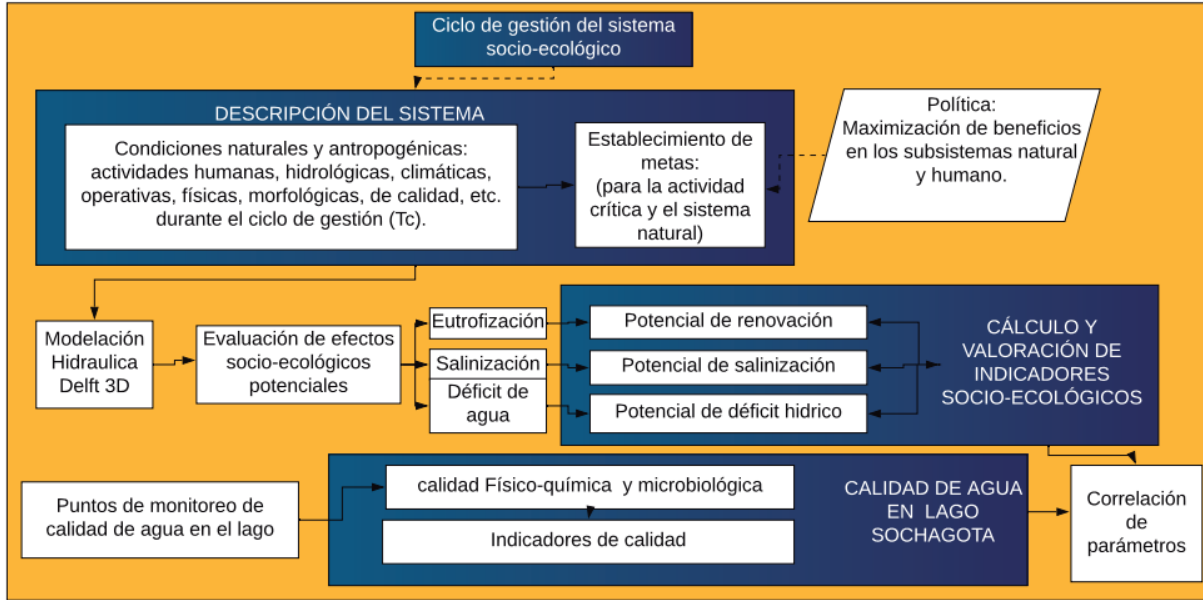


Figura 1.2. Esquema metodológico. Elaboración propia, modificado de Usaquén, O. (2017).

Para aplicar este proceso metodológico, el sistema tiene que ser descrito (Paso 1). Una vez recolectada la información se realiza la modelación hidrodinámica del sistema (Paso 2), Posteriormente, se calculan los descriptores estratégicos relacionados con cada uno de los efectos socio-ecológicos: potencial de renovación (PR), potencial de salinización (PS) y potencial de déficit de agua (PWD) (Paso 3). Una vez calculados los descriptores, se integran mediante el índice general de susceptibilidad (OSI, Overall Susceptibility Index) (Paso 4). Con base en los resultados de OSI, se evalúa la gestión ambiental y su sostenibilidad en el periodo evaluado (Paso 5), finalmente se realizará un análisis de correlación para determinar los parámetros físico-químicos y microbiológicos más fuertemente vinculados con los indicadores de base hidrodinámica (Paso 6), con lo cual se podrá establecer el posible efecto en el sistema y evaluar escenarios de manejo y operación. A continuación, se hace una breve descripción de los pasos enunciados anteriormente sobre la metodología de investigación propuesta y desarrollada en la presente tesis.

1.3.1. Descripción del sistema.

Esta primera etapa se desarrolló con la información recolectada en las investigaciones realizadas por Proagua, la Universidad de Boyacá, y la tesis doctoral denominada "desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas" desarrollada por Usaqué (2019), la cual menciona se debe seguir los siguientes pasos:

- Descripción general. Características físicas y geográficas del sistema lago Sochagota.
- Actividades humanas. Descripción de los usos directos o indirectos del recurso hídrico (agricultura, consumo humano, turismo, etc.).
- Límite del sistema. se define el límite del sistema a partir de la descripción general del área de estudio, con base en la identificación de las actividades
- Características físicas y morfológicas. Datos batimétricos o morfológicos de los componentes del sistema
- Ciclo de gestión. Periodo en el que se evaluará la susceptibilidad del sistema
- Condiciones hidrológicas. Caracterización de flujos naturales y antropogénicos que intercambian los componentes del sistema.
- Condiciones climáticas. Se solicitará información al Instituto de Hidrología y Meteorología de Colombia IDEAM, de las variables climáticas mínimas registradas en la zona para el ciclo de gestión elegido (precipitación, evaporación, temperatura, viento, etc.).
- Condiciones de operación. Características físicas e hidráulicas de las conexiones, los criterios y la dinámica de operación del sistema.
- Calidad ambiental. Se priorizan las variables en función de los efectos de interés común (eutrofización, salinización, etc.) para los actores por el uso del recurso (turismo,

Capítulo 1 - Introducción

agricultura, consumo humano). Se usará la información de calidad disponible en estudios previos realizados por la Autoridad Ambiental Corpoboyacá y por la Universidad de Boyacá.

- Efectos. La metodología contempla el uso de tres indicadores de la base hidrodinámica para evaluar efectos potenciales de eutrofización, salinización y déficit hídrico-inundación.

1.3.2. Modelación hidrodinámica del sistema.

Usaquén (2017) en su tesis doctoral menciona que:

La modelización numérica de la hidrodinámica y de los fenómenos de transporte, constituye una etapa necesaria para la aplicación de la metodología OSSEM y, en general, para la evaluación y gestión ambiental de sistemas hídricos. La caracterización hidrodinámica establece el punto de partida para el cálculo de los descriptores estratégicos pues se vincula con los procesos de renovación, transporte o acumulación de sales disueltas y con el balance hídrico en el sistema a través de los potenciales de renovación, de salinización y de déficit hídrico. Con ello pueden representarse las tensiones socio-ecológicas (condiciones hidrológicas, climáticas, físicas, morfológicas, de operación y calidad) que ocurren en los humedales, tanto costeros como continentales, y sus efectos sobre los mismos con base en los descriptores estratégicos. (p.99)

En este caso la modelación hidrodinámica será primordial para el cálculo de los descriptores estratégicos, ya que permitirá representar las condiciones hidrodinámicas del lago Sochagota y calcular los indicadores de base hidrodinámica (eutrofización, salinización, déficit hídrico), Para el desarrollo del presente proyecto se usará un modelo distribuido que permita evaluar la hidrodinámica del lago.

Capítulo 1 - Introducción

El presente proyecto modelará hidrodinámicamente el lago Sochagota teniendo en cuenta la dinámica de apertura de compuerta y flujos (condiciones reales de operación), para poder relacionarlos con la calidad evaluada en los años 2015,2016 y 2017. Para esto se partirá del modelo DELFT 3D presentado en la tesis doctoral desarrollada por Usaquén, (2017). Donde se modeló y calibró un modelo del lago Sochagota en 2015, esta condición no refleja las condiciones típicas del lago, puesto que fue un año de fenómeno del niño, por tal motivo en el lago no se realizó apertura de su compuerta y los principales aportantes fueron la precipitación, el caudal base de quebrada Honda y los afloramientos subterráneos.

1.3.3. Cálculo y valoración de descriptores estratégicos.

Se llevó a cabo el cálculo de tres descriptores estratégicos priorizados en la metodología OSSEM, considerando que integra las condiciones climáticas, de operación, físicas, morfológicas e hidrológicas del sistema con las tensiones socio-ecológicas del mismo. El cálculo de los indicadores propuestos en la metodología de Usaquén (2017), se presenta a continuación:

-Potencial de renovación (P_R):

Es el indicador que caracteriza la susceptibilidad de un dominio frente a la eutrofización. Evalúa la capacidad diaria de un dominio a renovarse debido al ingreso o salida de flujos (dilución, concentración) o por sus dinámicas de transporte. Este descriptor se define como el porcentaje en el cual varía la concentración de un trazador conservativo introducido en el dominio transcurridas 24 horas (ΔT_c).

Para el cálculo se considera que: a) el dominio se comporta como un tanque completamente agitado; b) se introduce una masa de trazador (M_0) en el instante inicial ($t=0$) que garantiza una concentración homogénea en el dominio (C_0); c) no se introduce masa adicional tras $t=0$ durante cada ΔT_c . Una vez introducido el trazador en el dominio, se obtiene la

Capítulo 1 - Introducción

concentración de la sustancia conservativa a las 24h para las condiciones morfológicas, climáticas (precipitación, evaporación), hidrológicas (caudales de entrada y salida, nivel) y condiciones de operación (apertura/cierre de compuertas, etc.) para cada día del ciclo de gestión (T_c).

El potencial de renovación se calcula diariamente durante el ciclo de gestión mediante la siguiente expresión:

$$P_R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

Ecuación 1

Donde:

P_R : Potencial de renovación diario (%).

C_0 : Concentración de trazador en el instante inicial ($t=0$) (M/V).

C_t : Concentración de trazador al cabo de 24 horas (ΔT_c) (M/V).

En el presente estudio, el cálculo del potencial de renovación se realiza mediante simulación de adición del trazador en el módulo hidrodinámico de la herramienta Delft3D con la cual se representa el modelo del Lago.

- Potencial de salinización (P_s):

Es el indicador que evalúa la posibilidad de que un dominio supere unas salinidades de referencia, que 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).

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

Capítulo 1 - Introducción

de tiempo se calcula la concentración de iones en solución (conductividad, salinidad o su equivalente) transcurridas 24h.

El potencial de salinización de un dominio se calcula diariamente durante el ciclo de gestión mediante la siguiente expresión:

$$P_s = \frac{S_t - S_0}{S_0} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

P_s : Potencial de salinización diario (%).

S_0 : Salinidad mínima en el ciclo de gestión o geogénica (dS/m o su equivalente).

S_t : Salinidad del dominio en el tiempo t (cada ΔT_c) (dS/m o su equivalente).

A escala global (sistema), la evolución temporal del potencial de salinización se calcula mediante el uso del modelo. Una vez obtenida la evolución temporal se valora la susceptibilidad a la salinización. (p.83)

- *Potencial de déficit hídrico (P_{wd}):*

Es el indicador que evalúa la susceptibilidad de un dominio frente a la disponibilidad del recurso para el sistema socio-ecológico. Permite valorar la susceptibilidad del dominio a presentar o no un déficit o descenso en el nivel con respecto a niveles de referencia (L_R).

Los niveles de referencia se definen en función de la demanda de agua antropogénica de la actividad crítica y de los requerimientos mínimos ambientales del recurso base. Este indicador se define como el porcentaje en el cual varía el nivel del agua en el dominio con respecto a un nivel de referencia crítico (η_c) en un periodo de 24 horas (ΔT_c).

$$P_{wd} = \frac{L_t - \eta_c}{\eta_c} \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

P_{wd} : Potencial de déficit hídrico diario (%)

L_t : nivel o profundidad de la columna de agua (diario) en el dominio (m).

Capítulo 1 - Introducción

η_c : nivel o profundidad crítica en el dominio (m).

El nivel crítico (η_c) se corresponde con el nivel o profundidad en el sistema que satisface las necesidades de agua en la actividad de mayor demanda de recurso (actividad crítica) sin comprometer el recurso base del sistema. El periodo en el cual se evalúa y define el nivel crítico corresponde a aquellos pasos de tiempo (ΔT_c) en los que existe demanda de agua en las diferentes etapas del cultivo, bajo mínimas condiciones de presión natural, es decir, cuando el balance de precipitación y evaporación tiende a cero ($P-E \cong 0$); el promedio del nivel en el sistema en este periodo es representativo del nivel crítico. Se verifica que el nivel crítico así definido, satisface las necesidades totales de agua en el cultivo (evapotranspiración o uso consuntivo, agua de percolación profunda, eficiencia de riego, etc.), sin comprometer el recurso base del sistema y el desarrollo de vegetación hidrófita propia del humedal que crece en la zona permanentemente inundada o de transición (rivera). Se obtiene un nivel crítico de 2.46m (cota: 2491.74 msnm).

Para el cálculo del potencial de déficit hídrico en cada paso de tiempo (24h) se requiere conocer el nivel de la columna de agua en el sistema. El nivel diario en el dominio (L_t) se relaciona con el nivel crítico (η_c) para calcular el potencial de déficit hídrico (P_{wd}). Este descriptor se compara, posteriormente, con los potenciales de referencia para evaluar la susceptibilidad frente al déficit hídrico.

A escala global (asumiendo el dominio como completamente mezclado), la evolución temporal del potencial de déficit hídrico, pueden calcularse mediante el uso de modelos de caja a escala de celda mediante el modelo distribuido (Delft3D) o mediante registro directo de la columna de agua en el sistema. Para el lago Sochagota el nivel en la zona de la compuerta, se registra a diario por parte de operarios del distrito de riego (Usochicamocha).

(p.78-89)

1.3.4. Valoración de la susceptibilidad a eutrofización, salinización y déficit hídrico.

Una vez obtenida la evolución temporal del potencial de renovación, de salinización y de déficit hídrico, se valora la susceptibilidad a los efectos priorizados y se clasifica en función de cuatro categorías de susceptibilidad: muy alta, alta, moderada y baja. Para evaluar el resultado de los indicadores e índice OSI, para los años 2015,2016 y 2017, se utilizarán los límites o umbrales calculados en el capítulo “Capítulo 3. Metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas” (Usaquén, 2017, p.69-p.97).

1.3.5. Evaluación de la gestión ambiental del sistema.

La evaluación final del sistema se realizará mediante el análisis de los descriptores estratégicos a través del índice de susceptibilidad conjunta (OSI), ya que integra el análisis de los tres descriptores y clasifica en cuatro niveles de priorización (baja, moderada, alta o muy alta) de la gestión ambiental en el tiempo y el espacio para evaluar el sistema en todo el ciclo de. Según Usaquén (2017):

El índice OSI (*Overall Susceptibility Index*) integra la susceptibilidad de los tres indicadores socio-ecológicos: potencial de renovación, potencial de salinización y potencial de déficit hídrico. Este índice permite clasificar en cuatro niveles de priorización la gestión ambiental temporal o espacial del sistema durante el ciclo de gestión (T_c). El OSI diario evalúa la sostenibilidad del sistema a partir de la susceptibilidad de presentar simultáneamente efectos de eutrofización, salinización o déficit hídrico, según se describe en la tabla 1.1 y se clasifican en na susceptibilidad conjunta: muy alta, alta, moderada y baja (p.94).

Tabla 1.1

Evaluación del índice OSI con base en la integración de la susceptibilidad a eutrofización, salinización y déficit hídrico.

Eutrofización				Salinización				Déficit hídrico				Índice (OSI)
B	M	A	MA	B	M	A	MA	B	M	A	MA	
			MA				MA				MA	Muy alta
B		A				A				A		Alta
B			MA	B			MA	B			MA	Moderada
B				B				B				Baja

Nota: La tabla presenta el cálculo del Índice (OSI) en función del resultado de los indicadores (Eutrofización, salinización y déficit hídrico) B: Baja; M: moderada; A: alta; MA: muy alta. (Usaquén-Perilla, 2017).

La tabla 1.1 puede ser empleada para emitir un concepto general del sistema en relación con cada uno de los descriptores estratégicos (potencial de renovación, potencial de salinización, potencial de déficit hídrico). (p.96)

Cuando el índice OSI integrado obtiene una categoría de susceptibilidad baja, la gestión ambiental del sistema es sostenible. El sistema se encuentra en equilibrio y la susceptibilidad a eutrofización, a salinización y a déficit hídrico es baja.(p.97)

El índice OSI en su categoría de susceptibilidad muy alto, indica que la gestión ambiental del sistema no es sostenible. La renovación del sistema es muy baja, por lo tanto, presenta muy alta susceptibilidad a eutrofizarse. La calidad del agua para riego puede generar reducción en el rendimiento de los cultivos más sensibles a la salinidad en valores superiores o iguales al 50%. Las presiones naturales y humanas afectan a la sostenibilidad del sistema. (p.97)

El índice OSI en su categoría de susceptibilidad moderado, significa que la gestión ambiental del sistema tiende a la sostenibilidad, pero requiere priorizar estrategias para

Capítulo 1 - Introducción

mejorar al menos uno de los descriptores estratégicos tipificado en la categoría alta o muy alta en su valoración general. Finalmente, la gestión ambiental del sistema tiende a no ser sostenible si el valor de OSI integrado es alto. Se requiere optimizar la gestión de al menos dos descriptores estratégicos que alcancen una categoría alta o muy alta en su valoración general. (p.97)

1.3.6. Correlación de los parámetros de Calidad, hidrodinámica e indicadores de gestión.

Una vez aplicado el índice de susceptibilidad conjunta (OSI), se hará un análisis de correlación Pearson, evaluando la correlación entre los indicadores y la calidad de agua monitoreada en el lago, determinando cuál de los descriptores estratégicos (PR, PS, Pwd) tiene más influencia o relación con la calidad.

1.3.7. Generación de medidas de gestión.

Una vez calculada la correlación de los parámetros, la hidrodinámica y los índices se simulará en el modelo DELFT 3D la implementación de acciones (aperturas de compuertas) mediante el uso del modelo y se evaluará la respuesta del sistema mediante el índice (OSI), finalmente se realizará un análisis de la dinámica de cierre y apertura de la compuerta del lago Sochagota.

1.4. Estructura de la tesis

Capítulo 1. Introducción. En este capítulo se han expuesto las bases conceptuales y los aportes de la investigación, que sustentan el enfoque metodológico y los retos que motivan el desarrollo de la presente Tesis y que se concretan en los objetivos, general y específicos, expuestos y la metodología para dar cumplimiento a estos.

Capítulo 2 Revisión de la Literatura. Se describen los antecedentes y estado del arte mostrando las debilidades en los estudios revisados y remarcando la necesidad de desarrollo de la presente Investigación.

Capítulo 3. Materiales y métodos. Se describen la zona de estudio, la información usada para el desarrollo de los modelos, la caracterización fisicoquímica del agua, el análisis estadístico de los datos, el modelo usado, la calibración y verificación del mismo.

Capítulo 4. Evaluación de la calidad del agua en el Lago Sochagota (Boyacá) mediante indicadores socio - ecológicos de base hidrodinámica. En este capítulo se desarrolla la metodología propuesta mediante su aplicación en el Lago Sochagota (Colombia). Se describen los resultados del modelo, así como el cálculo de los descriptores estratégicos (Indicadores de base hidrodinámica), se presenta la correlación de la información de calidad medida en el lago con los indicadores. Se exponen los parámetros más fuertemente vinculados, se realiza la evaluación de la sostenibilidad del lago. Se obtienen las conclusiones derivadas del desarrollo del presente estudio.

Capítulo 5. Generación de medidas de gestión. En este capítulo se presentan diferentes escenarios de operación del lago, evaluando la sostenibilidad de este.

Capítulo 6. Referencias. En este capítulo se relacionan las diferentes fuentes bibliográficas citadas a lo largo del documento de Tesis.

2. Revisión de la literatura

Valencia. (2012) considera que:

los modelos hidrodinámicos de tres dimensiones calculan la circulación inducida por la marea astronómica, el viento, las variaciones de densidad, y las descargas fluviales, además de incluir la influencia de la curvatura de la tierra mediante la fuerza de Coriolis. Incluyen fundamentalmente el cálculo de la componente vertical de la velocidad y el cálculo, en distintas profundidades, de las magnitudes estudiadas. (p.22)

En el caso de los modelos de calidad de agua, los datos básicos de partida corresponden a las características hidrodinámicas. Los modelos de calidad de agua ajustados a un modelo hidrodinámico de tres dimensiones utilizan la ecuación de advección dispersión para la determinación de la evolución espacial y temporal de la concentración de un contaminante debido a determinadas descargas en una zona de estudio definida previamente (Valencia, 2012)

A continuación, se mostrarán algunos estudios de calidad del agua en lagos y modelos hidrodinámicos empleados en sistemas similares al caso de estudio.

2.1. Estudios de calidad del agua en lagos

Un estudio representativo de la calidad del agua en lagos intervenidos por la actividad humana, es el estudio realizado en las Montañas Rocosas del centro oeste de Alberta, Canadá. Las Montañas Rocosas en Alberta, se caracterizan por ser zonas de explotación minera a cielo abierto que han dejado pozos vacíos como vestigios de la extracción y que en consecuencia han sido transformados en lagos artificiales, con calidad de agua deficiente capaz de reducir la diversidad de invertebrados, limitando el potencial de naturalización del lago. Por consiguiente, se estudiaron y compararon las características de la calidad del agua y del hábitat en cinco lagos naturales (lagos de referencia) y cinco lagos artificiales de las Montañas Rocosas.

Capítulo 2 – Revisión de la literatura

Para el análisis de calidad del agua y hábitat se tomaron perfiles de profundidad para temperatura (T), conductividad y oxígeno disuelto (DO), utilizando una sonda portátil Hydrolab DS5 (HACH Environmental, Colorado). Adicionalmente, se tomaron muestras de la calidad del agua para ser analizadas según los estándares de la Asociación Canadiense de Acreditación de Laboratorios ISO/IEC 17025 (ALS Environmental 2016), con el fin de determinar la composición de nutrientes, alcalinidad, carbono orgánico disuelto y clorofila.

Los resultados evidenciaron una variabilidad en la calidad del agua de los lagos artificiales de origen minero y los lagos naturales de referencia. Dentro de parámetros analizados, se identificó que la conductividad promedio de los lagos artificiales presento una mayor magnitud respecto a los naturales, 1430 y 289 ($p = 0.004$), al igual que la alcalinidad, 438.5 y 153 ($p_2 = 0.004$). Asimismo, los sulfatos y bicarbonatos ($p_2 = 0.004$), sodio ($p_2 = 0.004$) y potasio ($p_2 = 0.012$) fueron más altos en los lagos artificiales. Por otra parte, los resultados en cuanto a clorofila no presentaron variaciones significativas, ya que en los lagos artificiales fue de 0.55 y en los lagos naturales de 0.60, con error cuadrático medio de $p_2 = 0.9$. Finalmente, se deduce que la calidad del agua en los lagos artificiales de origen minero es deficiente y por tanto requieren de estrategias para mejorar las condiciones físico químicas de los mismos y así favorecer la reproducción de fauna acuática; de igual forma, se sugiere realizar estudios más detallados en donde se evidencie la interacción de los lagos con el medio y fuerzas externas, con el fin de identificar su comportamiento. (Luek et al, 2017).

Ledesma et al (2013) presenta experiencias similares, se han empleado en países latinoamericanos como Argentina y México, donde los estudios de calidad del agua constituyen una herramienta para la toma y gestión de decisiones. En Córdoba Argentina, se encuentra el Embalse Río Tercero, uno de los embalses más grande de la región y el más influenciado por la

Capítulo 2 – Revisión de la literatura

agricultura, el manejo pecuario, la actividad minera y la descarga de efluentes domésticos no tratados e industrias. Como resultado, la carga de materia orgánica y nutrientes en el embalse habitualmente es alta, generando eutrofización y pérdida de los usos potenciales del agua.

En este sentido, el estudio buscó determinar la calidad del agua y estado trófico del embalse Río Tercero utilizando técnicas de análisis estadístico multivariado, con el fin de generar bases para una adecuada gestión de los recursos hídricos de la región. En el análisis multivariado se empleó el software InfoStat Professional, además, de realizarse muestreos durante el período noviembre de 2003 a diciembre de 2006, en donde se estudiaron parámetros como: temperatura del agua (T), oxígeno disuelto (OD), fósforo total (PT) y clorofila-a (Cl-a). Adicionalmente, la clasificación del estado trófico se realizó aplicando el Programa Internacional para la Organización, Cooperación y Desarrollo Económico de aguas interiores (OECD, 1982), el cuál proporciona los valores límites de PT y Cl-a, en el ámbito de los lagos de zonas templada; también se empleó el análisis de componentes principales (ACP), para analizar la variabilidad total de la calidad del agua y asociar las variables temporalmente.

Los resultados señalan que, durante el período de estudio, el embalse Río Tercero se encontraría experimentando un deterioro en la calidad del agua y un avance progresivo hacia un estado elevado de eutrofia, pasando de mesotrófico (PT= 10-35; Cl-a=2.5-8) a eutrófico (PT= 35-100; Cl-a=8-25), debido a que, en el año 2003 las concentraciones de PT y Cl-a fueron de 20 y 4.5, respectivamente; mientras que en el año 2006 aumentaron a PT= 40 y Cl-a = 10.4. De igual forma, en el ACP se observó una correlación positiva entre la clorofila- a y las variables fósforo total ($r = 0.83$), oxígeno disuelto ($r = 0.51$) y temperatura ($r = 0.43$). El ACP explicó el 65,6% de la variabilidad total de los datos. Se concluye, que durante el periodo de estudio la calidad del agua presento un deterioro, como consecuencia del cambio de nivel trófico (mesotrófico a eutrófico) en

Capítulo 2 – Revisión de la literatura

el embalse, lo que evidencia la inminente necesidad de tomar medidas de gestión, tanto en la cuenca como en el reservorio (Ledesma et al, 2013).

En México, Espinal Carreón et al, (2013) llevaron a cabo un estudio el cual presenta los resultado de valoraciones de las características físicas y químicas del agua correspondientes a dos periodos (2005 y 2009- 2010), y cuyo objetivo es comparar las condiciones del agua de la Laguna de Yuriria antes y después de las acciones tomadas para su restauración; para ello, se analizaron 21 parámetros físicos y químicos del agua mediante técnicas estadísticas incluyendo un Índice de Calidad del Agua (ICA) y el análisis de discriminantes (AD) para determinar la variación espacial y temporal de las características del agua. Para ello, se realizó monitoreo en los dos períodos de evaluación, el cual contó con 18 sitios de estudio, 15 dentro de la laguna, uno para cada tributario y uno más en el efluente. Para cada periodo y sitio de estudio. Posteriormente, en el laboratorio, se determinaron otras variables de gran importancia como las concentraciones de nitratos, nitritos, amonio, entre otras. Finalmente se realizó el cálculo el índice de calidad del agua (ICA) propuesto por Dinius (1987), que evalúa 13 los parámetros analizados (OD, Cond, T, Ta, pH, NO₃, color, Dur, DBO₅, Ak, Cl, CT y CF) en una escala de 0 a 100.

Los resultados revelaron que la laguna presenta un alto grado de eutrofización, con aportes de materia orgánica natural y fecal; se encontraron variaciones temporales en la calidad del agua que manifiestan los efectos de las estaciones de estiaje (estaciones que miden el nivel de caudal mínimo que alcanza la laguna). Se detectó una sequía extrema en el segundo período de estudio, lo que contribuyó a la concentración de los nutrientes, por lo que se sugieren diferentes acciones de manejo a nivel de cuenca, como la implementación de un número considerable de plantas de tratamiento de aguas residuales que operen en buenas condiciones, así como el uso combinado de mejores prácticas de manejo a nivel de cuenca. (Espinal et al, 2013)

En otras propuestas investigativas se encuentra el estudio: Integración de índices de calidad del agua y técnicas estadísticas multivalentes para la evaluación de la contaminación del agua del lago Volta, Ghana , donde Tay (2021), caracteriza la calidad general del agua para una gestión sostenible y eficiente, mostrando como resultados que los niveles de OD en el lago pueden resultar en condiciones hipóxicas si, no se monitorean. Sobre la base de los niveles de DBO, se considera que el lago Volta no ha recibido descargas de contaminación significativas. La evaluación del índice de solway (WQI) muestra las características de calidad bastante buenas del lago y su capacidad para soportar el uso humano y animal. La evaluación del Índice de Calidad del Agua del Consejo Canadiense de Ministerio de Medio Ambiente (CCMEWQI) también muestra que la calidad general del agua del lago fue justa y, por lo tanto, las características de calidad del agua pueden fluctuar entre niveles prístinos y deteriorados. Además, la calidad del agua puede ser generalmente adecuada para la protección de la vida acuática, pero ocasionalmente amenazada con condiciones que se alejan de los niveles naturales o deseables y, por lo tanto, requieren un tratamiento convencional. Finalmente, este estudio destaca una posible alerta temprana de problemas ecológicos de contaminación en el lago. Por lo tanto, se recomienda adoptar medidas de monitoreo para prevenir la contaminación inminente del lago Volta.

2.2. Modelos hidrodinámicos en lagos

Los modelos hidrodinámicos que emplean DELFT 3D se caracterizan por ser modelos multidimensionales (2D y 3D) y con enfoques multidisciplinarios capaces de realizar simulaciones de caudales, transporte de sedimentos, oleaje, calidad del agua, evolución morfológica y ecología, aplicados en áreas costeras, fluviales y estuarinas (Deltares, 2021). Conforme los diversos enfoques de aplicación del software DELFT 3D, en este apartado se recopilan algunos estudios de modelación hidrodinámica en un contexto internacional y local.

Capítulo 2 – Revisión de la literatura

García et al (2015). Presenta un estudio en la Bahía de San Quintín (SQB) ubicada al sur de Baja California, México. Es un ecosistema complejo conformado por lagos costeros y humedales, en donde se desarrollan actividades económicas como la acuicultura (crianza de especies acuáticas vegetales y animales), la cual despliega la necesidad de satisfacer procesos biológicos propios de la actividad, asociados a la disponibilidad y calidad de nutrientes en el ecosistema; en razón de ello, es necesario conocer con precisión la hidrodinámica de la bahía para garantizar un monitoreo ecológico eficiente.

En la implementación del modelo hidrodinámico se realizaron dos modelaciones (2D y 3D) mediante los softwares DELFT 3D y OpenDA, y tuvo lugar durante la temporada de precipitaciones del año 2010 comprendida entre el 27 agosto y el 20 septiembre. El software DELFT 3D, es un programa capaz de calcular el flujo no estable que resulta del forzamiento meteorológico (velocidad del viento, temperatura, presión atmosférica, humedad y precipitaciones), mareas y elevación de la superficie del agua, que para el estudio en cuestión se tomaron como datos de entrada; mientras que el software OpenDA, tiene la capacidad de calibrar parámetros que se fijan en el tiempo, por ejemplo: profundidad, componentes de la marea (viento y velocidad), elevación en la superficie del agua y rugosidad en un modelo hidrodinámico. La calibración del modelo se realizó en la ejecución del modo 2D: nivel del agua, para posteriormente ejecutar el modo 3D: campo de velocidades.

Los resultados del modelo mostraron que el modelo Delft3D es capaz de reproducir los procesos esenciales en la Bahía de San Quintín, siendo la marea y el viento las fuerzas principales que mueven la hidrodinámica dentro de la bahía. La modelación en 2D pudo capturar cambios en el nivel del agua con una alta correlación en las estaciones donde se tenían observaciones con capacidades de predictibilidad muy altas. De igual manera, las velocidades promedio de las

profundidades para el modelo en 3D, muestran que la calibración de Delft3D y OpenDA en 2D fue suficiente para explicar la variabilidad en las corrientes a lo largo de la bahía con una correlación lineal del 99%. Por consiguiente, conocer el comportamiento de variables como el nivel del agua y la velocidad de las corrientes, juega un papel importante, ya que es posible determinar qué áreas poco profundas dentro de la bahía tienen suficiente corriente para transportar nutrientes y así satisfacer los procesos biológicos que trae consigo la acuicultura (García et al., 2015).

Batista y Harari (2015) menciona que es relevante mencionar que la modelación hidrodinámica en lagos prioriza los fenómenos de transporte de masa, en especial el de sedimentos, puesto que son parte del ecosistema acuático y por tanto las interacciones entre el sedimento y la columna de agua tienen un alto significado. Un estudio que abarca fenómenos de transporte, es el modelo hidrodinámico del lago Ubatuba, Brasil, el cual es uno de los destinos más visitados de São Paulo y posee un alto potencial de contaminación en la zona costera y en ambientes acuáticos debido a las actividades de apoyo náutico, las cuales causan problemas por drenaje de agua aceitosa; eliminación directa de basura y desechos sólidos al agua. Por tal razón, se efectuó un modelo hidrodinámico con el fin de determinar la hidrodinámica en función de las fuerzas que actúan sobre el sistema, mediante el modelo DELFT3D, el cual simula caudales no estacionarios, fenómenos de transporte resultantes de mareas, descargas de agua y efectos meteorológicos, incluido el efecto de diferencias de densidad debido a gradientes horizontales de temperatura y campos de salinidad y caudales de ríos, siendo estos los datos de entrada. Los escenarios se configuraron en la interfaz de calidad del agua (WAQ), definiendo las condiciones iniciales, condiciones de contorno, tiempo de simulación, descarga de residuos, variables de salida, puntos de monitoreo, etc. Para el análisis de las descargas de los baños de las playas, se tomaron muestras

Capítulo 2 – Revisión de la literatura

mensuales en las playas de Enseada da Palmas por la Empresa Ambiental del Estado de São Paulo (CETESB) a lo largo de 2009 con el fin de comparar temporadas altas y bajas (períodos de verano e invierno) (Batista & Harari, 2017).

Como resultado se obtuvo que el sistema de corrientes no brinda alta capacidad de dilución y dispersión de efluentes en el área de estudio, concluyendo que la modelación ambiental reprodujo satisfactoriamente los procesos involucrados en el transporte y difusión de indicadores microbiológicos, contribuyendo a los estudios sobre los efectos de las actividades humanas en el sistema de Ubatuba. (Batista & Harari, 2017).

Simultáneamente, en Colombia Betancur y Gómez (2016) han simulado modelaciones hidrodinámicas enfocadas a la comprensión del comportamiento e interacciones de las variables atmosféricas (radiación solar, humedad temperatura del aire, etc.) y otras variables propias del cuerpo de agua (superficie libre, tasa de flujo, temperatura, turbiedad, conductividad, etc.). Una experiencia representativa es la modelación hidrodinámica para el estudio de los procesos físicos en un embalse, la cual fue aplicada para estudiar la variabilidad espacial de la estructura térmica en el embalse tropical de Riogrande II, que es un embalse multipropósito (suministro de agua y energía) ubicado al norte de Medellín, que cuenta con los ríos, Río Grande y Río Chico, como principales tributarios.

Para la modelación hidrodinámica de la variabilidad espacial de la estructura térmica se implementaron los modelos DELFT 3D y MIKE 3 y se compararon los perfiles de temperatura simulados con el modelo ELCOM que fue definido como modelo de referencia. El modelo DELFT 3D, es un modelo utilizado para simular patrones de circulación de flujo, transporte de calor, calidad del agua y morfología del fondo bajo varios factores de fuerza como campos de viento (Deltares, 2013); y el modelo MIKE 3 es la versión 3D del modelo MIKE 21 desarrollado por el

Instituto Danés de Hidráulica (DHI), el cual simula un flujo inestable teniendo en cuenta las variaciones de densidad, batimetría y fuerzas externas (DHI, 2013). Por otra parte, el modelo de referencia ELCOM que fue calibrado para la campaña de campo del 23 al 27 de marzo de 2010, es un modelo desarrollado por la Universidad de Australia Occidental para capturar los gradientes de temperatura y la estructura térmica en estuarios, lagos y embalses.

Con el fin de facilitar la simulación y el análisis de los resultados del modelo, el embalse se dividió en cinco zonas con comportamiento físico similar, en donde se evaluaron tres variables de interés físico para la estructura térmica: el espesor de la capa de mezcla, la temperatura media de esta capa y la profundidad de la termoclina. De esta manera, se demostró que el modelo DELFT3D sigue de cerca el modelo de referencia (ELCOM) tanto en la forma de la serie como en los valores máximo y mínimo, ya que la serie es aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$ más cálidos que la serie de tiempo de referencia, mientras que MIKE3 presentan diferencias significativas en la forma de la serie temporal. En razón de ello, se infiere que el comportamiento de las simulaciones, estar relacionado con la parametrización de los flujos de calor incluidos en el modelo, así como con el esfuerzo cortante del viento en la superficie (Betancur et al, 2016).

Finalmente, las experiencias condensadas en este apartado evidencian que los componentes que distinguen la modelación hidrodinámica de DELFT 3D, dan una visión de cómo estudiar e intervenir los cuerpos hídricos conforme sus características (superficie libre, tasa de flujo, temperatura, turbiedad, conductividad, etc.) y las condiciones meteorológicas del medio.

2.3. Otros modelos aplicativos y herramientas de software aplicados en lagos.

En la actualidad, se han evidenciado experiencias exitosas de modelación hidrodinámica empleando modelos capaces de satisfacer la necesidad de estudio y capturar acertadamente las propiedades del cuerpo hídrico, siendo DELFT 3D uno de los modelos más aplicados para áreas

Capítulo 2 – Revisión de la literatura

costeras, fluviales y estuarinas. Sin embargo, existen otros modelos capaces de simular la hidrodinámica de lagos, como lo son: EFDC, ELCOM y CAEDYM, los cuales son explicados en los siguientes casos de estudio.

Zhang et al, (2013, 2019) presenta un estudio en el lago Upper Klamath (UKL). Es el segundo lago más grande de Oregón (EEUU) con una superficie aproximada de 232 km². La mayor parte del lago es poco profunda, con una media de unos 2,8 m, excepto en la parte central con una profundidad aproximada de 14m. Debido a su poca profundidad, el viento es un factor meteorológico crítico que impulsa los procesos hidrodinámicos y, por lo tanto, influye en la calidad del agua (sólidos en suspensión, fósforo total, concentraciones de clorofila, concentraciones bajas de oxígeno, y pH alto), convirtiendo el UKL en un lago hipereutrófico, dominado por floraciones muy grandes de la cianobacteria *Aphanizomenon flos-aquae* (AFA).

En razón de la influencia del viento en la hidrodinámica del lago, se realizaron y compararon dos simulaciones hidrodinámicas basadas en el modelo “Código de Dinámica de Fluidos Ambientales” o EFDC por sus siglas en inglés. El modelo EFDC, es un sistema multifuncional de modelado de aguas superficiales que incluye componentes hidrodinámicos, contaminantes de sedimentos y eutrofización. Para el desarrollo de las simulaciones, se evaluaron tres puntos dentro del lago incluyendo su punto más profundo. La primera modelación, se simuló el comportamiento del viento conservando el modelo original EFDC; y en la segunda se buscó comprobar si la adición de un multiplicador de arrastre del viento en el modelo, corrige el desajuste entre las observaciones oceánicas experimentales y la respuesta del viento de un lago poco profundo. Los datos de entrada (meteorológicos, batimetría, etc.) fueron suministrados por las bases de datos: United States Geological Survey (USGS) y Graham Matthews and Associates (GMA).(Zhang et al., 2013, 2019).

Capítulo 2 – Revisión de la literatura

Por otra parte, Chen (2020) en las simulaciones hidrodinámicas, se encontró que las velocidades de las corrientes del modelo original (simulación 1) en comparación con las observaciones de campo estaban subestimadas, lo que estaba potencialmente asociado con el desajuste en la fórmula de arrastre del viento entre el océano abierto y los lagos poco profundos. En cuanto, a la segunda simulación se evidenció que la subestimación derivada del modelo original, fue resuelta con la adición del factor multiplicador de arrastre del viento igual a 0,003, debido a que en los tres puntos evaluados la velocidad del agua aumentó en un 59 a 85% y el error relativo para el modelo disminuyó en un 15 a 32%. Finalmente, se concluyó que, con la adición del factor multiplicador de arrastre del viento a la fórmula empírica del coeficiente de arrastre del viento derivada de experimentos en la superficie del océano, se proporcionan estimaciones más realistas, con aplicaciones potenciales para otros modelos numéricos de lagos, debido a que es un parámetro altamente sensible para las velocidades de las corrientes (Chen, 2020).

El modelo ELCOM ha sido ampliamente aplicado en estudios hidrodinámicos de estuarios, embalses y lagos estratificados, como lo es el caso de estudio desarrollado al este del lago Ontario y la parte alta del río St. Lawrence, en Canadá y Estados Unidos. En el este del lago Ontario y la parte alta del río St. Lawrence, se extraen aproximadamente 100.000 m³ por día-1 de agua, de los cuales el 46% es para uso doméstico y atiende a aproximadamente 175.000 habitantes; en razón de ello se aplicó el modelo ELCOM, con el fin de comprender y comparar la dinámica de flujo (niveles de agua, las temperaturas y las velocidades de las corrientes) que rodea las tomas de agua potable en esta región, para el periodo de abril a octubre de 2006.

El modelo informático de estuarios y lagos, ELCOM. Es un modelo tridimensional, hidrodinámico, que se utiliza para predecir la distribución de velocidad, temperatura y salinidad en cuerpos de agua naturales sujetos a fuerzas ambientales externas, como esfuerzo del viento,

Capítulo 2 – Revisión de la literatura

termodinámica de la superficie y entradas y salidas. En la simulación los datos meteorológicos de entrada fueron suministrados por la boya meteorológica de la estación 1263 montada a 3,3 m sobre la superficie del agua; dichos datos de entrada corresponden a radiación, temperatura del aire en la superficie, velocidad de viento, dirección del viento, humedad relativa, presión atmosférica y cantidad de lluvia, los cuales fueron ingresados en intervalos de diez minutos.

En cuanto a los resultados, se realizó una comparación de los valores modelados y los datos observados para los niveles de agua, temperatura y corrientes. Para los niveles de agua, se identificó que los niveles modelados, no tienen una amplitud superior a los datos observados, ejemplo de ello es el punto Kingston en donde el nivel de agua modelado fue consistente con el observado, ya que el error cuadrático medio (RMS) entre el modelo y el observado fue de 1.1 cm. En lo que respecta a temperatura, se evidencio que la profundidad de la capa mixta modelada era menor que la observada; esto resultó en un sesgo de frío de -2°C durante el verano. Por último, la comparación de los perfiles de corriente modelados de este a oeste reveló que las direcciones estaban bien modeladas, pero el modelo ocasionalmente sobrestimó la profundidad a la que penetraron las fuertes corrientes superficiales, estas diferencias pueden deberse a que la magnitud del error RMS topográfico para los componentes de velocidad este-oeste y norte-sur fue de 4.0 cm s^{-1} y 5.1 cm s^{-1} , respectivamente (Paturi et al., 2012). En conclusión, la simulación realizada con el modelo ELCOM, captura razonablemente la dinámica de los regímenes de flujo en el este del lago Ontario y la parte alta del río St. Lawrence, a pesar de estar sujeta a fuerzas ambientales externas, como esfuerzo del viento y la continua extracción de agua para consumo humano, demostrando que la simulación tiene un sesgo muy bajo entre los datos modelados y los observados.

Capítulo 2 – Revisión de la literatura

Un último estudio es el desarrollado en el lago Minnetonka el cual es un ejemplo de la importancia de acoplar estudios de calidad del agua con modelos hidrodinámicos. El lago Minnetonka en Estados Unidos, es un lago clasificado como complejo morfológicamente, debido a que está conformado por aproximadamente 26 bahías con diferentes profundidades, sedimentos y calidad del agua. En consecuencia, el estudio buscó simular parámetros de calidad del agua en tres bahías del complejo, West Upper Bay (WB), Cooks Bay (CB) y Halsted Bay (HB), demostrando la aplicación de un modelo hidrodinámico 3D con un modelo ecológico detallado para predecir con precisión la variabilidad espacial y temporal de la temperatura del agua del lago (T), oxígeno disuelto (OD), fósforo total (TP) y concentraciones de clorofila a (Chla).

En la simulación se aplicó el modelo hidrodinámico 3D Modelo informático de estuario y lago (ELCOM). ELCOM utiliza modelos hidrodinámicos y termodinámicos para simular la distribución espacial y temporalmente de la temperatura y la velocidad del agua. ELCOM se acopló dinámicamente con el Modelo de Dinámica de Ecosistemas Acuáticos Computacionales (CAEDYM), un modelo ecológico, para simular procesos biogeoquímicos tridimensionales. El modelo fue alimentado por datos de campo medidos en tres estaciones de monitoreo de calidad del agua (T, DO, Chla, y TP), además de considerar aportaciones del flujo de entrada y los datos metrológicos o de forzamiento.

Los resultados demuestran que el modelo tuvo la capacidad de capturar los procesos hidrodinámicos y ecológicos del lago en cuanto a T, OD, TP y Chla. Demostrando que los datos simulados coinciden con los perfiles verticales para T y DO medidos. Los perfiles de temperatura del agua tuvieron el mejor ajuste en la comparación cuantitativa del modelo con los datos medidos, ya que el modelo pudo explicar el 98% de la variabilidad de temperatura ($r^2 = 0,98$). Las concentraciones del perfil de OD simulado se compararon bien con las de los perfiles medidos (r^2

Capítulo 2 – Revisión de la literatura

= 0,67–0,92). El modelo fue capaz de capturar las concentraciones de OD en la superficie del lago y el inicio de las condiciones anóxicas.

En lo que respecta al TP y Chla están razonablemente bien simulados, además de tener los mismos patrones generales de variación estacional que los datos medidos. Los valores de TP medidos muestran que las tres ubicaciones de muestreo tienen concentraciones distintas, lo que indica heterogeneidad en las bahías. Las concentraciones de Chla simuladas coincidieron moderadamente con los datos medidos. En conclusión, el modelo refleja un sistema con gran calidad de agua espacial y temporal, además de demostrar la heterogeneidad del sistema en las tres bahías evaluadas. La simulación evidencia que el acople de los modelos ELCOM y CADEYM, es una experiencia exitosa en cuanto al estudios de calidad del agua e hidrodinámica, ya que el análisis 3D obtiene una vista adecuada de la distribución biogeoquímica espacial y temporal del cuerpo de agua (Missaghi & Hondzo, 2010).

Así mismo, Acosta, et al (2020) señala las herramientas de interpolación, utilizadas diariamente en hidrología y climatología. Con el propósito de regionalizar los parámetros de registro, como profundidad de precipitación, temperatura, humedad, entre otros. La precisión de estos métodos no está totalmente validada. Esta investigación presenta un estudio comparativo entre los métodos de interpolación más utilizados para la regionalización de parámetros hidrológicos y climatológicos. Análisis comparativo de interpolación espacial; lo cual se llevó a cabo utilizando los métodos IDW, Kriging y Spline, para ello se utilizó el software ARGIS, debido a su uso generalizado. La profundidad de la precipitación se consideró como un parámetro para la comparación. La precisión se determinó mediante validación cruzada. La investigación se restringió espacialmente a una región políticamente delimitada; Boyacá, Colombia, Sudamérica. Se demostró que el mejor método para la interpolación espacial en este caso era Spline.

2.4. Sostenibilidad ambiental

La sostenibilidad ambiental es un concepto que puede variar según el tipo sistema, es decir algunas veces lo que se busca con la sostenibilidad es conservar las características del sistema, en otras implica el cambio para mejorar o transformar el sistema, en cambio en otras se desea cambiar el sistema para mejorar algunos de sus productos (Gallopín.,2003).

Gallopín (1994) propone un conjunto de atributos básicos necesarios para la sostenibilidad del sistema como un todo. Algunos de ellos surgen de subsistemas ecológicos y humanos, mientras que otras sólo provienen del subsistema humano, pero todos ellos son importantes a nivel del sistema socio ecológico en su conjunto. Estas propiedades fundamentales serían las siguientes:

- Disponibilidad de recursos. Ésta es una característica obvia y puede incluir recursos
- Adaptabilidad y flexibilidad (en contraposición a rigidez). Cierta grado de ductilidad es necesario para detectar e interpretar los cambios que ocurren en el mundo exterior. A medida que el ambiente va cambiando sin que el sistema lo perciba, o bien lo perciba sin adaptarse a las nuevas condiciones, en algún momento se producirá su colapso, porque su comportamiento ya no será compatible con la nueva situación.
- Homeostasis general: estabilidad, resiliencia, robustez (en contraposición a vulnerabilidad, fragilidad). Esta característica tiene que ver con la capacidad del sistema de mantener o preservar los valores de las variables esenciales cerca de, o en torno a, una trayectoria o estado determinados (estabilidad), un dominio de atracción (resiliencia), o una estructura del sistema (robustez).
- Capacidad de respuesta. Esta característica se refiere a la capacidad del sistema socioecológico de hacer frente al cambio
- La auto-dependencia (self-reliance) (en contraposición a la dependencia).¹⁹ Se refiere a la capacidad de un sistema socioecológico de regular sus interacciones con el medio.
- Empoderamiento (empowerment). Esta característica denota la capacidad del sistema socioecológico no sólo de responder al cambio, sino de innovar y de inducir el cambio en otros sistemas en procura de sus propias metas.

Investigaciones como la de (Tong, et al.,2021), nos habla de que la eutrofización es de las causas más importantes de deterioro de la calidad del agua, por tal motivo incluir metodologías que combinen modelación con indicadores o diferentes enfoques, en este caso el nexo agua-

alimentos-energía (WFE), se convierte en una herramienta importante en la toma de decisiones para los responsables políticos. este estudio explora las posibilidades de aplicar el concepto de conexión de WFE en modelos de calidad del agua. proponiendo como desafío más importante la falta de un marco de modelado común para agilizar las conexiones entre los modelos y de esta manera buscar la sostenibilidad en la producción de alimentos, garantizando la seguridad hídrica del sistema.

Por su parte, La Escuela de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Tecnológica de Dalian Liu, et al (2021) plantea como temática la mitigación de la contaminación ambiental y el mantenimiento de la producción de granos como eje fundamental en el desarrollo sostenible, utilizando el modelo de la Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas (SWAT) para simular el crecimiento de los cultivos y la pérdida de nitrógeno, estableciendo la relación de mapeo entre el aporte de nitrógeno y el rendimiento y la calidad del agua, para lo cual propone un método general para determinar una estrategia de aplicación de nitrógeno para alto rendimiento y baja contaminación a escala de cuenca. Para el caso de estudio se utilizó el lago Xiaoxingkai. En primer lugar, diseñaron escenarios de aplicación para 10 fertilizantes base (B1-B10) y 10 fertilizantes (T1-T10) y evaluaron sus efectos combinados del crecimiento del maíz para identificar las tasas críticas de fertilizantes nitrogenados determinadas bajo proporciones fijas y dinámicas. Sobre la base de la relación de mapeo entre la tasa de fertilizantes nitrogenados y la pérdida de nitrógeno, se reveló la calidad del agua en la salida de la cuenca bajo las tasas de fertilizantes de base crítica y topdressing. Finalmente, propusieron estrategias alternativas de aplicación de nitrógeno para un alto rendimiento y baja contaminación y descubrieron que ajustar la proporción de fertilizantes de base a fertilizante de dirección superior puede crear una situación de beneficio mutuo para la agricultura y el medio ambiente (Liu, et al.,2021).

Por otro lado, se realizó un estudio de caso en la cuenca de Salt Lake Irán en donde se evaluó el comportamiento del sistema acuífero y sus cambios a lo largo del tiempo para garantizar el uso de las aguas subterráneas de manera sostenible. Para ello, se presenta 7 indicadores en 5 dimensiones de sostenibilidad de las aguas subterráneas, calculando la estabilidad de los acuíferos ubicados en la cuenca del Lago Salado a lo largo del tiempo. La cuenca del Lago Salado, es una de las cuencas hidrográficas de segundo grado más importantes del país iraní en términos de la importancia de los recursos hídricos y esta cuenca contiene 36 acuíferos. Para este trabajo, se

introdujeron indicadores de sostenibilidad de las aguas subterráneas como variables medibles a lo largo del tiempo. Estos indicadores, utilizados para evaluar la sostenibilidad de las aguas subterráneas sobre la base de datos mensurables y observables, proporcionan información sobre la cantidad y calidad de los recursos de aguas subterráneas (situación y tendencias actuales), los impactos ambientales en el acuífero y la situación social y económica (indicadores del índice de desarrollo humano). La sostenibilidad calculada para cada índice por sí sola puede expresar el grado de sostenibilidad en los acuíferos en la categoría relacionada con el índice. Además, a través de un índice de series temporales, se calcula la estabilidad global de los acuíferos situados en esta cuenca integrando todos los indicadores disponibles. Los resultados muestran que la sostenibilidad general de los acuíferos ubicados en la cuenca del Lago Salado disminuye con el tiempo, y en general, los acuíferos ubicados en la parte occidental de la cuenca muestran una mayor sostenibilidad en lugar de en otras partes. (Samani, et al., 2021)

Para el caso de investigación: Compensación de la carga de nutrientes como medio para mantener el buen estado ecológico de las aguas superficiales (Lötjönen, et al., 2021); se examinó cómo la compensación de la carga de nutrientes podría ayudar a una empresa a expandir su producción cuando la producción es una fuente de cargas de nutrientes, amenazando el estado ecológico de un cuerpo de agua. preguntándose si la compensación es técnicamente factible y si se puede hacer de una manera ecológicamente sostenible. Los créditos para la compensación pueden ser proporcionados por fuentes puntuales o no puntuales. Aplicaron su enfoque del caso al lago finlandés Kallavesi, en donde emplearon un modelo de respuesta a nutrientes del lago para determinar la calidad del agua utilizando el análisis probabilístico del estado ecológico del lago. El potencial de suministro de créditos de fósforo de fuentes puntuales era demasiado bajo para mantener el lago en buen estado ecológico con al menos un 80% de probabilidad y debió complementarse con créditos de fuentes agrícolas no puntuales. El uso de una relación comercial de 1:1.2 para reflejar la incertidumbre sobre los créditos de fuentes no puntuales sugiere que la reducción de la carga de fósforo agrícola sería suficiente por sí sola para garantizar el buen estado ecológico en un 90% de probabilidad (Lötjönen, et al., 2021).

Finalmente, está el estudio en El páramo del Siscunsi (Perico, et al., 2015), un ecosistema ubicado en el departamento de Boyacá, caracterizado por una alta riqueza de fauna y flora entre las que se resaltan distintas especies vegetales. Esta zona tiene influencia de actividades antrópicas,

que han generado impactos de distintas magnitudes en distintas áreas del páramo. El objetivo de este trabajo es determinar los impactos de las distintas actividades antrópicas en el estado actual de la vegetación del páramo, con fin de establecer soluciones y estrategias que permitan la protección, restauración y recuperación del ecosistema a lo largo del tiempo. La metodología incluye la evaluación del cambio en la vegetación y en el perfil del suelo, en distintos puntos con impacto antrópico diferencial; así como la evaluación de los caudales de algunas de las quebradas de este ecosistema. Los resultados preliminares reflejan la importancia de esta zona a nivel socio-económico para las poblaciones cercanas; registrando impactos antrópicos de diferentes magnitudes (minería, agricultura, ganadería, quema y tala de bosques e introducción de especies invasoras). Estos procesos conllevaron al desplazamiento de la vegetación nativa por procesos de competencia; así como a la alteración y variación del nivel freático y la disponibilidad superficial de agua en la zona. En conclusión, el páramo del Siscunsi tiene una alta riqueza vegetal y animal que, amenazada por numerosas actividades antrópicas, que influyen en la fragilidad del ecosistema. Dada la importancia de lograr la sostenibilidad de la zona se han sembrado alrededor de 10000 árboles nativos en la zona. (Perico et al,2015).

2.5. Síntesis de revisión bibliográfica

En las diferentes investigaciones realizadas se han usado herramientas de investigación, que varían en complejidad y alcance en la gestión. La gestión ambiental ha evolucionado desde el clásico enfoque de diagnóstico y gestión aislada de los recursos (agua, aire, suelos, biodiversidad, etc.) hasta los más modernos basados en la teoría de sistemas.

La evaluación del estado de los sistemas, mediante el uso de herramientas numéricas, ha contribuido a la comprensión de fenómenos complejos, tales como, la calidad de agua y la hidrodinámica de diferentes sistemas hídricos. Sin embargo, por el número de parámetros, la interdependencia entre variables de estado y respuesta, la disponibilidad de información detallada, entre otros factores, hace escasos los ejemplos de modelos de simulación que integren más de una problemática con fines de gestión. Por lo anterior, existe la necesidad de encontrar, o vincular los

Capítulo 2 – Revisión de la literatura

diferentes procesos tanto hidráulicos como de calidad, haciendo una evaluación más efectiva del comportamiento de estos y la vinculación entre ellos, para una mejora en la toma de decisiones y en la operación de diferentes sistemas hídrico. Por otro lado, la inversión económica en la medición y monitoreo de calidad hace que la evaluación de los sistemas ambientales, se haga de manera intermitente o en determinados periodos y puntos de medición, haciendo que no halla continuidad en la evaluación y control de la calidad, dificultando una gestión adecuada del recurso.

Por tal motivo vincular la calidad, o asociarla a parámetros hidrodinámicos o modelos hidráulicos, que se alimenten de datos climáticos que, se monitorean constantemente en estaciones climáticas y limnimétricas, permitirá hacer un seguimiento y evaluación constante de la calidad del agua y tener una aproximación a la calidad asociada en cualquier periodo en el cual se cuente con información climática.

En respuesta a las motivaciones expuestas, la presente Tesis se orienta a determinar la correlación de los indicadores de base hidrodinámico con la calidad de agua. Estos indicadores se calculan mediante modelos numéricos, alimentados con información de fácil obtención (información climática y datos mínimos de calidad) y de esta manera poder evaluar la calidad con base en los indicadores, generando una herramienta para la toma de decisiones en el lago Sochagota.

3. Materiales y métodos

3.1. Calidad del agua medida en el lago Sochagota

Para caracterizar el Lago Sochagota, la Autoridad Ambiental (Corpoboyacá), la Universidad de Boyacá y la Fundación Proagua, han desarrollado diferentes estudios durante los años 2015, 2016 y 2017, en los que se recolectó información histórica de la calidad físico-química y bacteriológica del Lago. El 4 de abril (periodo de mayor precipitación) y el 1 de agosto (menor precipitación) de 2015 Corpoboyacá y Proagua con participación de la universidad de Boyacá realizaron vigilancia ambiental, en: quebrada Honda (7 estaciones y 7 tributarios) y en el Lago Sochagota (8 estaciones de calidad tomando muestra a dos profundidades), Por estación se dispone de información de 24 variables de calidad físico-química en los puntos considerados.

Para el año 2016 y 2017 la universidad de Boyacá hizo monitoreo de calidad en el lago, en 2016 se realizó una campaña de 24 horas entre el 24 y 25 de octubre (mes de precipitación más alta) recolectando información en el Lago Sochagota (se seleccionaron 8 de 19 estaciones de calidad monitoreadas, que corresponden a las mismas zonas evaluadas en el estudio de 2015; se toman muestra a dos profundidades) y se caracterizan de 19 variables de calidad físico-química en cada estación. Finalmente, para el año 2017 se realizaron dos campañas, el 1 de febrero (baja precipitación) donde se recolectó información en el lago de las mismas 8 estaciones de calidad priorizadas, cada estación dispone de información de 18 variables de calidad físico-química medidas a dos profundidades. Así mismo el 1 de septiembre se realizó monitoreo en las estaciones predefinidas; por estación se dispone de registros en campo y con información de 16 variables de calidad físico-química a dos profundidades. La localización de las estaciones (de S1 hasta S8) en el Lago Sochagota se representa en la figura 3.2.



Figura 3.1. Puntos de monitoreo. Tomado de (Usaquén-Perilla, 2017).

Los parámetros físico-químicos y microbiológicos medidos en los diferentes años y en las diferentes campañas, se presenta en la tabla 3.1.

Tabla 3.1

Calidad medida en el Lago Sochagota.

Parámetro	Abr-15	Agos-15	Oct 2016	Sep-17	Feb-17	Técnica de análisis
Alcalinidad total (mg/l CaCO ₃)	x	x	x			Volumétrico, SM 2310
Clorofila viva (ppb)			x	x	x	Detección por fluorescencia Argentométrico SM 4500-CL-B
Cloruros (mg/l)	x	x		x		Sustrato enzimático-tubos múltiples ,SM 9223 B
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	x	x	x		x	Sustrato enzimático-multicelda SM 9223 B.
Coliformes Totales (NMP/100 ml)	x	x	x		x	Método Electrométrico Electrodo de membrana SM 5210 B
Conductividad (dS/m)	x	x	x	x	x	Disco Secchi in situ
DBO ₅ (mg O ₂ /l)	x	x				Reflujo abierto, SM5220 B.
Disco de Secchi (m)	x	x	x	x		Volumétrico con EDTA, SM 2340 C.
DQO (mg/l)	x	x				
Dureza total (mg/l CaCO ₃)	x	x	x			

Parámetro	Abr-15	Agos-15	Oct 2016	Sep-17	Feb-17	Técnica de análisis
Fósforo Total (mg P/l)	x	x			x	Digestión Ácido Nítrico-Sulfúrico, Ácido ascórbico SM4500-P B,E
Hierro total (mg/l)	x	x	x	x	x	Espectrofotometría absorción atómica en llama directa
Nitratos (mg N-NO ₃ ⁻ /l)	x	x	x	x		Barrido espectrofotométrico ultravioleta SM 4500-NO3
Nitrógeno amoniacal (mg N-NH ₃ /l)	x	x		x		Destilación preliminar-volumétrico, SM4500-NH3
Nitrógeno total (mg N/l)	x	x				
Nitritos (mg N-NO ₂ ⁻ /l)	x	x	x			Colorimétrico, SM4500-NO2
Oxígeno disuelto (mg/l)	x	x	x		x	Sonda de oxígeno
pH	x	x	x	x	x	Sonda de pH
Sodio (mg/l)	x	x				Espectrofotometría absorción atómica en llama directa
Sólidos Disueltos (mg/l)	x	x			x	Secado a 180°C, SM2540 C.
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	x	x	x		x	Secado a 103-105°C, SM2540 D.
Sólidos Totales (mg/l)	x	x	x		x	Secado a 103-105°C, SM2540 B.
Sulfatos (mg/l)	x	x		x		Turbidimétrico SM 4500-SO4 E.
Temperatura Ambiente (°C)	x	x	x	x	x	Sonda de temperatura
Temperatura del Agua (°C)	x	x	x	x	x	Sonda de Temperatura.
Potencial Redox			x	x	x	Sonda
Salinidad (ups)			x	x	x	Conductividad eléctrica.
K (ppm)			x	x	x	Espectrofotometría absorción atómica en llama directa
Mg (ppm)				x	x	Espectrofotometría absorción atómica en llama directa
Ca (ppm)				x	x	Espectrofotometría absorción atómica en llama directa

Nota: La tabla presentan las variables de calidad físico-química y microbiológica medida en el lago Sochagota en los diferentes años de las campañas de monitoreo, los valores marcados con x corresponden a lo medido en el muestreo.

Los parámetros presentados en la tabla 3.1 se correlacionarán con los indicadores hidrodinámicos potencial de renovación, déficit hídrico y salinidad identificando cuál de estos se

ve más fuertemente vinculados a la hidrodinámica del lago, de esta manera poder interpretar cómo la operación del lago se ve reflejado en los indicadores y estos a su vez en la calidad.

3.1.1. Calidad ambiental.

La Calidad que se tendrá en cuenta para el proyecto, corresponde a los monitoreos de los años, 2015, 2016 y 2017, realizados por Corpoboyaca, la fundación Proagua y Universidad de Boyacá. Los puntos medidos corresponden a los descritos en la Figura 3.2.

3.1.1.1. Calidad de agua 2015

Para el año 2015 se realizaron dos jornadas de monitoreo en los meses de abril y agosto (figura 3.2), midiendo en ocho puntos de monitoreo de manera superficial (SS) y a profundidad del disco de Sechhi (SP). A continuación, se presenta la calidad obtenida (Tabla 3.2., Tabla 3.3, Tabla 3.4 y 3.5).

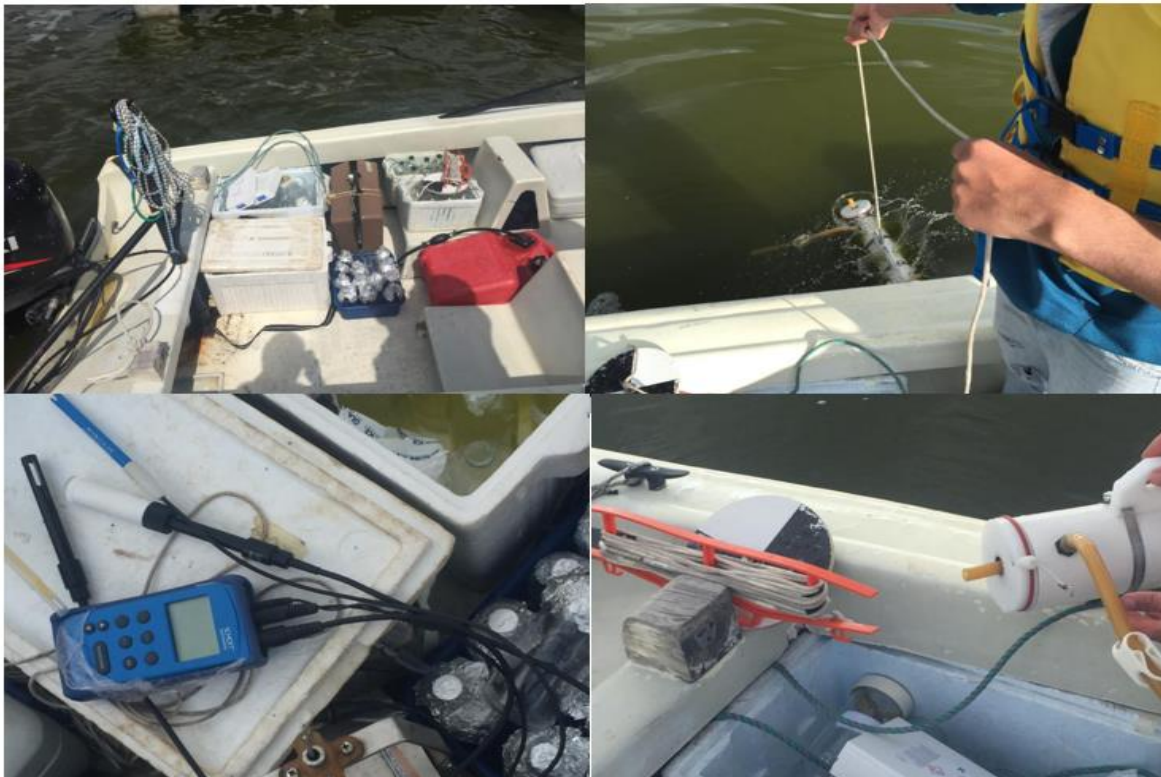


Figura 3.2 . Muestreo Lago Sochagota 2015. Autor

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

Tabla 3.2.

Calidad medida en el lago Sochagota en abril 4 de 2015.

Puntos de Muestreo		LAGO SOCHAGOTA															
		Lago Superficie								Lago Profundidad Disco de Secchi							
		Punto 1.	Punto 2.	Punto 3.	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.	Punto 1.	Punto 2.	Punto 3.	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.
Código	Unidades	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8
Parámetro	Unidades	-35	-37	-39	-41	-43	-45	-47	-49	-36	-38	-40	-42	-44	-46	-48	-50
pH	Unidades	6.65	9.11	9.2	9	9	9	9	9.1	5.56	9.12	8.99	8.93	9.1	9.1	9	9.05
Temperatura Ambiente	°C	20	16	16	24	23	20	18	18	22	20	20	24	23	20	18	18
Temperatura agua	°C	22	20	20	20	21	21	20	20	20	21	20	20	21	21	20	20
Conductividad Eléctrica	µS/cm	5560	9520	9470	9380	9460	9500	9480	9510	5700	9520	9540	9370	9540	9510	9480	9520
Oxígeno Disuelto	mg/L O2	7.8	5	6.5	5.5	5.8	6.3	5.5	6.4	1.8	6	6	5	4.9	5.8	5.4	6.3
Disco sechhi	Metros	0.082	0.06	0.15	0.11	0.15	0.1	0.12	0.11	0.082	0.06	0.15	0.11	0.15	0.1	0.12	0.11
Turbiedad	NTU	105	19.5	26.1	21.5	23.6	24.7	21.4	22	>1000	21	33.6	28.1	21.1	35.7	25.7	21.9
Alcalinidad Total	mg/L CaCO3	106	320	320	255	349	422	400	410	244	386	400	310	367	396	402	412
Dureza Total	mg/L CaCO3	102	111	113	127	123	121	124	119	76.7	120	118	124	120	121	119	120
Cloruros	mg/L Cl-	535	972	1000	985	1000	992	1020	980	730	1000	980	980	942	962	955	977

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

Puntos de Muestreo		LAGO SOCHAGOTA															
		Lago Superficie								Lago Profundidad Disco de Secchi							
		Punto 1.	Punto 2.	Punto 3.	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.	Punto 1.	Punto 2.	Punto 3.	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.
Código	Unidades	SS1 -35	SS2 -37	SS3 -39	SS4 -41	SS5 -43	SS6 -45	SS7 -47	SS8 -49	SP1 -36	SP2 -38	SP3 -40	SP4 -42	SP5 -44	SP6 -46	SP7 -48	SP8 -50
Sulfatos	mg/L SO4-2	1830	3060	3260	3230	3280	3180	3220	3290	2440	3100	3200	3180	3240	3220	3230	3300
Nitratos	mg/L N - NO3	0.229	0.461	0.507	0.147	0.544	0.503	0.548	0.557	0.25	0.635	0.602	0.449	1.05	1.27	0.515	0.49
Nitritos	mg/L N - NO2	<0,012	<0,012	<0,012	0,012	<0,012	0.012	0.012	0.018	0.032	0.014	<0,012	<0,012	<0,012	<0,012	<0,012	<0,012
Nitrógeno amoniacal	mg/L N- NH3	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Nitrógeno total	mg/L N	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Fosforo Total (reactivo)	mg/L P	0.213	0.09	0.126	0.112	0.096	0.109	0.117	0.112	2.97	0.125	0.118	0.109	0.091	0.091	0.113	0.077
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	91	56	45	52	55	69	66	63	31900	56	52	63	66	66	86	73
Sólidos Totales	mg/L	3220	5420	5400	5360	5420	5450	5470	5450	36100	5440	5430	5390	5440	5450	5470	5440
DBO5	mg/L O2	<5	11	12	8	11	<5	92	10	1120	12	10	20	23	17	15	12
DQO	mg/L O2	<20	136	139	132	33	<20	144	138	1710	36	27	31	27	28	133	29
Hierro	mg/L	4.3	1.63	0.96	0.115	0.105	0.101	0.076	<0,073	327	0.13	0.104	0.119	0.294	0.496	0.12	0.116
Coliformes Totales	NMP/100 mL	147300	34360	197600	18150	162600	181000	52980	36490	45410	50990	158600	204200	214000	71400	41200	251000
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	920	170	540	220	1600	1600	28	110	210	220	350	920	430	280	27	1600

Puntos de Muestreo		LAGO SOCHAGOTA															
		Lago Superficie								Lago Profundidad Disco de Secchi							
		Punto 1.	Punto 2.	Punto 3.	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.	Punto 1.	Punto 2.	Punto 3.	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.
Código		SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8
Parámetro	Unidades	-35	-37	-39	-41	-43	-45	-47	-49	-36	-38	-40	-42	-44	-46	-48	-50
Clorofila (a)	mg/m3	21	159	160	180	181	187	125	169	21	159	160	180	181	187	125	169

Fuente: Corpoboyaca; fundación Proagua; Universidad de Boyacá.

Tabla 3.3.

Calidad medida en el lago Sochagota en agosto 1 de 2015.

Puntos de Muestreo		LAGO SOCHAGOTA															
		Lago Superficie								Lago Profundidad Disco de Secchi							
		Punto 1.	Punto 2.	Punto 3.	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.	Punto 1.	Punto 2.	Punto 3.	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.
Código		SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8
Parámetro	Unidades	-35	-37	-39	-41	-43	-45	-47	-49	-36	-38	-40	-42	-44	-46	-48	-50
pH	Unidades	8.67	9.09	9.13	9.1	9.7	9.11	9.15	9.12	8.25	9.09	9.06	9.6	9.1	9.2	9.28	9.07
Temperatura Ambiente	°C	20	10	12	14	18	12	14	14	25	10	12	16	18	16	18	14
Temperatura agua	°C	24	18	16	18	18	18	18	18	21	14	18	18	18	18	19	16
Conductividad Eléctrica	µS/cm	24200	11430	11470	11480	11440	11470	11490	11460	23400	11480	11500	11470	11440	11440	11490	11460
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	4.5	5.22	4.3	4.88	4	6.2	5.59	5.5	4.1	3.1	4.3	5.72	5.4	5.7	5.28	5.57
Disco sechhi	Metros	0.1	0.25	0.2	0.2	0.3	0.28	0.2	0.25	0.1	0.25	0.2	0.2	0.3	0.28	0.2	0.25
Turbiedad	NTU	50.6	19.4	21.6	24.8	23.9	25.1	22.8	28	98.1	24.8	20.7	22.8	17.9	20.3	20.1	23.5
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	780	445	430	515	431	423	492	479	810	420	426	517	506	879	488	558

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

		LAGO SOCHAGOTA															
Puntos de Muestreo		Lago Superficie								Lago Profundidad Disco de Secchi							
		Punto 1.	Punto 2.	Punto 3.	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.	Punto 1.	Punto 2.	Punto 3.	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.
Código		SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8
		-35	-37	-39	-41	-43	-45	-47	-49	-36	-38	-40	-42	-44	-46	-48	-50
Parámetro	Unidades																
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	172	162	157	166	164	166	168	172	163	165	157	160	175	167	159	169
Cloruros	mg/L Cl-	2860	1240	1260	1200	1120	1250	1290	1170	3060	1110	1160	1140	1170	1260	1310	1260
Sulfatos	mg/L SO ₄ ²⁻	5550	3450	3420	3290	3700	3400	3770	3600	7810	3250	3620	3480	3750	3490	3500	3240
Nitratos	mg/L N - NO ₃	<0,100	0.581	0.623	0.672	0.586	0.523	0.643	0.652	<0,100	0.693	0.643	0.544	0.515	0.565	0.656	0.619
Nitritos	mg/L N - NO ₂	0.027	0.036	<0,012	0.013	0.022	0.013	<0,012	<0,012	0.021	<0,012	<0,012	<0,012	<0,012	0.013	<0,012	<0,012
Nitrógeno amoniacal	mg/L N - NH ₃	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00
Nitrógeno total	mg/L N	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00
Fosforo Total (reactivo)	mg/L P	0.632	0.062	0.163	0.271	0.062	0.062	0.062	0.062	0.712	0.062	0.379	0.062	0.062	0.062	0.185	0.950
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	80	34	30	49	28	53	26	48	244	65	46	55	46	29	58	54
SDT	mg/L	15020	6496	6480	6521	6572	6497	6574	6582	14756	6555	5544	6505	6474	6481	5632	6576
Sólidos Totales	mg/L	15100	6530	6510	6570	6600	6550	6600	6630	15000	6620	5590	6560	6520	6510	5690	6630
DBO ₅	mg/L O ₂	140	84	80	112	97	145	124	129	102	93	118	241	126	138	134	135
DQO	mg/L O ₂	234	144	138	186	162	242	207	222	160	146	184	388	203	222	224	225
Hierro	mg/L	0.41	<0,073	<0,073	2.11	<0,073	<0,073	2.25	3.17	7.93	8.38	4.73	0.818	1.67	1.80	1.15	0.576
Sodio	mg/L	3600	1890	2400	2800	1950	2080	3080	2950	7630	3010	2760	2780	2800	3390	2380	2860
Calcio	mg/L	48.2	41.5	43.1	43.5	44.6	43.6	45.3	47.1	49.1	42.1	46.3	38.7	41.3	48.2	42.2	50.2
Magnesio	mg/L	13.6	14.1	11.9	15.1	13.2	13.9	14.1	13.6	10.6	15.1	11.2	15.8	18.1	11.5	13.9	11.3
Potasio	mg/L	1550	371	277	421	305	363	373	377	1490	317	271	329	338	315	297	377

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

		LAGO SOCHAGOTA															
Puntos de Muestreo		Lago Superficie								Lago Profundidad Disco de Secchi							
		Punto 1.	Punto 2.	Punto 3.	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.	Punto 1.	Punto 2.	Punto 3.	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.
Código		SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8
		-35	-37	-39	-41	-43	-45	-47	-49	-36	-38	-40	-42	-44	-46	-48	-50
Parámetro	Unidades																
Coliformes Totales	NMP/100 mL	6120	24890	41060	36540	34480	41060	27230	34480	36540	10500	32820	30760	29090	51720	34330	27330
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	94	150	540	280	170	220	540	170	110	350	1600	220	79	140	110	70
Clorofila (a)	mg/m ³	54.554	52.972	65.372	79.3	29.6	37.3	118	96.5	54.55	52.97	65.37	79.3	29.6	37.3	118	96.5

Fuente: Corpoboyaca; fundación Proagua; Universidad de Boyacá.

Tabla 3.4.

Calidad promedio medida en el lago Sochagota en abril 4 de 2015.

LAGO SOCHAGOTA			
Parámetro	Unidades	Promedio	D. estándar
pH	Unidades	8.68	1.03
Temperatura Ambiente	°C	20.00	2.61
Temperatura agua	°C	20.44	0.63
Conductividad Eléctrica	µS/cm	9003.75	1318.14
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	5.63	1.25
Disco sechhi	Metros	0.11	0.03
Turbiedad	NTU	30.06	21.25
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	343.69	84.30
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	116.17	12.09
Cloruros	mg/L Cl ⁻	938.13	125.94
Sulfatos	mg/L SO ₄ ²⁻	3078.75	390.04
Nitratos	mg/L N - NO ₃	0.55	0.28
Nitritos	mg/L N - NO ₂	0.01	0.01
Nitrógeno amoniacal	mg/L N-NH ₃	<1	0.00
Nitrógeno total	mg/L N	<3	0.00
Fosforo Total (reactivo)	mg/L P	0.29	0.71
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	2053.69	7959.03
Sólidos Totales	mg/L	7209.38	7723.93
DBO ₅	mg/L O ₂	86.44	276.38
DQO	mg/L O ₂	173.94	413.12
Hierro	mg/L	20.98	81.61
Coliformes Totales	NMP/100mL	116705.00	79488.52
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	576.56	572.41
Clorofila (a)	mg/m ³	147.75	52.91

Fuente: Autor basado en Corpoboyacá; fundación Proagua; Universidad de Boyacá.

Tabla 3.5.

Calidad promedio medida en el lago Sochagota en agosto 1 de 2015.

LAGO SOCHAGOTA							
Parámetro	Unidades	Promedio	D. Estándar	Parámetro	Unidades	Promedio	D. Estándar
pH	Unidades	9.11	0.32	Calcio	mg/L	44.69	3.25
Temperatura Ambiente	°C	15.19	3.95	Magnesio	mg/L	13.56	1.96
Temperatura agua	°C	18.13	2.16	Potasio	mg/L	485.69	405.95
Conductividad Eléctrica	µS/cm	13007.50	4215.54	Coliformes Totales	NMP/100mL	31184.38	11073.00
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	4.96	0.83	Coliformes Fecales	NMP/100 mL	302.69	375.86
Disco sechhi	Metros	0.22	0.06	Clorofila (a)	mg/m ³	10862.02	23335.25
Turbiedad	NTU	29.03	19.87				
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	537.44	148.50				
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	165.13	5.37				
Cloruros	mg/L Cl ⁻	1428.75	601.92				
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	3895.00	1174.04				
Nitratos	mg/L N - NO ₃	0.61	0.06				
Nitritos	mg/L N - NO ₂	0.02	0.01				
Nitrógeno amoniacal	mg/L N-NH ₃	<1.01	0.00				
Nitrógeno total	mg/L N	<3.01	0.00				
Fosforo Total (reactivo)	mg/L P	0.24	0.28				
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	59.06	51.48				
SDT	mg/L	7454.06	2919.86				
Sólidos Totales	mg/L	7513.13	2959.19				
DBO ₅	mg/L O ₂	124.88	37.16				
DQO	mg/L O ₂	205.44	59.67				
Hierro	mg/L	2.92	2.72				
Sodio	mg/L	3022.50	1318.61				

Fuente: Autor basado en Corpoboyacá; fundación Proagua; Universidad de Boyacá.

3.1.1.2. Calidad de agua 2016

Para el año 2016 se realizó una jornada de monitoreo en el mes de Octubre (figura 3.3), midiendo en ocho puntos de monitoreo de manera superficial y a la mitad de la profundidad de la columna de agua. Los parámetros que se midieron corresponden a temperatura del agua, pH, oxígeno disuelto, potencial redox, conductividad y clorofila, para el análisis de la calidad de este año se tomarán las mediciones realizadas a mitad de profundidad de la lámina de agua. A continuación, se presenta la calidad obtenida (Tabla 3.6 y Tabla 3.7).



Figura 3.3 . Muestreo Lago Sochagota el 24 de octubre de 2016.

Tabla 3.6

Calidad medida en el lago Sochagota en octubre 24 de 2016.

Puntos de Muestreo		LAGO SOCHAGOTA							
		A mitad de profundidad							
		Punto 1.	Punto 2	Punto 3	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.
Código	SS1 -35	SS2 -37	SS3 -39	SS4 -41	SS5 -43	SS6 -45	SS7 -47	SS8 -49	
Parámetro									
Profundidad	m	0.4	0.9	1.05	0.4	2.5	1	0.9	0.8
pH	Unidades	9.01	9.33	9.42	9.39	9.36	9.33	9.33	9.38
Temperatura Ambiente	°C	22	22	20	17.1	17	22	23	18
Temperatura agua	°C	22	21	21.5	19.8	20.2	20.8	21	24.8
Conductividad Eléctrica	µS/cm	12210	10450	10660	10100	10180	10430	10550	11120
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	4.75	5.83	10.9	5.31	4.38	2.4	5.22	9.1
Potencial Redox	mv	-138	-133	-138.4	-135.3	-134	-132.6	-132.9	-137.6
Disco sechhi	Metros	0.47	0.18	0.2	0.21	0.25	0.18	0.2	0.26
Turbiedad	NTU	18.5	24.3	17.15	22.95	19.25	25.5	19	36.55
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	780	445	430	515	431	423	492	479
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	79	78.5	84	76	79.5	78	77.5	77
Cloruros	mg/L Cl-	13	13.25	13.5	14.8	10.85	13.9	0	13.6
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	5550	3450	3420	3290	3700	3400	3770	3600
Nitratos	mg/L N - NO ₃	6.55	6.2	6.85	8.15	6.25	7.6	6.9	7.5
Nitritos	mg/L N - NO ₂	4	4.5	4	5.5	5	5.5	4	5.5

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

Puntos de Muestreo		LAGO SOCHAGOTA							
		A mitad de profundidad							
		Punto 1.	Punto 2	Punto 3	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.
Código	SS1 -35	SS2 -37	SS3 -39	SS4 -41	SS5 -43	SS6 -45	SS7 -47	SS8 -49	
Parámetro									
Nitrógeno amoniacal	mg/L N-NH ₃	2.8	3.92	3.36	3.92	3.36	3.36	2.8	6.16
Nitrógeno total	mg/L N	15.59	16.3	18.69	20.37	19.65	20.38	14.82	21.4
Fosforo Total (reactivo)	mg/L P	0.632	0.062	0.163	0.271	0.062	0.062	0.062	0.062
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	200	200	0	200	100	100	0	0
SDT	mg/L	15020	6496	6480	6521	6572	6497	6574	6582
Sólidos Totales	mg/L	10500	10500	9000	6800	9000	12200	10600	12400
DBO ₅	mg/L O ₂	140	84	80	112	97	145	124	129
DQO	mg/L O ₂	234	144	138	186	162	242	207	222
Hierro	mg/L	0.1333	0.17	0.075	0	0.355	0	0.2633	0.9167
Sodio	mg/L	2275	2200	2455	2166	1758	1083	275	2641
Salinidad	‰	7	6.43	6.4	6.34	6.36	6.41	6.43	6.37
Potasio	mg/L	270	265	299	258	215	245	261	269
Coliformes Totales	NMP/100mL	19900	1410000	24900	19800	14000	387000	488000	687000
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	55	0.9	45
Clorofila (a)	mg/m ³	151.7	203.1	168.2	176	199.7	151.6	154.6	284.7

Fuente: Universidad de Boyacá. *Macroproyecto:* Modelo integrado de gestión del lago Sochagota y las aguas termales del municipio de Paipa, en el área de influencia del distrito de riego de Usochicamocha 2016.

Tabla 3.7

Calidad promedio medida en el lago Sochagota en octubre 24 de 2016.

LAGO SOCHAGOTA							
Parámetro	Unidades	Promedio	D. Estándar	Parámetro	Unidades	Promedio	D. Estándar
pH	Unidades	9.32	0.13	Sodio	mg/L	957150.63	1108996.54
Temperatura Ambiente	°C	20.14	2.46	Salinidad	‰	6.47	0.22
Temperatura agua	°C	21.39	1.54	Potasio	mg/L	260.25	23.85
Conductividad Eléctrica	µS/cm	10712.50	680.88	Coliformes Totales	NMP/100mL	381325.00	490817.98
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	5.99	2.72	Coliformes Fecales	NMP/100 mL	13.18	22.89
Potencial Redox	mv	-135.23	2.45	Clorofila (a)	mg/m ³	186.20	44.70
Disco sechhi	Metros	0.24	0.10				
Turbiedad	NTU	22.90	6.28				
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	499.38	118.17				
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	78.69	2.42				
Cloruros	mg/L Cl ⁻	11.61	4.82				
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	3772.50	736.24				
Nitratos	mg/L N - NO ₃	7.00	0.69				
Nitritos	mg/L N - NO ₂	4.75	0.71				
Nitrógeno amoniacal	mg/L N-NH ₃	3.71	1.08				
Nitrógeno total	mg/L N	18.40	2.49				
Fosforo Total (reactivo)	mg/L P	0.17	0.20				
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	100.00	92.58				
SDT	mg/L	7592.75	3001.33				
Sólidos Totales	mg/L	10125.00	1835.17				
DBO ₅	mg/L O ₂	113.88	24.82				
DQO	mg/L O ₂	191.88	40.61				
Hierro	mg/L	0.24	0.30				

Fuente: Autor basado en Universidad de Boyacá (2016).

3.1.1.3. Calidad de agua 2017

Para el año 2017 se realizaron dos jornadas de monitoreo en los meses de febrero y septiembre (figura 3.4.), en la campaña de febrero se midieron solo 6 puntos en el Lago los cuales corresponden al P1, P2, P5, P6, P7 y P8, para septiembre se cuenta con información de los 8 puntos. Para el análisis de la calidad de este año se tomarán las mediciones realizadas a mitad de profundidad. A continuación, se presenta la calidad obtenida (Tabla 3.8, tabla 3.9., Tabla 3.10 y 3.11).



Figura 3.4 . Muestreo Lago Sochagota 2017.

Tabla 3.8

Calidad medida en el lago Sochagota en febrero 1 de 2017.

Puntos de Muestreo		LAGO SOCHAGOTA					
		A mitad de profundidad					
		Punto 1.	Punto 2.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.
Código		SS1	SS2	SS5	SS6	SS7	SS8
Parámetro	Unidades	-35	-37	-39	-41	-43	-45
pH	Unidades	7.59	9.09	9.10	9.12	9.05	9.10
Temperatura Ambiente	°C	18.0	16.2	16.3	17.7	18.2	19.2
Temperatura agua	°C	20.5	18.7	19.6	22.3	23.1	24.1
Conductividad Eléctrica	µS/cm	16780	7080	7120	7440	8180	8210
Potencial Redox	mv	49.00	-142.60	-142.60	-145.30	-142.20	-145.70
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	6.90	7.70	7.14	9.37	8.45	10.01
Salinidad	‰	9.90	4.43	4.44	4.33	4.26	4.34
Turbiedad	NTU	92.25	38.10	43.40	35.60	38.60	39.50
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	680.0	190.0	600.0	No reporta	590.0	660.0
Fosforo Total (reactivo)	mg/L P	0.150	0.178	0.162	0.120	0.217	0.284
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	333.33	333.33	500.00	166.67	No reporta	No reporta
SDT	mg/L	5766.67	3266.67	2200.00	2533.33	No reporta	No reporta
Sólidos Totales	mg/L	6100.0	3600.0	2700.0	2700.0	No reporta	No reporta
Hierro	mg/L	7.6886	2.1386	1.0571	1.1886	5.6786	2.1543
Sodio	mg/L	3690.00	4885.71	4451.43	3437.14	4708.57	7002.86
Calcio	mg/L	135.5714	81.2857	95.1429	166.4286	84.7143	233.1429
Magnesio	mg/L	18.8571	15.0000	16.1429	19.0000	15.7143	32.2857
Potasio	mg/L	3634.2857	273.2857	182.2857	218.2857	162.2857	241.5714
Coliformes Totales	NMP/100 mL	5500	243000	258000	140000	71000	144000
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	310	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Clorofila (a)	mg/m ³	No reporta	180.30	145.60	144.40	154.80	134.70

Fuente: Universidad de Boyacá. *Macroproyecto:* Modelo integrado de gestión del lago Sochagota y las aguas termales del municipio de Paipa, en el área de influencia del distrito de riego de Usochicamocha 2017

Tabla 3.9

Calidad medida en el lago Sochagota en septiembre 1 de 2017.

Puntos de Muestreo		LAGO SOCHAGOTA							
		Lago Superficie							
		Punto 1.	Punto 2.	Punto 3.	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.
Código		SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8
Parámetro	Unidades	-35	-37	-39	-41	-43	-45	-47	-49
pH	Unidades	9.07	8.88	9.14	9.16	9.14	9.16	9.22	9.27
Temperatura Ambiente	°C	24.0	19.0	22.0	20.0	25.0	24.0	23.0	21.0
Temperatura agua	°C	16.0	18.0	19.0	16.0	18.0	19.0	17.0	20.0
Conductividad Eléctrica	µS/cm	2200	2340	2260	2240	2250	2170	2260	2290
Potencial Redox	mv	-137.10	-124.80	-140.00	-141.20	-139.20	-140.50	-144.70	-147.40
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	7.55	8.37	8.76	8.65	7.65	7.58	8.59	9.75
Disco sechhi	Metros	0.28	0.3	0.33	0.38	0.34	0.33	0.3	0.31
Cloruros	mg/L Cl-	224.62	209.71	205.51	204.53	200.94	198.35	211.09	208.54
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	752.82	708.17	694.10	686.58	671.69	667.70	712.57	703.51
Nitratos	mg/L N - NO ₃	2.41	2.718	2.673	2.693	2.942	2.703	2.69	2.67

Puntos de Muestreo		LAGO SOCHAGOTA							
		Lago Superficie							
		Punto 1.	Punto 2.	Punto 3.	Punto 4.	Punto 5.	Punto 6.	Punto 7.	Punto 8.
Código		SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8
Parámetro	Unidades	-35	-37	-39	-41	-43	-45	-47	-49
Nitritos	mg/L N - NO ₂	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Nitrógeno amoniacal	mg/L N-NH ₃	0.046	0.039	0.039	0.032	0.035	0.031	0.058	0.034
Fosforo Total	mg/L P	0.000	0.000	0.250	0.250	0.250	0.000	0.250	0.250
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	207	268	156.	211	99	151	181	25
Sólidos Totales	mg/L	18087	16208	16086	15711	15359	16101	16281	1600
Hierro	mg/L	0.026	0.221	0.192	0.225	0.217	0.194	0.198	0.190
Sodio	mg/L	481.900	447.043	438.324	434.722	424.235	425.376	419.069	447.625
Calcio	mg/L	22.665	24.997	21.3910	21.959	22.893	24.322	21.040	23.792
Magnesio	mg/L	8.792	8.896	8.5480	8.407	8.353	8.546	9.140	8.836
Potasio	mg/L	60.574	56.445	55.4610	54.942	54.171	53.790	53.069	56.578
Coliformes Totales	NMP/100mL	1500000	460000	110000000	460000	4600000	430000	1100000	24000000
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	300	300	2400	300	300	300	300	300
Clorofila (a)	mg/m ³	17.83	16.83	14.19	3.06	3.57	13.51	16.32	15.49

Fuente: Universidad de Boyacá. *Macroyecto:* Modelo integrado de gestión del lago Sochagota y las aguas termales del municipio de Paipa, en el área de influencia del distrito de riego de Usóchicamocha 2017

Tabla 3.10

Calidad medida en el lago Sochagota en febrero 1 de 2017.

LAGO SOCHAGOTA			
Parámetro	Unidades	Promedio	D.estandar
pH	Unidades	8.84	0.61
Temperatura Ambiente	°C	17.60	1.16
Temperatura agua	°C	21.38	2.11
Conductividad Eléctrica	µS/cm	9135.00	3778.09
Potencial Redox	mv	-111.57	78.68
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	8.26	1.24
Salinidad	‰	5.28	2.26
Turbiedad	NTU	47.91	21.87
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	544.00	201.57
Fosforo Total (reactivo)	mg/L P	0.19	0.06
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	333.33	136.08
SDT	mg/L	3441.67	1612.77
Sólidos Totales	mg/L	3775.00	1607.02
Hierro	mg/L	33176.33	27227.11
Sodio	mg/L	4695.95	1266.04
Calcio	mg/L	1327143.00	593148.07
Magnesio	mg/L	195000.00	64805.72
Potasio	mg/L	7853333.17	13962662.52
Coliformes Totales	NMP/100mL	143583.33	97286.39
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	53.17	125.82
Clorofila (a)	mg/m ³	151.96	17.37

Fuente: Autor basado en Universidad de Boyacá. *Macroproyecto:* Modelo integrado de gestión del lago Sochagota y las aguas termales del municipio de Paipa, en el área de influencia del distrito de riego de Usochicamocha 2017.

Tabla 3.11

Calidad medida en el lago Sochagota en septiembre 1 de 2017.

LAGO SOCHAGOTA							
Parámetro	Unidades	Promedio	D. Estándar	Parámetro	Unidades	Promedio	D. Estándar
pH	Unidades	9.13	0.12	Sodio	mg/L	4397867.50	199791.33
Temperatura Ambiente	°C	22.25	2.12	Calcio	mg/L	228823.75	14086.52
Temperatura agua	°C	17.88	1.46	Magnesio	mg/L	86897.50	2702.42
Conductividad Eléctrica	µS/cm	2251.25	51.94	Potasio	mg/L	556287.50	23476.72
Potencial Redox	mv	-139.36	6.71	Coliformes Totales	NMP/100mL	17818750.00	38099803.69
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	8.36	0.76	Coliformes Fecales	NMP/100 mL	562.50	742.46
Disco sechhi	Metros	0.32	0.03	Clorofila (a)	mg/m ³	12.60	5.90
Cloruros	mg/L Cl ⁻	207.91	8.02				
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	699.64	26.95				
Nitratos	mg/L N - NO ₃	1717.10	1422.22				
Nitritos	mg/L N - NO ₂	0.00	0.01				
Nitrógeno amoniacal	mg/L N- NH ₃	0.04	0.01				
Fosforo Total	mg/L P	0.16	0.13				
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	162.25	74.56				
Sólidos Totales	mg/L	14429.13	5245.52				
Hierro	mg/L	0.18	0.06				

Fuente: Autor basado en Universidad de Boyacá. *Macroproyecto:* Modelo integrado de gestión del lago Sochagota y las aguas termales del municipio de Paipa, en el área de influencia del distrito de riego de Usochicamocha 2017

3.2. Delft 3D

El modelado Delft3D está diseñado para simular la propagación de olas, corrientes, transporte de sedimentos, desarrollos morfológicos y aspectos de la calidad del agua en áreas costeras, fluviales y estearinas (Waldman et al, 2017). Delft3D es un sistema integrado de flujo y transporte, orientado al medioambiente acuático que resuelve las ecuaciones no lineales 2D (promediado en profundidad) y 3D para aguas someras (shallow water equations).

Delft3D-FLOW. es el módulo hidrodinámico. Calcula el flujo no estacionario resultante del forzamiento meteorológico y de las mareas. El objetivo principal es la simulación bidimensional (2DH, promediada en profundidad) y tridimensional (3D) del flujo impulsado por las mareas y el viento resolviendo las ecuaciones de aguas poco profundas inestables (Rueda-Bayona et al, 2020; Trang et al, 2021; Waldman et al, 2017)

3.3. Datos de origen y calibración del modelo Delft3D para el sistema Lago Sochagota

El modelo tridimensional Delft3D se usa para el desarrollo del modelo hidrodinámico del Lago Sochagota y su aplicación en el cálculo de los descriptores estratégicos propuestos en la metodología OSSEM. La información utilizada en el proceso de calibración y validación del modelo Delft3D, corresponde a las bases de datos y a los registros históricos proporcionados por el IDEAM, Corpoboyacá, la Fundación Proagua, Usochicamocha y la Universidad de Boyacá entre los años 2015 a 2017.

El modelo que se usa en el presente trabajo fue desarrollado en la tesis doctoral “Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas”.(Usaquén, 2017), este modelo corresponde a las condiciones del año 2015.

Usaquén (2017) menciona que:

Capítulo 3 – Materiales y métodos

Durante el proceso de calibración para el modelo realizado (2015) se ajusta y valida el nivel del agua en el lago y la distribución de los puntos correspondientes a los aportes y detracciones que complementan a la condición de contorno (Figura 3.2). El proceso de calibración y validación llevado a cabo incluye los siguientes estudios: i) calibración de los coeficientes de difusividad y viscosidad de remolino; ii) calibración del coeficiente de rugosidad de Manning; y, iii) calibración y validación de la constante del humedal (K_{sfh}) para considerar los efectos potenciales de coagulación, floculación, sedimentación, adsorción y absorción de iones en solución en el sistema.

Como resultado, se define el coeficiente de viscosidad ($0.077 \text{ m}^2/\text{s}$) y difusividad de remolino ($0.111 \text{ m}^2/\text{s}$). El grado de ajuste entre el nivel del lago medido y simulado (Tabla 3.2), se emplea para evaluar el proceso de calibración y el efecto de la precipitación y la evaporación en el sistema mediante el uso de los siguientes criterios estadísticos: i) diferencia total entre los niveles registrados y simulados (DL); ii) el coeficiente de correlación entre los dos conjuntos de niveles (R^2); iii) la eficiencia del modelo (CE) (Nash & Sutcliffe, 1970); y, iv) el error relativo (E_r); los estadísticos se evalúan durante el ciclo de gestión (365 días).(p.228)

Tabla 3.12

Resultados del proceso de calibración para el modelo Delft3D.

Estudio	Condición	Criterios de ajuste	Variable de respuesta
Calibración de los coeficientes de difusividad y viscosidad de remolino	K: 0.10 σ_t : 0.7 ϵ : 0.077 (m ² /s). D _m :0.111 (m ² /s). n:0.045 uniforme Sin precipitación y evaporación	DL: 37.98 (m ²) R ² : 0.47 CE: -24.7 (no aceptable) Er: 21 % (no confiable)	Nivel del agua en la zona de la compuerta (2490.31 m.s.n.m)
	ϵ : 0.077 (m ² /s); D _m :0.111 (m ² /s). n:0.045 uniforme Precipitación y evaporación incluidas	DL: 0.43 (m ²) R ² : 0.99 CE: 0.70 (bueno) Er: 1.35 % (confiable)	Nivel del agua en la zona de la compuerta (2490.31 m.s.n.m)
Coefficiente de rugosidad de Manning	n:0.045 en la zona interna del humedal y n:0.2 en la zona de entrada al lago Precipitación y evaporación incluidas; ϵ : 0.077 (m ² /s); D _m :0.111 (m ² /s) y ajuste en el flujo.	DL: 0.017 (m ²) R ² : 0.99 CE: 0.99 (excelente) Er: 0.38 % (confiable)	Nivel del agua en la zona de la compuerta (2490.31 m.s.n.m)
Calibración y validación de la constante del humedal (K _{sfh})	K _{sfh} :1x10 ⁻³ d-1 Incluye la condición de viento, Evaporación y precipitación.		Salinidad

Nota: la tabla presenta la síntesis de los parámetros calibrados, los criterios de evaluación de ajuste y la variable de respuesta tenida en cuenta. (Usaquén-Perilla, 2017)

Finalmente, en la tabla 3.12 se presenta una síntesis de las condiciones de evaluación y calibración de la constante del humedal K_{sfh} propuesta por Usaquén (2017). Esta constante ha sido introducida para reflejar las dinámicas potenciales de sedimentación, floculación, absorción, co- precipitación con sedimentos cohesivos y adsorción, entre otros procesos, que ocurren en humedales naturales y construidos (oxidación, volatilización, etc.) y que pueden modificar la concentración de iones disueltos en el humedal (Deltares, 2013; Maine et al., 2017; Huser et al., 2016; Machado et al., 2017; Liang et al., 2017; Stephansen et al., 2014; Wu, Kuschik, Brix, Vymazal, & Dong, 2014; Nivala et al., 2013).

Los datos mencionados anteriormente fueron los usados para la calibración del año 2015. Para los años 2016 y 2017 se utilizarán los parámetros calibrados, se hará validación y ajuste de las detracciones del sistema.

3.4. Análisis estadístico de datos

Las pruebas estadísticas realizadas en el proyecto se realizaron usando el software SPSS versión 22.0 y se describen a continuación.

3.4.1. Pruebas de bondad de ajuste.

Las pruebas de bondad de ajuste se utilizan para contrastar si los datos de la muestra pueden considerarse que proceden de una determinada distribución o modelo de probabilidad. Por ejemplo, cuando se desea saber si los datos que manejamos proceden de una distribución normal, binomial, de Poisson, exponencial, etc. En definitiva, las pruebas de bondad de ajuste permiten verificar qué tipo de distribución siguen los datos y, por tanto, qué pruebas (paramétricas o no) hay que llevar a cabo en el contraste estadístico. (Romero, 2016).

La prueba puede utilizarse tanto para hipótesis simple o compuesta. Este paso es fundamental para determinar si es viable utilizar una distribución determinada en una serie de datos, la prueba de bondad de ajuste requiere que el valor estadístico de prueba de la muestra (D_n) sea menor que el valor tabulado ($D_n \alpha$) para un nivel de probabilidad requerido, a fin de que la prueba sea aceptada. Cada distribución, independiente del tipo que sea tiene diferentes parámetros; cada uno de ellos con características propias y dependientes de la distribución a la que se relacionen. Existen diferentes métodos o estimadores para el cálculo de los parámetros de una función de distribución; es necesario que los estimadores cumplan con las propiedades de ser no sesgados, regulares, eficientes, suficientes y consistentes (Yepes, 2001; Acosta & Sierra, 2013).

Cada distribución de probabilidad tiene parámetros, que deben ser ajustados por métodos que cumplan con las propiedades anteriores. De la misma manera, debe buscarse que cada método

pueda ajustar los parámetros de la distribución de probabilidad que se vaya a utilizar. Entre los métodos de estimación de parámetros pueden mencionarse, en orden ascendente de eficiencia de manejo : el método de los momentos ordinarios (OM) , el método de los momentos ponderados por probabilidad (PWM) y el método de máxima verosimilitud (ML) (Gumbell,2004; Acosta & Sierra, 2013).

Método de los momentos ordinarios (OM) : Este método considera que una estimación adecuada de los parámetros de una función de probabilidad es aquella para la cual los momentos de la función de densidad de probabilidad alrededor del origen son iguales a los momentos correspondientes a la información de la muestra (Chow,2000; Acosta & Sierra, 2013). Los estimadores calculados mediante el método de los momentos son asintóticamente eficientes, particularmente en distribuciones asimétricas, que son las más usadas en hidrología; esta eficiencia hace que este método se use en muchos casos como una primera aproximación en la estimación de los parámetros (Koutsoyiannis, 2004; Acosta & Sierra, 2013).

Método de los momentos ponderados por probabilidad (PWM) o L - Moments : Este método es similar al de los momentos ordinarios , y se basa en que una función de distribución puede ser caracterizada por momentos ponderados por la probabilidad ; por lo tanto , basta con calcular los momentos ponderados por la probabilidad a partir de los datos muestrales . El PWM tiene ventaja teórica sobre el método de los momentos convencional, pues con él se caracteriza una amplia gama de funciones de distribución y, además, es un método más robusto ante la presencia de puntos extraordinarios en la muestra “ Outliers ” , cuando se calculan los parámetros a partir de los datos muestrales (Pulgarin,2009; Acosta & Sierra, 2013).

Método de máxima verosimilitud (ML) : Este método busca que el valor de un parámetro en una distribución de probabilidad sea el valor que maximizará la verosimilitud o probabilidad

conjunta de ocurrencia de una muestra observada ; por tal motivo , representa una mayor precisión desde el punto de vista estadístico , pero puede presentar imprecisiones para muestras de menor tamaño , comparado con los demás métodos ; adicionalmente , es de mayor laboriosidad desde el punto de vista de análisis de datos (Chavoshi,2009 Acosta & Sierra, 2013).

3.4.1.1. Prueba KOLMOGOROV-SMIRNOV.

Conocida como prueba K-S, es una prueba de significación estadística para verificar si los datos de la muestra proceden de una distribución normal. Se emplea para variables cuantitativas continuas y cuando el tamaño muestral es mayor de 50 (Drezner & Turel, 2011; Otsu & Taniguchi, 2020; Xiao, 2017).

3.4.1.2. Prueba de SHAPIRO-WILK.

Se usa para contrastar la normalidad de un conjunto de datos y se basa en el cálculo de la media y la varianza muestral. Esta prueba es similar en este caso al test de Kolmogorov - Smirnov, pero la principal diferencia con éste radica en el número de muestras. Mientras que el test de Shapiro Wilk se puede utilizar con hasta 50 datos, el test de Kolmogorov Smirnov es recomendable utilizarlo con más de 50 observaciones (Drezner & Turel, 2011; Flores Muñoz et al., 2019).

3.4.1.3. Pruebas de Correlación.

Las pruebas de correlación se utilizan para probar la asociación entre dos variables cuantitativas mediante coeficientes de asociación con respecto al grado de ajuste. Dos coeficientes usados para definir la relación de los parámetros son el coeficiente de correlación de Pearson, y el coeficiente de correlación de Spearman. Estas dos pruebas se aplican para los parámetros de calidad e indicadores de base hidrodinámica. (Díaz, C. García, M. León, F. Ruiz F. Torres, P.Lizama, 2014).

3.4.1.4. Coeficiente de correlación de Pearson.

El coeficiente de correlación de Pearson permite medir la fuerza y la dirección de la asociación de dos variables cuantitativas aleatorias con una distribución bivariada conjunta. En este caso sólo se busca comprobar que cada variable (pH, DQO, DBO₅, SST, T°, entre otros) por sí solas presenten una distribución normal univariada. Los valores de la correlación de Pearson van desde -1 hasta 1, siendo los valores extremos los que indican mayor correlación entre variables, y siendo el 0 el punto que indica la no existencia de correlación. El signo positivo o negativo del coeficiente indica si la relación es directa (positivo) o inversa (negativo). La correlación no implica causalidad o dependencia. (Flores Muñoz et al., 2019)

3.4.1.5. Correlación de Spearman.

El coeficiente de correlación de Spearman, al igual que el de Pearson, muestra una asociación entre variables. A diferencia del anterior, permite obtener un coeficiente de asociación entre variables que no se comportan normalmente, entre variables ordinales. Se calcula con base en una serie de rangos asignados. Tal como en Pearson, los valores van de - 1 a 1, siendo 0 el valor que indica no correlación, y los signos indican correlación directa e inversa (Ortega et al., 2009).

4. Evaluación de la calidad del agua en el Lago Sochagota (Boyacá) mediante indicadores socio-ecológicos de base hidrodinámica.

En el presente capítulo se evalúa la calidad del Lago Sochagota mediante la aplicación de la metodología OSSEM y la correlación con la calidad medida en el lago. Para ello, se presenta la descripción del sistema, el cálculo y valoración de los descriptores estratégicos, el índice de susceptibilidad conjunta (OSI) y la correlación de los resultados con la calidad de agua para los años 2015, 2016 y 2017. Para el cálculo de los descriptores estratégicos (potencial de renovación, potencial de salinización y potencial de déficit hídrico), se emplean un modelo tridimensional (Delft3D), desarrollado en la tesis doctoral “Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas” (Usaquén-Perilla, 2017), los cuales han sido calibrados y validados para el año 2015, previo a la aplicación de la metodología OSSEM.

En el caso concreto del Lago Sochagota se proponen los siguientes objetivos de gestión: i) satisfacer las necesidades de agua (cantidad y calidad) para mantener las condiciones de usos directo e indirecto y potencial del medio, sin comprometer el recurso base del humedal; y, ii) mejorar el estado ecológico del humedal, maximizando los beneficios deseables por el sector agrícola y turístico.

4.1. Descripción del sistema

La identificación de las tensiones socio-ecológicas (actividades, flujos de intercambio, condiciones físicas, morfológicas, hidrológicas, climáticas, de calidad y operativas), en los límites del sistema, permite la formulación del modelo conceptual del Lago Sochagota para la posterior definición de estrategias de gestión del humedal o su evaluación. El modelo conceptual del sistema se presenta de manera simplificada en la figura 4.1.

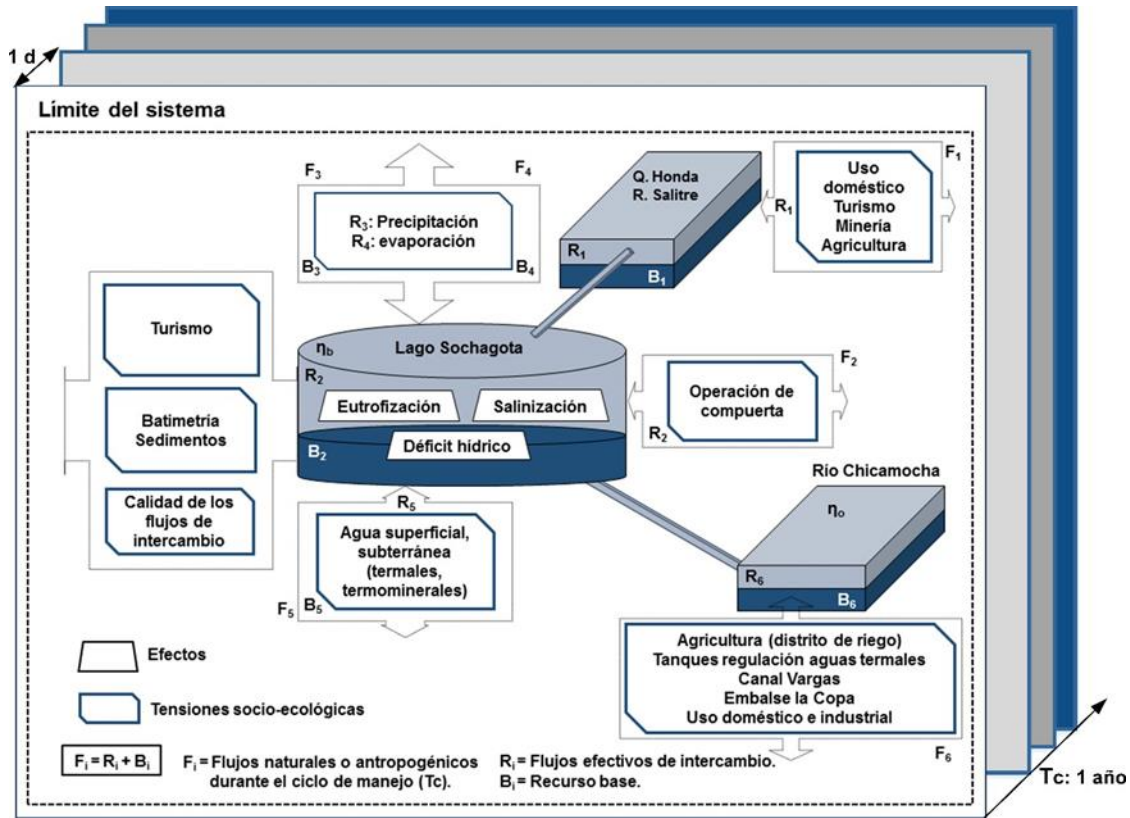


Figura 4.1. Modelo conceptual del lago Sochagota para la aplicación de la metodología OSSEM. Tomado de (Usaquén-Perilla, 2017).

El modelo conceptual del lago Sochagota considera las actividades que se benefician del sistema, los flujos de intercambio entre los diferentes compartimientos (acuífero, atmósfera, quebradas, ríos, zonas de riego, etc.) y los factores que contribuyen directa o indirectamente con los efectos de eutrofización, salinización y déficit hídrico.

4.1.1. Actividades humanas.

Los principales usos del recurso se relacionan con las actividades que se benefician directa o indirectamente del lago, entre ellas: el turismo, la agricultura que se desarrolla en el área cercana al lago y en el distrito de riego. Las actividades municipales y turísticas del municipio de Paipa se benefician del recurso termal y termomineral que ingresa al lago o que se encuentra dentro de los límites del sistema (figura 4.1).

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

Las actividades que se desarrollan en las cuencas de la quebrada Honda-Salitre (domésticas, agrícolas, mineras, turísticas) ejercen una tensión indirecta sobre el sistema, tanto por su conexión con el Lago Sochagota y su regulación mediante una compuerta.

Los principales cultivos que se desarrollan en el área de influencia del sistema objeto de estudio son: pastos, frutales (durazno, ciruela, manzana, pera), cebolla, patata (papa), maíz, arveja, tomate, remolacha, entre otros. El sistema que predomina para el riego de pastos de ganado (Usaquén-Perilla, 2017).

Dentro de los objetivos de calidad del lago se ha propuesto el uso recreativo de contacto secundario y primario.

4.1.2. Límites del sistema.

El modelo conceptual (figura 4.1) permite delimitar el sistema, lago Sochagota y sus flujos de entrada y salida: cuenca de la quebrada Honda, río Chicamocha, subsuelo y atmósfera. El principal flujo de entrada es quebrada Honda, la principal salida se da con la conexión con el río Chicamocha, esta se realiza a través de un canal con su respectiva compuerta. Por otro lado, la interacción con el subsuelo ocurre por diversos afloramientos termales en el lago y los demás aportantes o salidas corresponden a las características climáticas que se ven influenciadas en el área de estudio (precipitación y evaporación) y las detracciones para diferentes usos o vegetación.

4.1.3. Características físicas y morfológicas.

El Lago Sochagota es un embalse artificial, con potencialidad para almacenar y regular flujos. Al tratarse de un sistema regulado (figura 4.1) la operación de este puede generar efectos que contribuyen a la eutrofización, la salinización y el déficit hídrico del sistema.

Para el modelo se desarrolló una malla numérica (modelo tridimensional). Esta se obtiene a partir de la batimetría (figura 4.2 a).

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

La definición de las curvas del vaso de almacenamiento (cambio del área superficial) (Figura 4.3 a) y del volumen en función de la profundidad en el humedal (figura 4.3 b) se desarrolla mediante el uso del modelo digital del terreno (figura 4.2 b). Los datos batimétricos corresponden con el levantamiento realizado por la firma Geoespacial para Corpoboyacá en el año 2015. Haciendo uso de la herramienta RGFGGrid de Delft3d (Deltares, 2014) se obtiene la profundidad del lago en todo el dominio de cálculo (Figura 4.3 d).

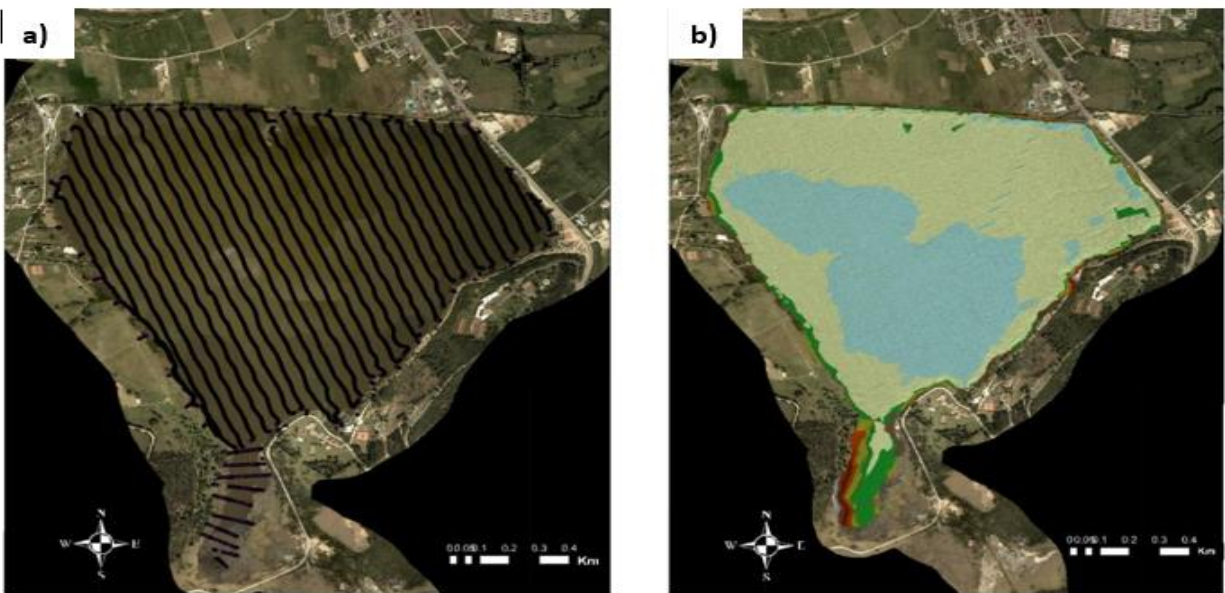


Figura 4.2. Información de terreno Lago Sochagota. Tomado de (Usaquén-Perilla, 2017)

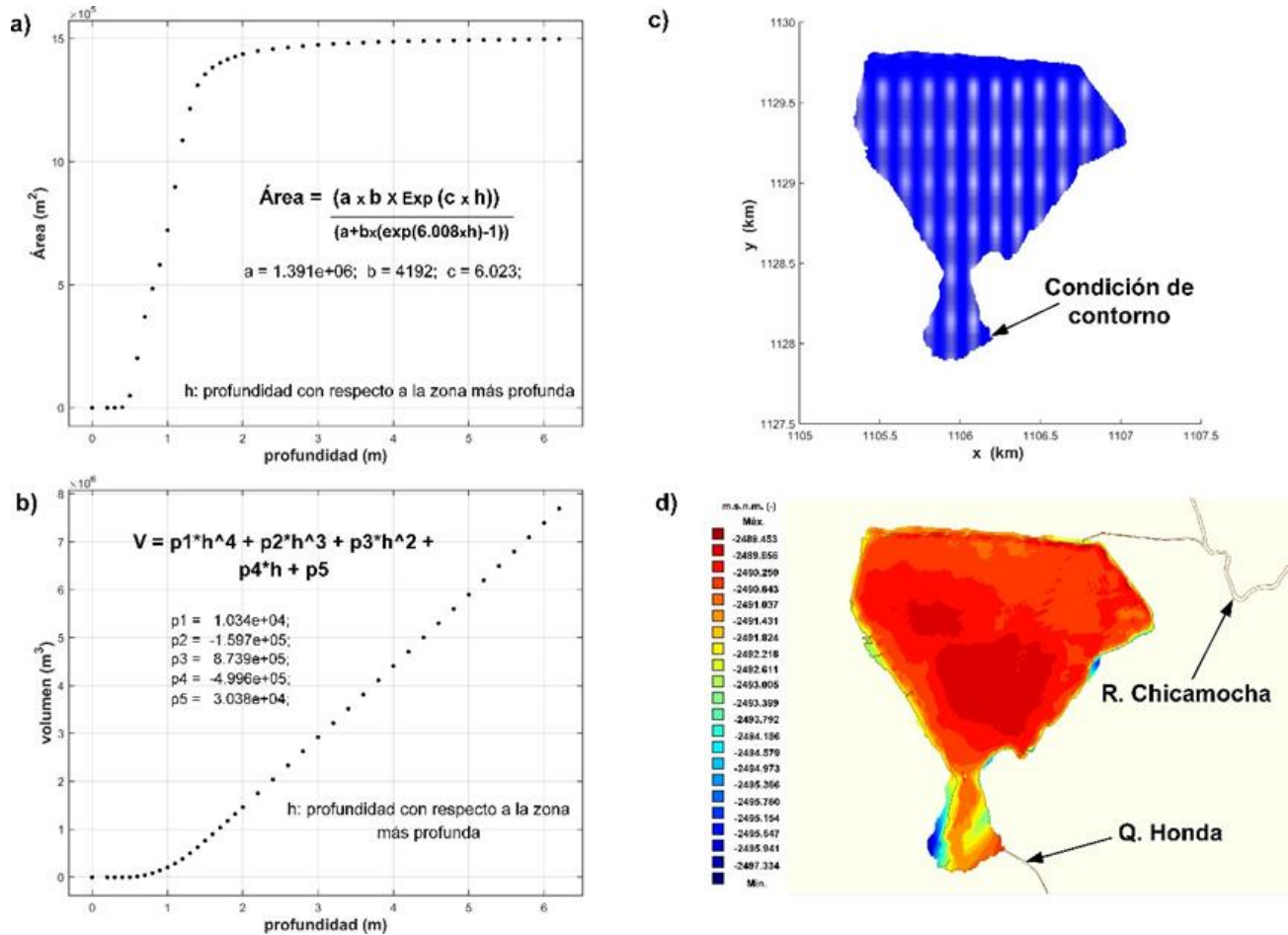


Figura 4.3. Curvas del vaso de almacenamiento y condiciones de contorno Lago Sochagota. Tomado de (Usaquén-Perilla, 2017).

4.1.4. Condiciones hidrológicas y climáticas.

En el área de influencia, los meses secos corresponden a diciembre, enero, febrero, julio y agosto, alternan con los periodos de mayor precipitación, marzo, abril, mayo, junio, septiembre, octubre y noviembre. El Lago Sochagota intercambia flujos de origen superficial y subterráneo. Recibe flujos desde la quebrada Honda, precipitación directa y afloramientos que se suman al balance hídrico junto con los flujos naturales (evaporación, precipitación) y se reflejan en el nivel del agua del Lago.

El nivel del lago es registrado diariamente en el sector nor-este (zona de la compuerta) por personal del Distrito de Riego y Drenaje de gran escala del Alto Chicamocha y Firavitoba

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

(Usochicamocha). La evolución temporal diaria de la precipitación, la evaporación y la condición de viento, pueden generar un efecto importante sobre la variación del nivel del Lago Sochagota.

Los registros de estas variables han sido obtenidos de la estación de referencia (24035170) Tunguavita del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Esta estación se encuentra localizada 1 km aguas arriba del punto de descarga de la quebrada Honda al Lago Sochagota (sector sur). Por otro lado, los registros de caudal en la quebrada Honda – río Salitre se realizan en la estación el Molino (5.5 km aguas arriba del punto de descarga de la quebrada Honda al lago, sector sur). Para este estudio se dispone de registros de caudal proporcionados por el IDEAM. A continuación, se presenta el comportamiento del nivel del lago y las condiciones climáticas para los periodos que se evaluarán.

4.1.4.1. Año 2015.

Para el año 2015 se evaluarán los meses de abril y agosto, el comportamiento de nivel en el lago en el mes de abril se puede observar en la figura 4.4.

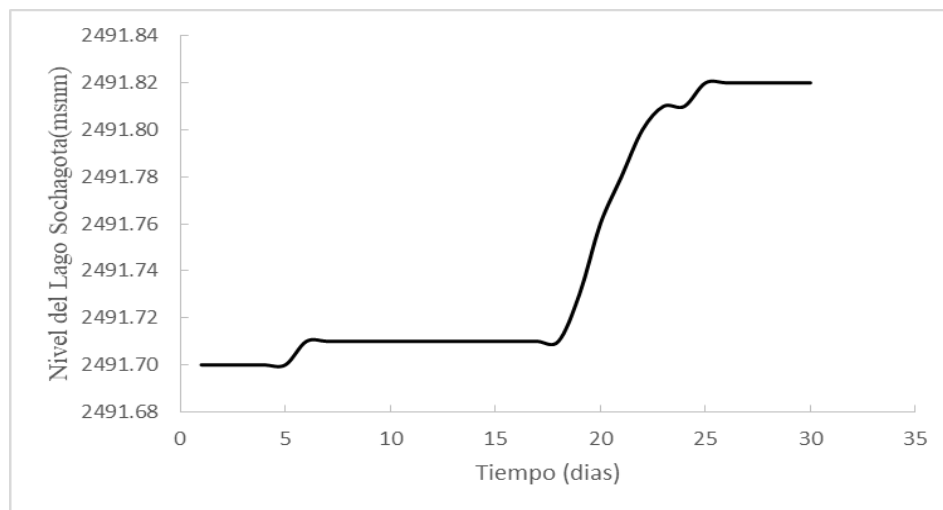


Figura 4.4. Nivel de agua en abril de 2015 en el Lago Sochagota. Elaboración propia a partir de registros del IDEAM.

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

En la Figura 4.4 se percibe, que del día 17 al 30 de abril el nivel de lago sube, esto se puede deberse a que en este mes el flujo de caudal de entrada (Quebrada honda) registra un aumento de caudal en la estación limnimétrica El Molino. (ver figura 4.5).

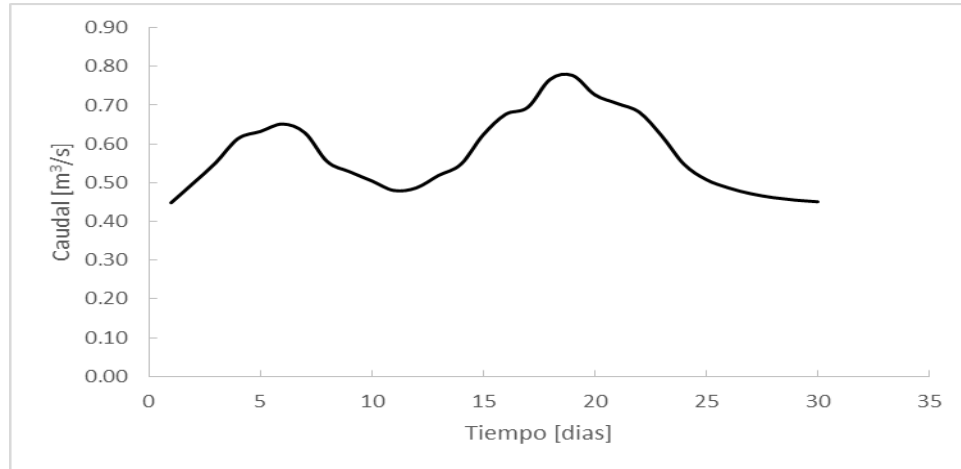


Figura 4.5. Caudal Quebrada Honda en abril de 2015. Elaboración propia a partir de registros del IDEAM.

En la figura 4.5 se puede observar que el comportamiento del caudal oscila desde 0.42 hasta 0.8 m³/s, puede observarse que la variación de caudal tiene una relación con el régimen de precipitación registrado para ese mes, como se observa en la figura 4.6. Por otro lado, se observa que el aumento de caudal en los primeros días del mes es más bajo que en los 15 días posteriores, pese a tener una mayor precipitación, esto puede darse debido a que las condiciones de humedad antecedente del mes de abril influyen en la respuesta de la cuenca y el aprovechamiento de esta.

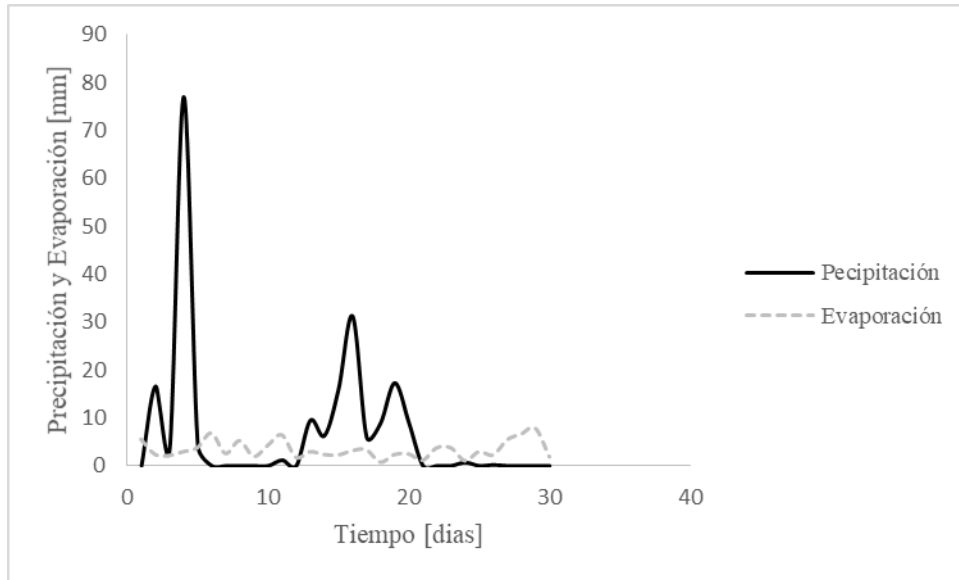


Figura 4.6 . Precipitación y evaporación estación Tunguavita abril de 2015. Elaboración propia a partir de registros del IDEAM.

En la figura 4.6 podemos observar la precipitación y evaporación de la zona de estudio, se observa que hubo dos periodos de lluvia en el mes, la evaporación permanece en un rango de 2 a 8 mm, en cuanto a la precipitación se evidencia un evento de alta precipitación alcanzando 80 mm, estas variables afectarán directamente al lago y a su nivel.

Para el mes de agosto de 2015 se puede ver en la figura 4.7 que el nivel del lago tiene una variación mínima, cabe mencionar que este mes corresponde a un periodo seco y el año es característico de fenómeno de niño.

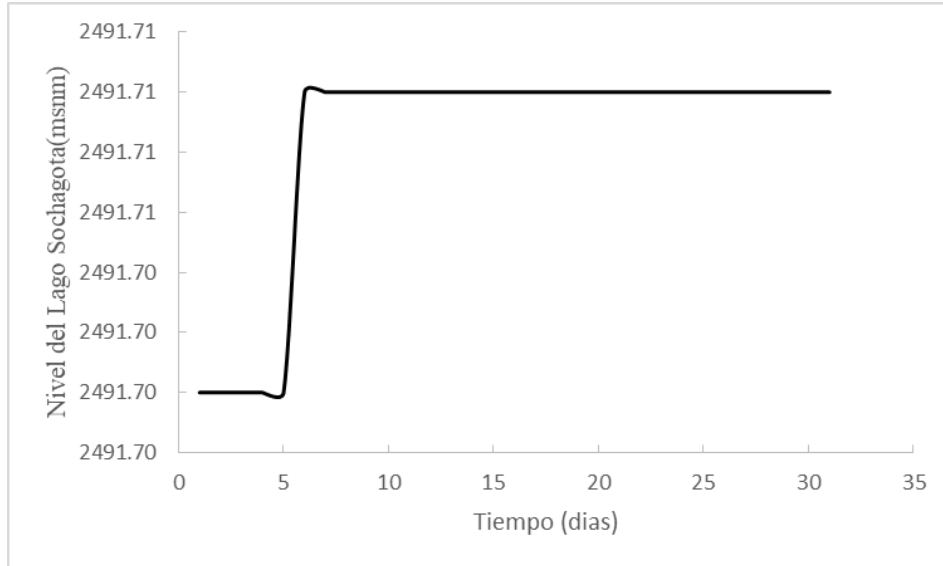


Figura 4.7. Nivel de agua en agosto de 2015 en el Lago Sochagota. Elaboración propia a partir de registros del IDEAM.

En este mes el flujo de entrada al lago registrado en la estación el molino en quebrada Honda (ver figura 4.8), es más bajo que el registrado en abril del mismo año, esto se debe a que las precipitaciones (ver figura 4.9) de este mes fueron más bajas generando menor flujo de escorrentía.

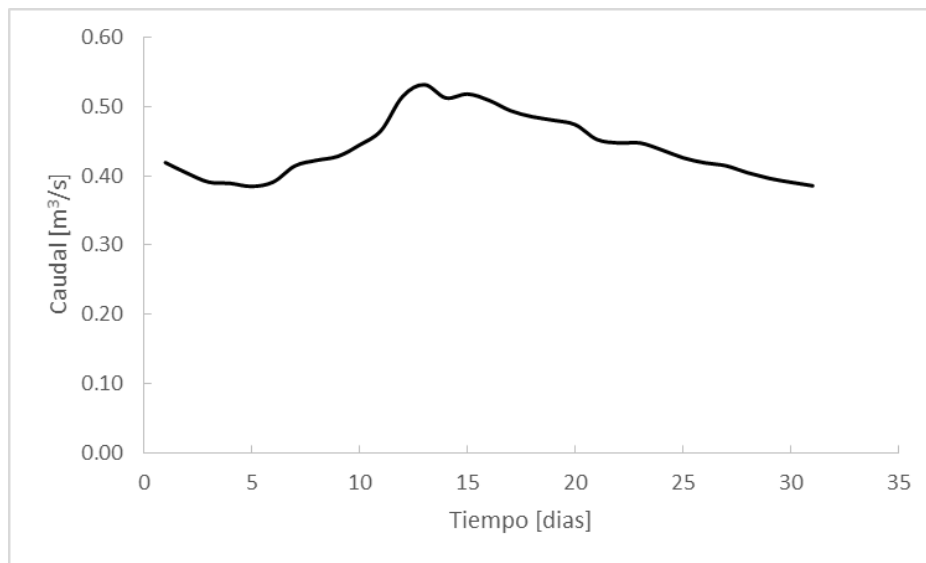


Figura 4.8 . Caudal Quebrada Honda en agosto de 2015. Elaboración propia a partir de registros del IDEAM.

En la figura 4.8 puede observarse un aumento de flujo del día 10 a 14 e cual corresponde con la precipitación ocurrida en este mes (ver figura 4.9).

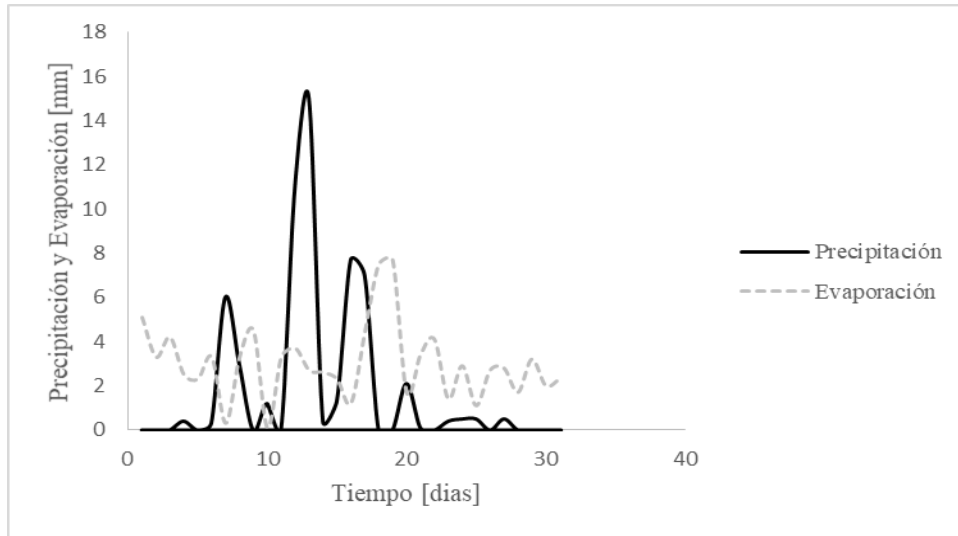


Figura 4.9. Precipitación y evaporación estación Tunguavita agosto de 2015. Elaboración propia a partir de registros del IDEAM.

Este mes se caracteriza por ser un mes seco y tener una relación evaporación, precipitación menor al mes de abril, en este caso la evaporación permanece en un rango de 1 a 8 mm, mientras que la precipitación varía de 0 a 8 mm con un evento de lluvia que alcanza 16 mm.

4.1.4.2. Año 2016.

Para el año 2016 el periodo que se evaluara corresponde al mes de octubre, este mes se caracteriza por la apertura de compuertas el día 14 de octubre, en la figura 4.10, se evidencia el cambio de nivel y se identifica la apertura de compuerta, esta apertura tiene una duración de 3 días.

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

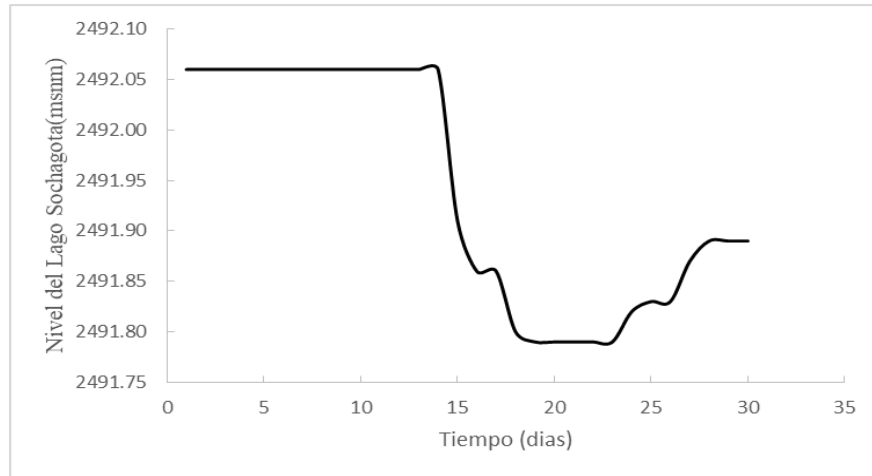


Figura 4.10. Nivel de agua en octubre de 2016 en el Lago Sochagota. Elaboración propia

En la figura 4.10, se percibe influencia de la apertura de la compuerta en el nivel del lago, por otro lado, se observa un aumento de nivel desde el día 23, esto se debe a que en este periodo de tiempo se presentan precipitaciones que aportan directamente al lago y aumentan el flujo de entrada (Quebrada Honda). (ver figura 4.11).

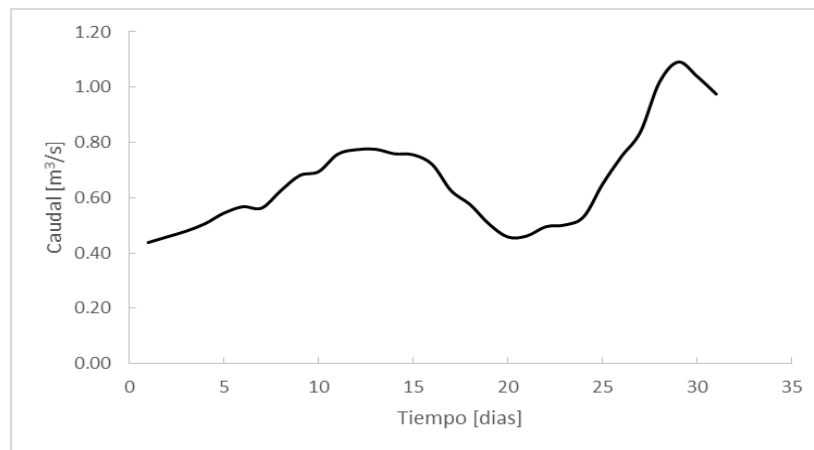


Figura 4.11. Caudal Quebrada Honda en Octubre de 2016. Elaboración propia.

La figura 4.11 representa el flujo de entrada al lago, se puede observar que este periodo tiene la mayor precipitación mensual de los periodos evaluados y se caracteriza por generar caudales altos de entrada al lago, con valores de $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$, también se observa que el comportamiento del flujo varía con respecto a la acción de la evaporación.

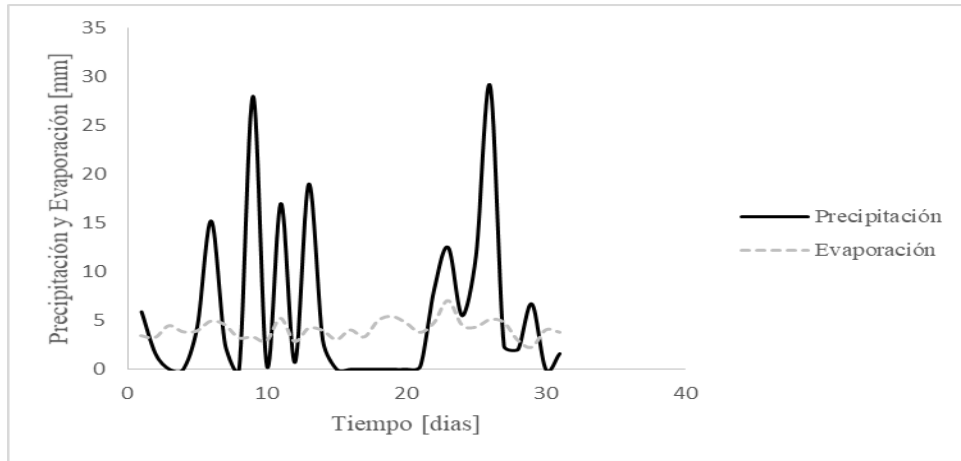


Figura 4.12 . Precipitación y evaporación estación Tunguavita octubre de 2016. Elaboración propia

En la figura 4.12 se observa que el mes de octubre tiene alta precipitación, siendo el mes donde se presenta mayor lluvia diaria, la evaporación se mantiene en un rango de 4 a 8 mm.y la precipitación es recurrente durante el mes alcanzando valores de 10 a 30 mm.

4.1.4.3. Año 2017.

Para el año 2017 se evaluarán los meses de febrero y septiembre, en la figura 4.13 se observa el nivel del lago para el mes de febrero se puede percibir que la variación de nivel es mínima para este mes.

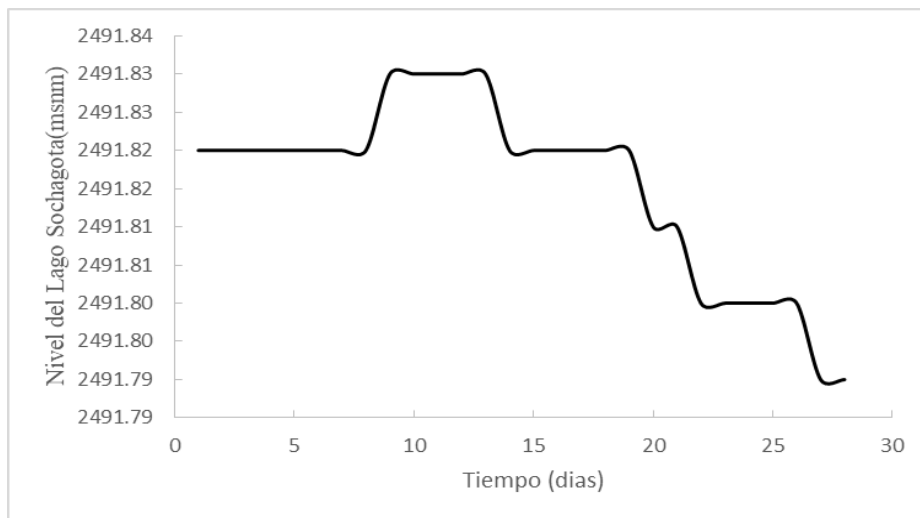


Figura 4.13. Nivel de agua en febrero de 2017 en el Lago Sochagota. Elaboración propia

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

En la Figura 4.13 se observa que la variación del lago va de 1 a 3 cm, esta disminución puede atribuirse a que este mes se caracteriza por ser un mes seco, con un periodo de lluvia muy bajo, este mes se caracteriza por tener una evaporación más alta que la precipitación (figura 4.15).

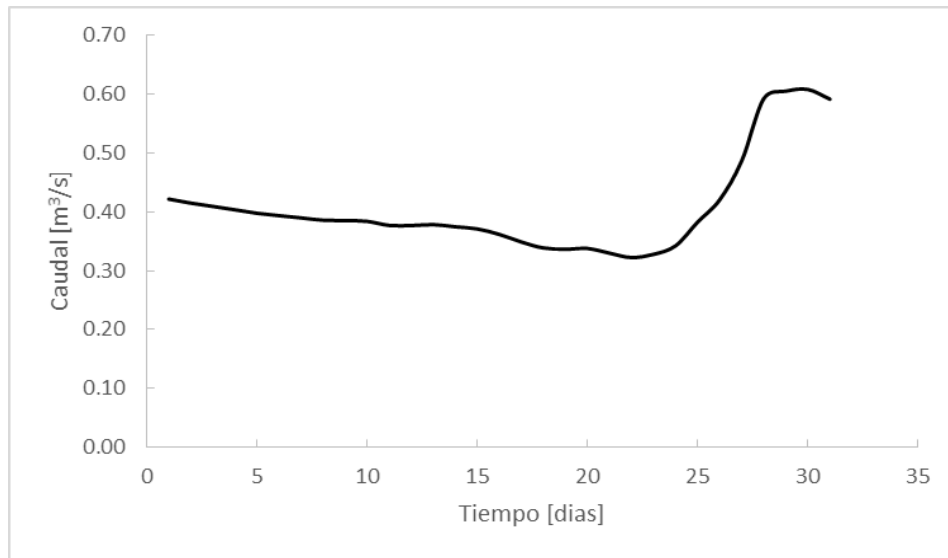


Figura 4.14. Caudal Quebrada Honda en febrero de 2017. Elaboración propia

En la Figura 4.14 se observa el flujo medido en la estación limnimétrica el Molino evidenciando bajos caudales en la mayoría del mes, finalizando este periodo, hay un aumento de caudal el cual se debe a una lluvia presentada el 25 de febrero.

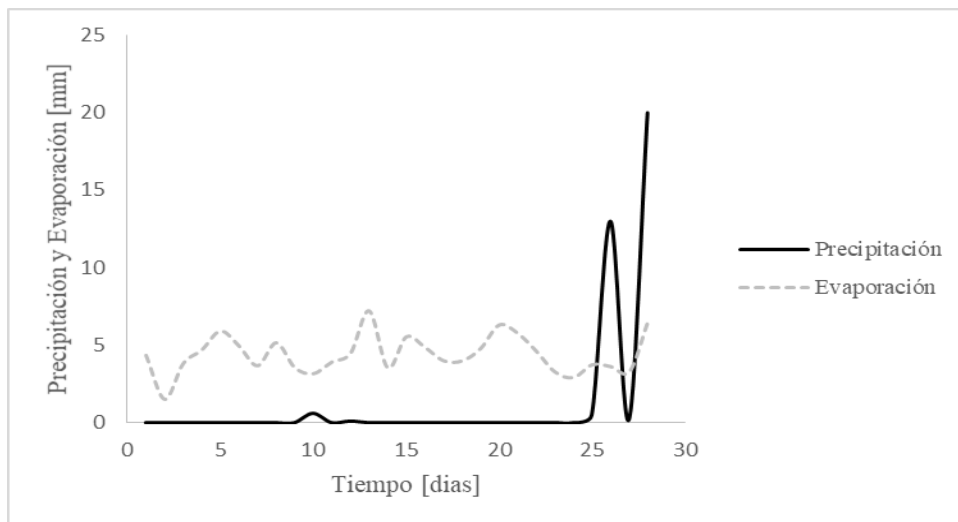


Figura 4.15. Precipitación y evaporación estación Tinguavita febrero de 2017. Elaboración propia

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

En la figura 4.15 se observa la baja precipitación de este mes, caracterizándose por tener valores de evaporación más altos, lo que va a influenciar directamente en el nivel del lago.

Finalmente se presenta en la figura 4.16 el nivel del lago para el mes de septiembre, se puede evidenciar que hay un aumento de 8 cm en los primeros 25 días del mes luego hay un aumento de 8 cm más en un periodo más corto esto se debe a un evento de lluvia (ver figura 4.17)

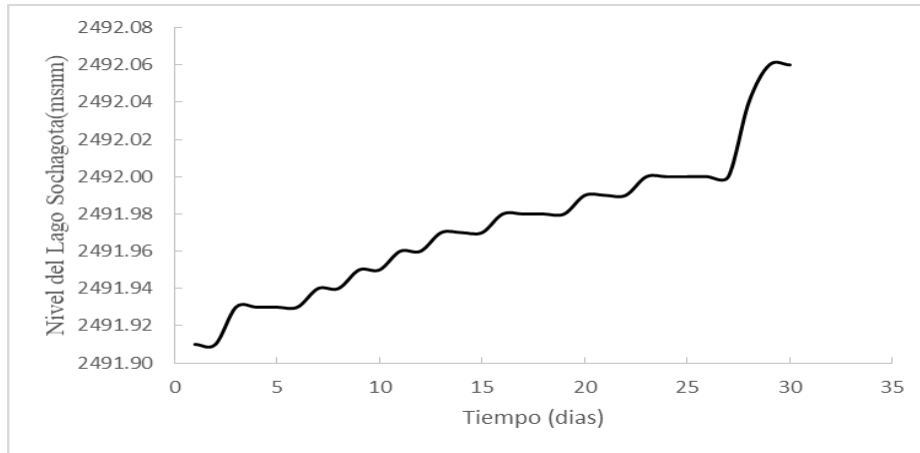


Figura 4.16. Nivel de agua en septiembre de 2017 en el Lago Sochagota. Elaboración propia

En la figura 4.16 se evidencia el flujo de entrada al lago, para este mes oscila de 0.35 a 0.5 m³/s, se puede observar el aumento de caudal en dos puntos de la gráfica esto se debe a dos eventos de lluvia presentados en el mes (ver figura 4.17).

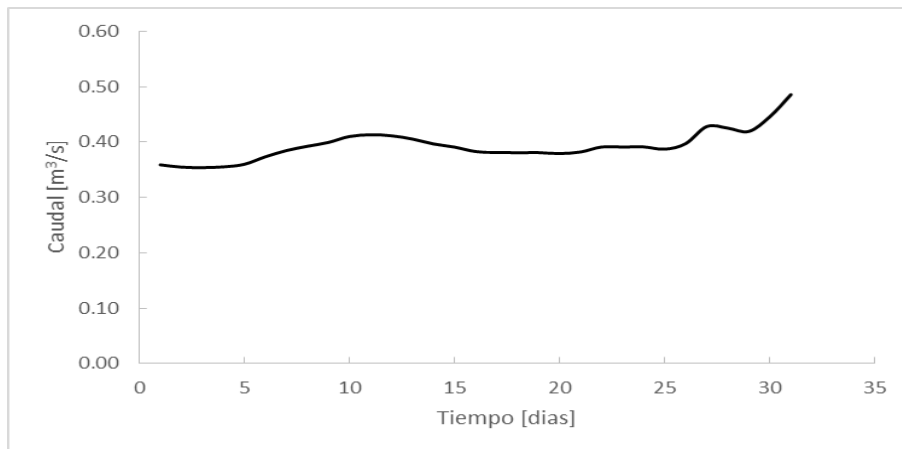


Figura 4.17. Caudal Quebrada Honda en septiembre de 2017. Elaboración propia

En la figura 4.17 se evidencia, que septiembre es un mes con precipitación moderada, en el cual se presentaron varios eventos de lluvia alcanzando valores de 5 a 20 mm, la evaporación para este mes oscila en un rango de 2 a 6 mm.

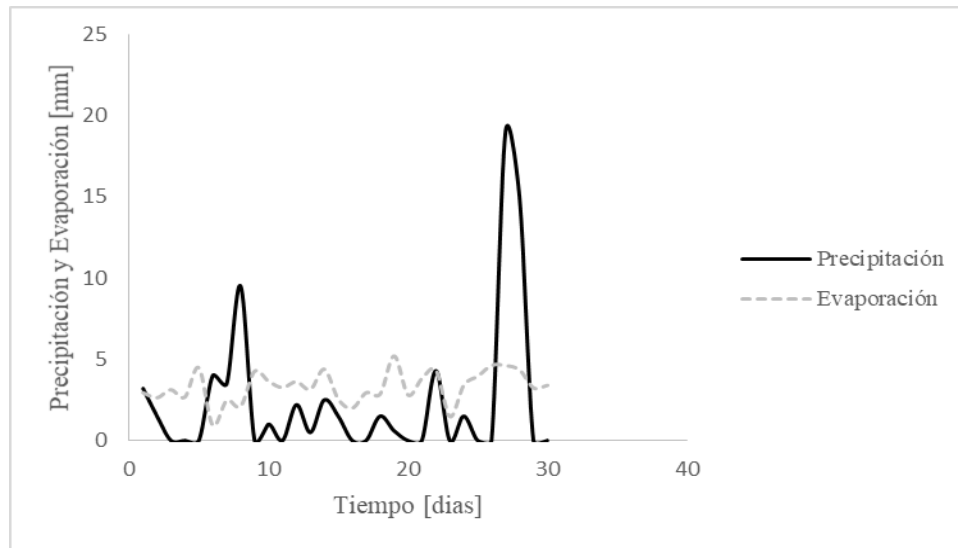


Figura 4.18 . Precipitación y evaporación estación Tinguavita septiembre de 2017. Elaboración propia.

Con base en los datos presentados, se encuentra correspondencia entre el aumento en el nivel, con los valores máximos de precipitación y del caudal afluente al lago de acuerdo con los registros históricos en la quebrada Honda.

4.1.5. Velocidad del viento

Usaquén (2017), identifica que la principal tensión que ejerce un efecto en las corrientes del lago es el viento. Los valores máximos de velocidad de la corriente 0.025 m/s sugieren condiciones propicias para la sedimentación y se identifican en la zona central del lago en el mes de agosto. La magnitud y dirección de la velocidad, así como la formación de corrientes en dirección opuesta a la dirección del flujo en la condición de contorno, es un patrón que se detecta en la campaña de medición de velocidad (en superficie) realizada en febrero de 2017 por la Universidad de Boyacá.

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

Para el presente estudio se usará la información de viento para alimentar el modelo, este ha sido caracterizado a partir de los registros diarios de la estación meteorológica Tinguavita, la información para los periodos evaluados (2015,2016 y 2017) se observa en las figuras 4.19 a la 4.24. La distribución de frecuencia, en función de la dirección y la velocidad del viento, se representan junto con la serie temporal de velocidades diarias.

Para la evaluación de la frecuencia en función de la dirección (Ver figura 4.19) se usa la información del año 2015, debido que para los otros años no se cuenta con información de la dirección del viento. Por tal motivo para los diferentes años a evaluar se asumirá que la dirección del viento del mes corresponde al comportamiento de los meses evaluados en el año 2015.

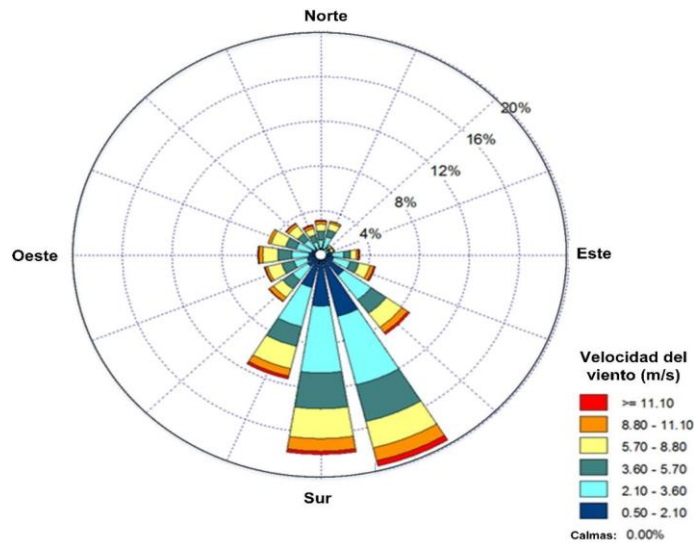


Figura 4.19. Rosa del viento estación Tinguavita año 2015. (Usaquén-Perilla, 2017)

En la figura 4.19 se observa que en la zona de estudio el viento es prevaleciente desde el Sur-Este, por otro lado, a través de los colores se identifican los rangos de velocidad medidos en la estación, donde el mayor porcentaje de tiempo el valor representativo es de 2.1 a 3.6 m/s. Entonces, los vientos dominantes vienen del Sur-Este con una velocidad entre 2 a 3.6 m/s.

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

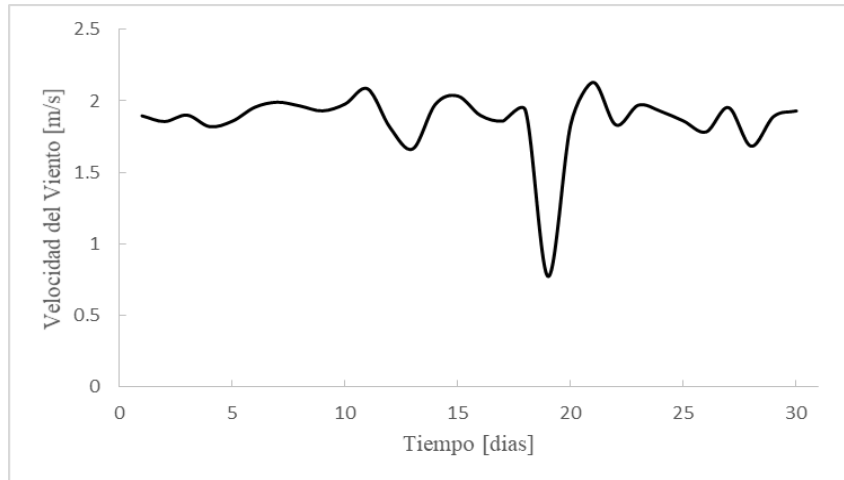


Figura 4.20. Velocidad del viento estación Tunguavita abril de 2015. Elaboración propia a partir de registros del IDEAM.

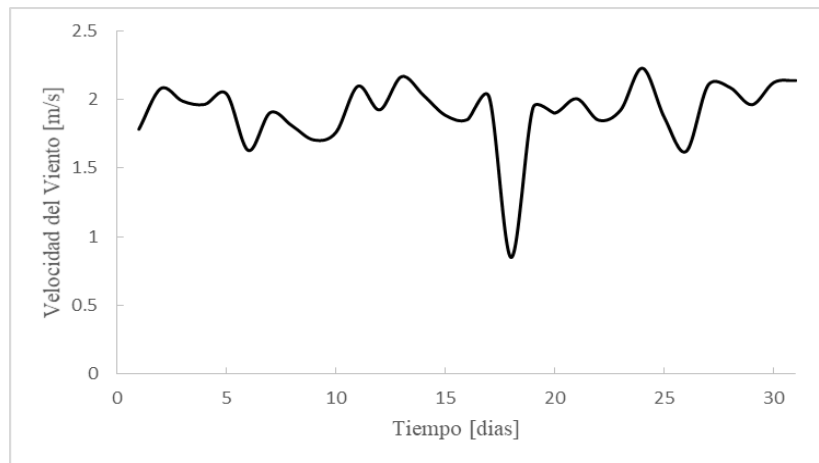


Figura 4.21. Velocidad del viento estación Tunguavita agosto de 2015. Elaboración propia a partir de registros del IDEAM.

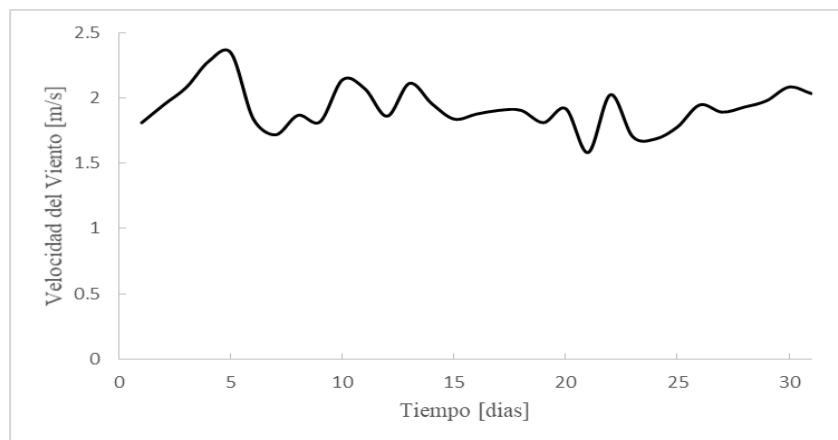


Figura 4.22. Velocidad del viento estación Tinguavita octubre de 2016. Elaboración propia a partir de registros del IDEAM.

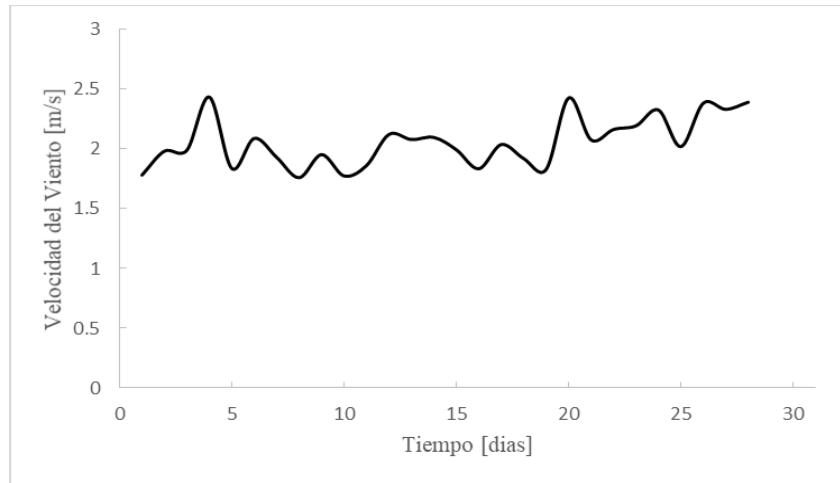


Figura 4.23. Velocidad del viento estación Tinguavita febrero de 2017. Elaboración propia a partir de registros del IDEAM.

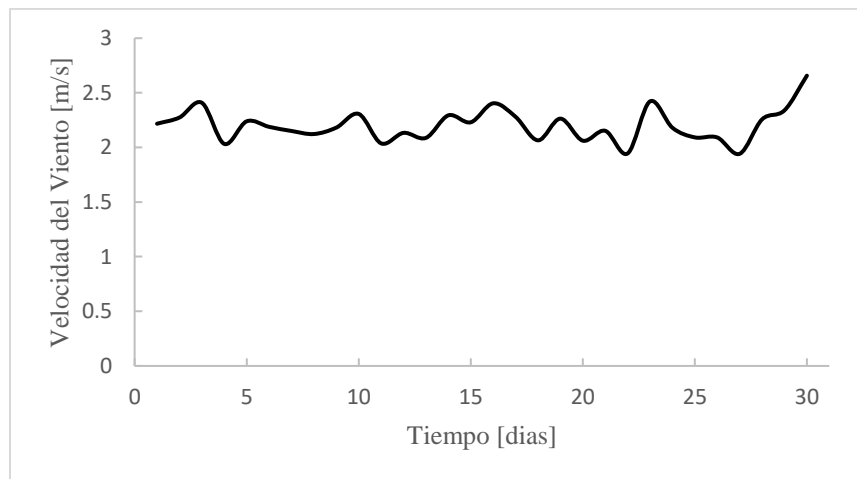


Figura 4.24. Velocidad del viento estación Tinguavita septiembre de 2017. Elaboración propia a partir de registros del IDEAM.

En las figuras 4.20 al 4.24, se presentan los datos de velocidad del viento medidos en 2015(abril y agosto), 2016 (octubre) y 2017 (febrero y septiembre), el comportamiento observado en los diferentes periodos es similar y la velocidad se encuentra en un rango de 2 a 2.5 m/s.

4.1.6. Condiciones de operación.

El efluente del lago es regulado mediante una compuerta que a través de un canal conduce el agua hacia el río Chicamocha. La apertura o cierre de la compuerta conllevan a una variación

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

del nivel en el interior del Lago Sochagota, afectando a la hidrodinámica, tiempo de residencia y renovación del sistema.

El distrito de riego cuenta con un calendario diario de apertura y cierre de la compuerta del lago (tabla 4.1). En cuanto a la gestión actual de apertura y cierre de la compuerta del lago, se encuentran condiciones que pueden comprometer de manera importante la renovación del humedal. Cuando la compuerta se encuentra cerrada, el flujo de salida es el resultado 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 (0.002 – 0.011 m³/s) datos medidos en las campañas de monitoreo realizadas por la universidad de Boyacá.

Tabla 4.1

Relación de aperturas de compuertas lago Sochagota.

Año	Mes	día	Duración en horas de la operación (inicio restricción uso)
2015			No se realizó apertura de compuertas
	Marzo	3	03 de marzo 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 7 de marzo de 2016 https://www.youtube.com/watch?v=wKpzuUfsaXk https://www.youtube.com/watch?v=QSk0SM4QwhQ
2016			
	Julio	3	Mesa técnica para superar la contingencia del lago. https://www.youtube.com/watch?v=3dUc7XMd-Cw Nueva mortandad de peces.
	Julio	11	Julio 11 emergencia, malos olores, mortandad de peces https://www.youtube.com/watch?v=taHr1Krq7UI
	Octubre	14	72 Apertura compuerta 14 octubre 2016 https://www.youtube.com/watch?v=4_iysCpsU70
	Enero	19	48 (2:00 p.m.), apertura compuertas Sistema Paipa
	Marzo	17	96 (10:00 a.m.), con apertura compuertas en la Copa
		31	50 (8:00 a.m.), apertura compuertas Sistema Paipa
	Abril	17	50 (8:00 a.m.), apertura compuertas Sistema Paipa
		11	50 (6:00 a.m.), con apertura compuertas en Sistema Paipa y piscinas de enfriamiento de GENSA
2017	Mayo	12	72 (8:00 a.m.), con apertura compuertas en Sistema Paipa y piscinas de enfriamiento de GENSA
		28	34 (8:00 a.m.), con apertura compuertas en la Copa
	Octubre	2	56 (7:00 a.m.), con apertura compuertas en la Copa
	Noviembre	17	42 (6:00 p.m.), con apertura compuertas en la Copa

Nota: En la Tabla se describe las aperturas de la compuerta del lago Sochagota y su duración, Fuente: Corpoboyacá, Uso Chicamocha. Información consolidada por Universidad de Boyacá, (proyecto Bio293,2020).

4.1.7. Análisis del comportamiento hidrodinámico del lago Sochagota mediante el uso de modelos distribuidos (DELFT 3D).

En la tesis doctoral “Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas” (Usaquén-Perilla, 2017), se desarrolló un modelo hidrodinámico para el lago Sochagota, utilizando la herramienta computacional DELFT 3D. Este modelo se evaluó y calibró para el año 2015 como se indica en el capítulo 3.4. calibración del modelo”,

Con este modelo se extraerá los resultados para 2015 (abril y agosto), y se actualizarán los registros correspondientes para simular las condiciones hidrodinámicas de 2016 (octubre), y 2017 (febrero y septiembre). Para realizar la simulación se partirá del modelo calibrado y se hará un ajuste de las detracciones del sistema de tal manera que el nivel modelado del lago corresponda a las series medidas.

El modelo, se alimenta con la información de los flujos de entrada y salida (ver figura 3.2) del sistema como son: el caudal de quebrada Honda, la precipitación, la evaporación, aportes subterráneos (afloramientos de agua localizados por fotos aéreas de 1956 previo a la construcción del lago (Corpoboyacá 1998)) y diferentes detracciones (asociadas a salidas para riego, zonas con vegetación macrófita y fugas por la naturaleza del material constructivo de la barrera física que delimita el lago), de la misma manera la velocidad del viento definirá el comportamiento del flujo dentro del lago, por tal motivo se tiene en cuenta.

Usaquén (2017) Para la salinidad del modelo tuvo en cuenta las siguientes consideraciones:

los principales aportes de salinidad se realizan a través de la quebrada Honda y las aguas termales, termo minerales y similares. La concentración de sales se asume variable para la condición de contorno y constante en los flujos que representan el aporte de origen

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

subterráneo; Para el flujo de entrada de quebrada Honda la concentración de sales durante la época de mayor precipitación (precipitación mayor que cero) se asume constante y equivalente a la mínima registrada en la quebrada Honda, en los días en que la precipitación es igual a cero, la concentración se considera como el promedio obtenido en la campaña de 24 horas realizada en 2015 por la fundación Pro agua, Corpoboyacá con apoyo de la Universidad de Boyacá y se asume con base en registros históricos una conductividad mínima o geogénica en el Lago Sochagota (So) de 2.5 dS/m a 21.2 °C (1.4 ups); la salinidad en los aportes de flujo y en el humedal, se calculan empleando la adaptación del modelo de la UNESCO (1986), considerando como variables de entrada la conductividad y la temperatura del agua.(p.244).

Para la modelación de los periodos 2016 y 2017 se tendrá las mismas consideraciones expuestas.

Para la corrida de los modelos, se usa el modelo calibrado y se alimenta con las series climáticas de 2016 y 2017 (capítulos 4.1.4 al 4.1.6 del presente documento), precipitación, evaporación caudal de entrada proveniente de quebrada honda, apertura de compuerta (si la hay) y las características de conductividad medidas en los años 2016 (octubre) y 2017 (febrero y septiembre). Una vez corridos los modelos, se realiza ajuste en las detracciones del sistema y se valida la información obtenida con el nivel medido en el lago. El grado de ajuste entre el nivel del lago medido y simulado, se evalúa mediante el uso de los siguientes criterios estadísticos (tabla 4.2).

Tabla 4.2

Criterios de evaluación del ajuste entre el nivel de agua medido y simulado en el humedal.

Criterio	Definición	Observaciones
Diferencia entre el nivel medido y simulado, DL (m ²)	$D_L = \sum_i^N (Z_i - Z_i^*)^2$	Z _i : nivel medido (m). Z _i *: nivel simulado (m). i: i-ésimo valor, desde 1 hasta N días.
Coefficiente de correlación (R ²)	$R^2 = \frac{ssr}{sst}$ $ssr = \sum_i^N (Z_i^* - \bar{Z})^2$	sst = ssr + D _L ss: suma del residual Z̄: nivel medio medido (m). N: número de registros
Eficiencia del modelo (CE) (Nash & Sutcliffe, 1970)	$CE = 1 - \left(\frac{D_L}{r}\right)$ $r = \sum_i^N (Z_i^* - \bar{Z})^2$	Habilidad del modelo: CE > 0.8 excelente. CE > 0.5 conveniente (bueno). CE < 0.5 no aceptable.
Error relativo ER (%)	$E_r = \frac{\left(\sum_i^N \frac{ Z_i^* - Z_i }{Z_i} \times 100\right)}{n}$	El modelo es confiable si (E _r) es menor al 20% (Thoman & Mueller, 1987)

Nota: la tabla presenta la síntesis de los criterios de evaluación de ajuste del modelo y la variable de respuesta tenida en cuenta.

Se presenta la comparación de los datos medidos con los datos del modelo, donde se evidencia el ajuste de estos dos resultados.

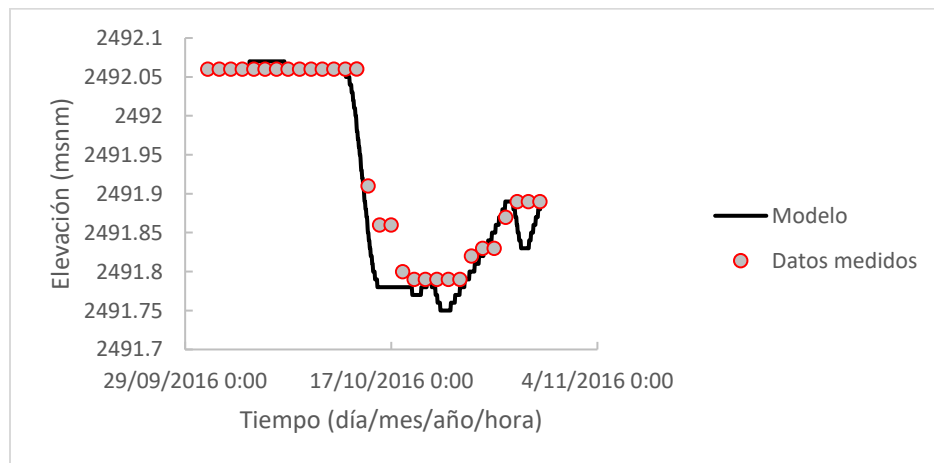


Figura 4.25 . Nivel del agua en la zona de la compuerta año 2016. Elaboración propia.

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

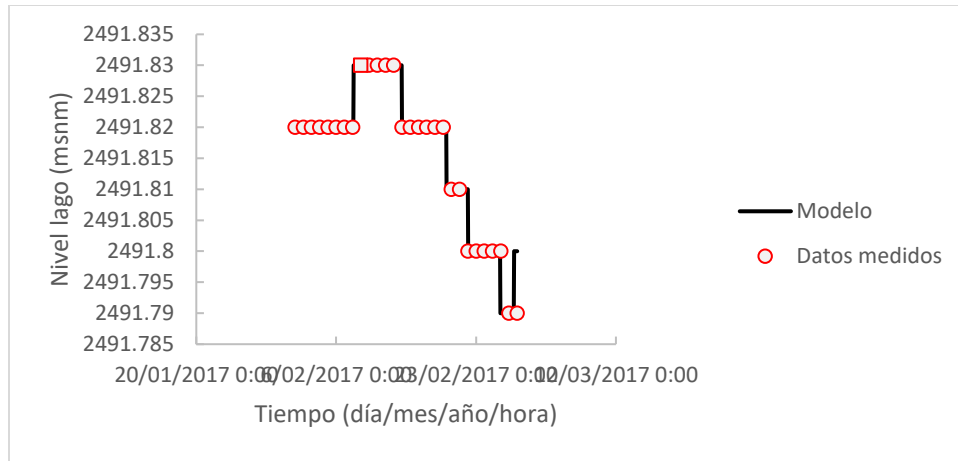


Figura 4.26 . Nivel del agua en la zona de la compuerta febrero del 2017. Elaboración propia.

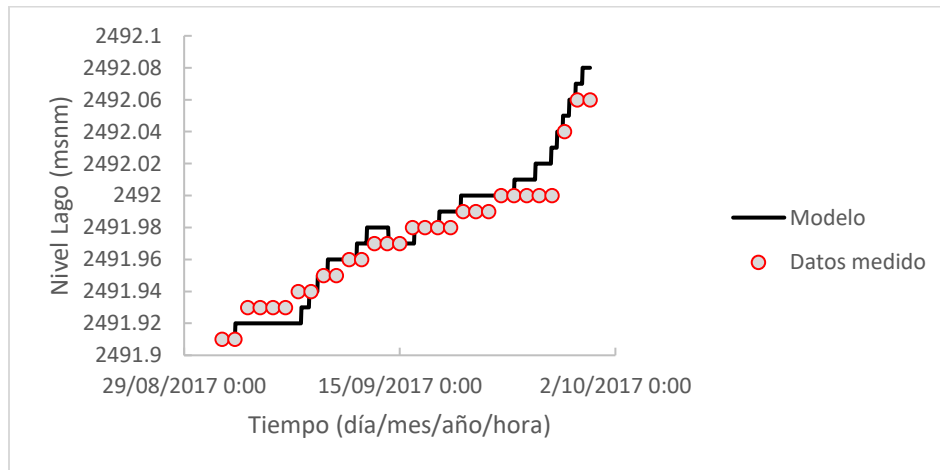


Figura 4.27 . Nivel del agua en la zona de la compuerta septiembre del 2017. Elaboración propia

Finalmente, los criterios de ajuste para el modelo son confiables para proceder al cálculo de los indicadores, esto se ve reflejado en la tabla 4.3.

Tabla 4.3.

Criterios de ajuste para 2016 y 2017.

Año	Criterio de ajuste	Variable de respuesta
2016	DL: 0.0365 (m ²) R2: 0.931 Ce: 0.926 (Excelente) Er: 0.00087 (confiable)	Nivel del agua en la zona de la compuerta (2490.31 m.s.n.m)

Año	Criterio de ajuste	Variable de respuesta
2017 (febrero)	DL: 0.0003 (m ²) R2: 1.0 Ce: 1.0 (Excelente) Er: 0.000043 (confiable)	Nivel del agua en la zona de la compuerta (2490.31 m.s.n.m)
2017 (Septiembre)	DL: 0.037 (m ²) R2: 0.942 Ce: 0.938 (Excelente) Er: 0.000334 (confiable)	Nivel del agua en la zona de la compuerta (2490.31 m.s.n.m)

Fuente: Autor.

Para evaluar la salinidad en el periodo 2016 y 2017, se tiene en cuenta la raíz cuadrada media del error (RMSE), definido en la tabla 4.4.

Tabla 4.4

Criterios de evaluación RMSE.

Criterio	Definición	Observaciones
Raíz Cuadrada Media del Error (RMSE).	$RMSE = \frac{100}{O} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} = G$	<p>O_i: Salinidad medida (‰).</p> <p>\bar{o}: Promedio de los datos medidos</p> <p>P_i: Salinidad simulado (‰).</p> <p>i: i-ésimo valor, desde 1 hasta N días.</p> <p>El modelo es confiable si (RSME) es Menor al 10% (Smith y Smith, 2007).</p>

Fuente: Autor.

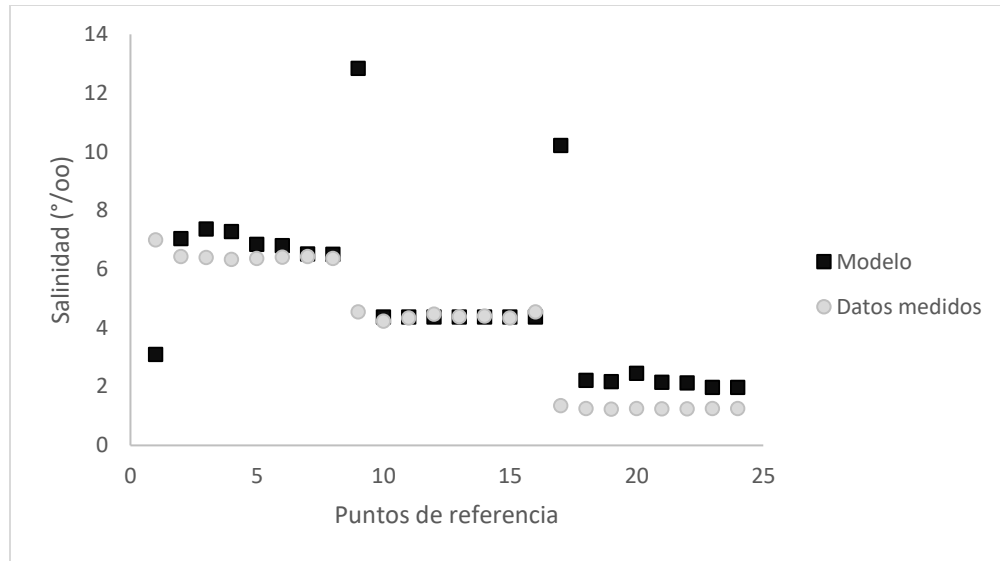


Figura 4.28 . Salinidad con respecto a los puntos de referencia en el periodo 2016 y 2017.
Elaboración propia

El ajuste del modelo de salinidad para el periodo evaluado presenta un ajuste significativo, por lo tanto, el modelo es confiable.

4.2. Cálculo y valoración de los descriptores estratégicos.

Los descriptores estratégicos se calculan en el Lago Sochagota teniendo en cuenta su cambio o comportamiento a escala diaria, los descriptores se calcularán para el mes (a escala diaria) en el que se realizó el muestreo para los diferentes años contemplados (2015,2016 y 2017). Posteriormente, se valora la susceptibilidad conjunta mediante el índice OSI.

4.2.1. Cálculo y valoración del potencial de renovación.

A continuación, haciendo uso de los datos de partida antes descritos en el Capítulo 4.1, se calcula el potencial de renovación diario para cada celda (escala local) con apoyo en el modelo Delft3D, en su versión tridimensional (una capa sigma), previamente calibrado y validado para el año 2015 y actualizado en este estudio para el periodo 2016 - 2017.

El potencial de renovación se calcula diariamente durante el ciclo de gestión mediante la siguiente expresión:

$$P_R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

Ecuación 4

Donde:

P_R : Potencial de renovación diario (%).

C_0 : Concentración de trazador en el instante inicial ($t=0$) (M/V).

C_t : Concentración de trazador al cabo de 24 horas (ΔT_c) (M/V).

4.2.1.1. Umbrales para la valoración de la susceptibilidad a eutrofización.

La capacidad de renovación (potencial de renovación, P_R) permite evaluar la susceptibilidad del Lago Sochagota frente a la eutrofización. En la tesis doctoral “Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas” (Usaquén-Perilla, 2017), se fijaron los límites o umbrales requeridos para evaluar la susceptibilidad del Lago Sochagota a eutrofizarse. Las respuestas del lago a los casos hipotéticos de operación se recogen en la tabla 4.5, los límites se definieron para año crítico 2015 y se emplean para los demás periodos de evaluación.

Tabla 4.5

Límites de Referencia del potencial de renovación (P_R) para el Lago Sochagota.

Escenario	$Q_r (\cdot 10^{-2})$	Q_e	η_b	P	E	PR	Límite
E1			2.33			-1.40	
E2	0.92	0	2.44	0	18.1	-1.30	
E3			2.55			-1.21	
E4			2.33			-0.05	PR1:-1.40
E5	6.36	3.043	2.44	0	0	-0.25	PR2: -0.39
E6			2.55			-0.39	PR3:5.79
E7			2.33			5.79	
E8	0	0	2.44	$\frac{7}{7}$	0.1	5.40	
E9			2.55			5.06	

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

Nota: en la tabla se presentan los límites de referencia para el cálculo del potencial de renovación, calculados en diferentes escenarios donde Q_r : aportes de caudal al humedal (m^3/s); Q_e : caudal de salida del humedal o grado de apertura de compuertas; η_b : superficie libre o nivel en el interior del humedal (m); P : precipitación (m); E : evaporación (m); P_{Ri} : límite del potencial de renovación de referencia (i) en cada categoría (%). (*) Debido al cierre de la compuerta, el nivel en el exterior no genera efecto en la hidrodinámica del sistema de forma directa. (Usaquén-Perilla, 2017).

Una vez obtenida la evolución temporal del potencial de renovación, se valora la susceptibilidad a la eutrofización y se clasifica en función de cuatro categorías de susceptibilidad: muy alta, alta, moderada y baja (Tabla 4.6).

Tabla 4.6

Umbrales para la valoración de la susceptibilidad frente a la eutrofización, a partir de los valores de los descriptores estratégicos.

Susceptibilidad	Umbrales
	P_R
Muy alta	$P_{Ri} \leq P_{R1}$
Alta	$P_{R1} < P_{Ri} \leq P_{R2}$
Moderada	$P_{R2} < P_{Ri} \leq P_{R3}$
Baja	$P_{Ri} > P_{R3}$

P_{Ri} : Potencial de renovación diario global o potencial de renovación medio para el ciclo de gestión en una celda.

P_{R1}, P_{R2}, P_{R3} : Umbrales para la valoración de la susceptibilidad frente a la eutrofización.

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

4.2.1.1.1. *Potencial de renovación año 2015*

Para el cálculo del potencial de renovación se simuló la adición de un trazador en el sistema garantizando una concentración uniforme de 1 ppb en el lago (condición inicial). Para este año se analizará el periodo alrededor de los días 4 de abril y 1 de agosto, que corresponden a las fechas en que se realizó el muestreo de calidad en el Lago.

En la tabla 4.7 se presentan las concentraciones del 4 de abril y 1 agosto a las 00:00 (Co) y la concentración del día 5 de abril y 2 de agosto a las 00:00 (Ct) teniendo en cuenta la hidrodinámica de este periodo de interés.

A continuación, se presenta la tabla 4.7 y 4.8 con las concentraciones mencionadas, el cálculo del potencial y la valoración de la susceptibilidad.

Tabla 4.7

Cálculo del potencial de renovación (P_R) para el Lago Sochagota 4 abril 2015.

Punto	Co (ppb)	Ct (ppb)	PR %	Susceptibilidad a la eutrofización
P1	1	0.49040	50.96	Baja
P2	1	1.00100	-0.10	moderada
P3	1	1.00140	-0.14	moderada
P4	1	1.00110	-0.11	moderada
P5	1	1.00110	-0.11	moderada
P6	1	1.00110	-0.11	moderada
P7	1	1.00130	-0.13	moderada
P8	1	1.00140	-0.14	moderada

Fuente: Autor.

Seguidamente, se presentan el cálculo de potencial de renovación y valoración de la susceptibilidad para el 1 de agosto, (día donde se realiza monitoreo de calidad en el Lago).

Tabla 4.8.

Cálculo del potencial de renovación (P_R) para el Lago Sochagota 1 agosto 2015.

Punto	Co (ppb)	Ct (ppb)	PR %	Susceptibilidad a la eutrofización
P1	1	0.62890	37.11	Baja
P2	1	1.00180	-0.18	moderada
P3	1	1.00240	-0.24	moderada
P4	1	1.00190	-0.19	moderada
P5	1	1.00190	-0.19	moderada
P6	1	1.00180	-0.18	moderada
P7	1	1.00230	-0.23	moderada
P8	1	1.00240	-0.24	moderada

Fuente: Autor.

Se observa que para el 2015 en los dos meses analizados, gran parte del lago se encuentran en la categoría de susceptibilidad moderada, el punto 1 (entrada de Lago) tiene una susceptibilidad baja, lo cual puede deberse a la entrada de flujo de quebrada honda haciendo un cambio de masa de agua en este punto, disminuyendo el tiempo de residencia en esta zona. Por otro lado, abril se caracteriza por ser el mes con la mayor precipitación de este año, mientras que agosto presenta una mayor evaporación.

4.2.1.1.2. Potencial de renovación y valoración de la susceptibilidad año 2016

Para el cálculo del potencial de renovación se simuló el sistema teniendo en cuenta una concentración de trazador de 6.63 ppb en el lago (condición inicial) el 1 de octubre de 2016. Debido a que el muestreo se realizó el 24 de octubre, para el cálculo se tendrá en cuenta la concentración del 24 de octubre a las 00:00 (Co) y la concentración del día 25 a las 00:00 (Ct). A continuación, se presenta la Figura 4.29 la concentración de trazador y la tabla 4.9 con las concentraciones mencionadas y el cálculo del potencial.

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

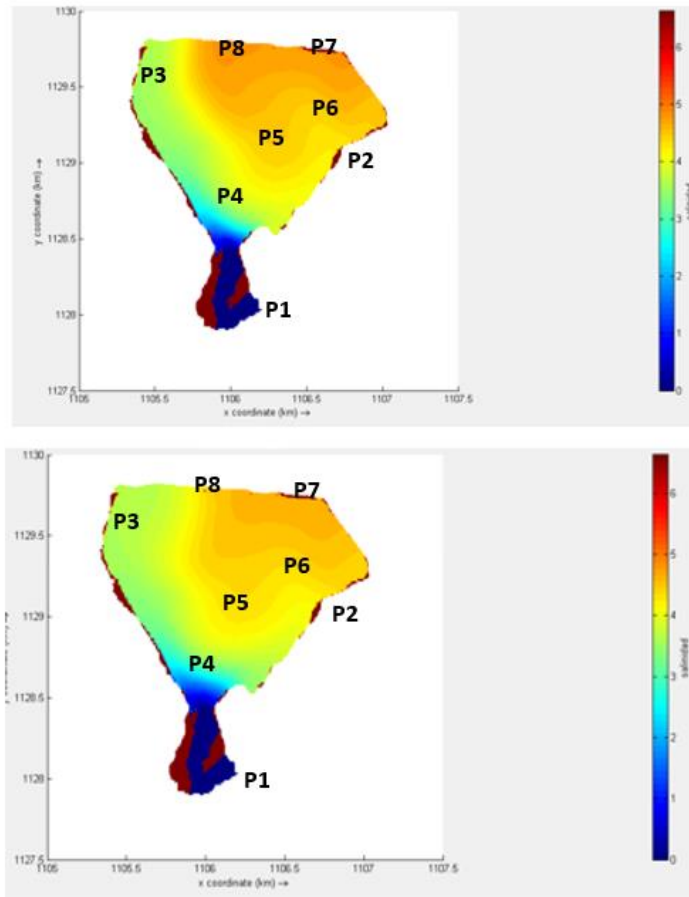


Figura 4.29 . Variación de la concentración de trazador. Elaboración propia.

Tabla 4.9.

Cálculo del potencial de renovación (P_R) para el Lago Sochagota 2016.

Punto	Co (ppb)	Ct (ppb)	PR %	Susceptibilidad a la eutrofización
P1	5.15E-13	2.46E-14	95.23	Baja
P2	4.17498	4.09214	1.98	moderada
P3	3.80349	3.72453	2.08	moderada
P4	3.97082	3.98746	-0.42	Alta
P5	4.33601	4.30728	0.66	moderada
P6	4.33416	4.3043	0.69	moderada
P7	4.67517	4.61669	1.25	moderada
P8	4.6844	4.62908	1.18	moderada

Nota: en la tabla se presentan el cálculo de potencial de renovación y valoración de la susceptibilidad para el 24 de octubre, (día donde se realiza monitoreo de calidad en el Lago). Autor

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

Para el año 2016 en el mes de octubre, en gran parte del lago se encuentran en la categoría de susceptibilidad moderada, el punto 1 (entrada de Lago) tiene una susceptibilidad baja, lo cual puede deberse a la entrada de flujo de quebrada honda haciendo un cambio de masa de agua en este punto, disminuyendo el tiempo de residencia en esta zona. El punto 4 del sistema da alta susceptibilidad a la eutrofización, debido a que la concentración del trazador se relaciona con el patrón de la velocidad de la corriente lo que favoreció un aumento de la concentración de trazador en este punto para este día. Este mes para los días analizados se caracteriza por tener un balance positivo entre la precipitación y la evaporación.

4.2.1.1.3. Potencial de renovación y valoración de la susceptibilidad año 2017

Para el cálculo del potencial de renovación se simuló el sistema teniendo en cuenta una concentración de trazador de 4.38 ppb en el lago (condición inicial) el 1 de febrero de 2017 y una concentración de 1.35 (condición inicial) para el 1 de septiembre de 2017. Para el mes de febrero se analizará el día 1 y para septiembre el día 1, Debido a que en estas fechas se realizó el muestreo de calidad en el Lago.

Para el cálculo se tendrá en cuenta la concentración del 1 febrero y septiembre a las 00:00 (Co) y la concentración del día 2 de febrero y de septiembre a las 00:00 (Ct). A continuación, se presenta las figuras 4.30 y 4.31 la concentración de trazador y la tabla 4.10 y 4.11 con las concentraciones mencionadas, el cálculo del potencial y la valoración de la susceptibilidad.

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

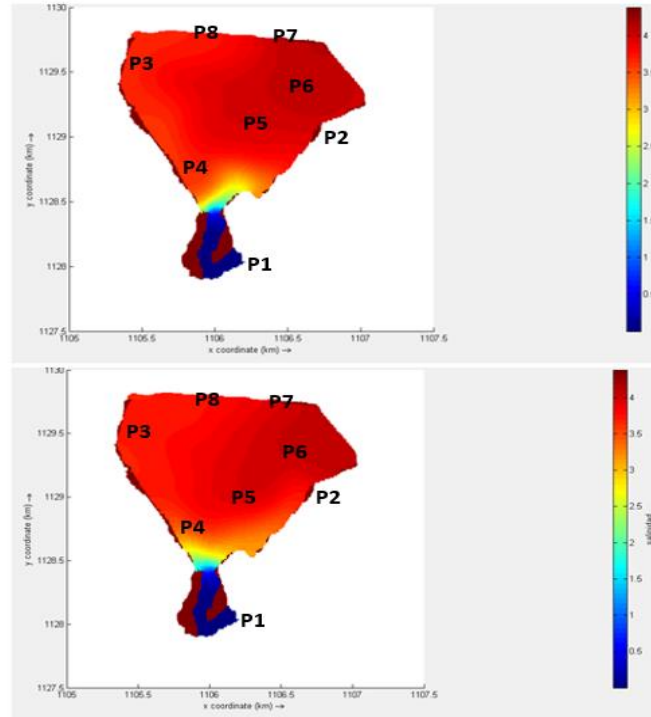


Figura 4.30. Variación de la concentración de trazador 1 de febrero 2017. Elaboración propia.

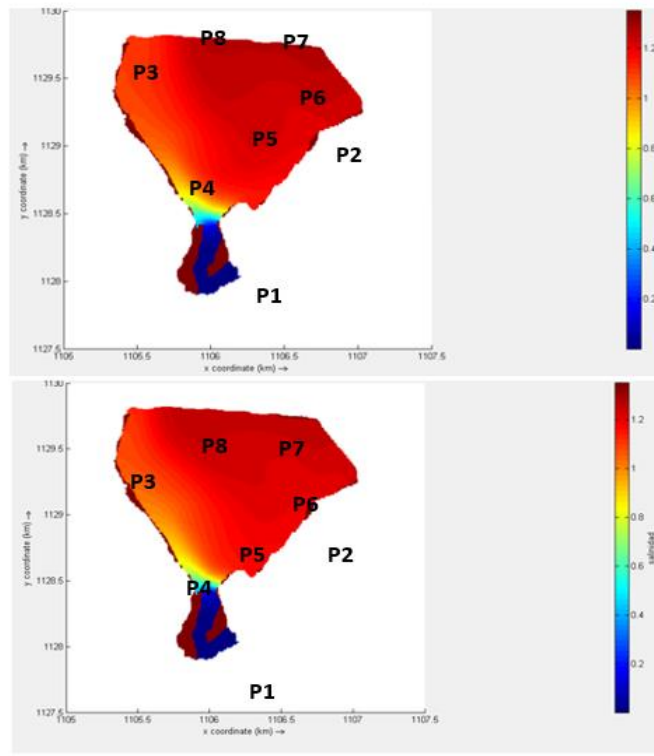


Figura 4.31. Variación de la concentración de trazador 1 de septiembre 2017. Elaboración propia

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

En la siguiente tabla se presentan el cálculo de potencial de renovación y valoración de la susceptibilidad para el 1 de febrero, (día donde se realiza monitoreo de calidad en el Lago).

Tabla 4.10.

Cálculo del potencial de renovación (P_R) para el Lago Sochagota 1 de febrero de 2017.

Punto	Co (ppb)	Ct (ppb)	PR %	Susceptibilidad a la eutrofización
P1	4.380	0.098	97.76	Baja
P2	4.380	4.376	0.10	moderada
P3	4.380	4.375	0.11	moderada
P4	4.380	4.376	0.10	moderada
P5	4.380	4.376	0.10	moderada
P6	4.380	4.375	0.10	moderada
P7	4.380	4.376	0.10	moderada
P8	4.380	4.376	0.09	moderada

Fuente: Autor.

De igual manera, en la tabla 4.20 se presentan el cálculo de potencial de renovación y valoración de la susceptibilidad para el 1 de septiembre, (día donde se realiza monitoreo de calidad en el Lago).

Tabla 4.11.

Cálculo del potencial de renovación (P_R) para el Lago Sochagota 1 de septiembre 2017.

Punto	Co (ppb)	Ct (ppb)	PR %	Susceptibilidad a la eutrofización
P1	1.350	0.082	93.92	Baja
P2	1.350	1.349	0.10	moderada
P3	1.350	1.348	0.11	moderada
P4	1.350	1.349	0.10	moderada
P5	1.350	1.349	0.10	moderada
P6	1.350	1.349	0.11	moderada
P7	1.350	1.349	0.10	moderada
P8	1.350	1.072	20.63	Baja

Fuente: Autor.

Para febrero de 2017 se observa que el rango de susceptibilidad a la eutrofización esta de moderado a muy alto, la categoría de susceptibilidad moderada es la que más está relacionada con

el lago, la concentración del trazador se relaciona con el patrón de la velocidad de la corriente, por otro lado, los días analizados en febrero y septiembre se caracterizaron por tener un balance negativo de precipitación y evaporación, disminuyendo el volumen del sistema. lo que favoreció un aumento de la concentración de trazador en los puntos en este.

Finalmente, el conocimiento de las características y calidad del lago, constituyen un punto de partida para plantear las escalas espacial y temporal del proceso de eutrofización, gran parte del lago se encuentra en la categoría de susceptibilidad moderada, producto de que, en condiciones favorables de temperatura e intensidad lumínica, el aporte de nutrientes (fosforo, nitrógeno, algas, entre otros) puede llegar a producir este fenómeno (citacatanbria), de igual forma, es importante mencionar que la compuerta que regula el flujo hacia el río Chicamocha se encuentra cerrada, sin embargo, la fuga que se detecta en esta estructura, junto con otros flujos de salida, contribuyen con su renovación.

4.2.2. Cálculo y valoración del potencial de salinización.

Para obtener el potencial de salinización se ha calculado la concentración de sales disueltas localmente durante el ciclo de gestión, bajo las siguientes consideraciones (Usaquén-Perilla, 2017).

La salinidad en los aportes de flujo y en el humedal, se calculan a 25°C empleando la adaptación del modelo de la UNESCO (1986), considerando como variables de entrada la conductividad y la temperatura del agua.

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

El potencial de salinización de un dominio se calcula diariamente durante el ciclo de gestión mediante la siguiente expresión:

$$P_s = \frac{S_t - S_0}{S_0} \times 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

P_s : Potencial de salinización diario (%).

S_0 : Salinidad mínima en el ciclo de gestión o geogénica (dS/m o su equivalente).

S_t : Salinidad del dominio en el tiempo t (cada ΔT_c) (dS/m o su equivalente).

4.2.2.1. Umbrales para la valoración de la susceptibilidad a la salinización.

Usaquén(2017) propone que:

Las salinidades de referencia se establecen considerando los principales cultivos que se desarrollan en las inmediaciones del lago y en su área de influencia, que son: pastos, frutales (durazno, ciruela, manzana, pera), cebolla, patata (papa), maíz, arveja, tomate, remolacha, entre otros (Tabla 4.12). Para el Lago Sochagota se consideran los frutales y la cebolla como los cultivos más sensibles. Una vez identificados los cultivos más sensibles, se calcula la salinidad de referencia en el agua de riego que, en este caso, se corresponde con el recurso hídrico almacenado en el Lago Sochagota.(p.245)

Tabla 4.12

Conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo, en cultivos que se desarrollan en proximidades del Lago Sochagota.

Tipo de cultivo	E_c (dS/m)	E_{ce} (dS/m)	Observación
Pastos (MS)	4	3.5	Los cultivos menos tolerantes a la salinidad son los frutales y las hortalizas. La mayoría de cultivos no presenta inconvenientes para una
Frutales (S,MS)	3	1.2	
Cebolla (S)	4	1.0	
Papa (MS)	6	1.5	
Maíz (MS)	6	1.7	
Arveja (S,MS)	4	3.0	
Tomate (MS)	8	1.7 - 2.5	
Remolacha (MT)	16	4.0	

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

Otros: hortalizas (S), lechuga (MS), fríjol (S), repollo (MS)	3-7	1.0 – 1.8	conductividad de 0.75 dS/m.
---	-----	-----------	-----------------------------

Fuente: Bouwer & Idelovitch, 1987; FAO., 1985. (Usaquén-Perilla, 2017).

El cálculo de las salinidades de referencia (SR1, SR2, SR3) se realiza con un valor para la constante de reducción (KR) de 0.83. Para estimar esta constante se ha asumido una eficiencia de riego (Ei) del orden del 80% en el cultivo de mayor extensión, equivalente a una fracción de lixiviación (FL) de 0.2. (p.245)

$$K_R = \frac{5 * F_L}{(1 + F_L)}$$

$$S_{R1} = K_R \times E_c = 0.83E_c = 0.83 \times 3.0 = 2.5 \text{ dS/m}$$

$$S_{R2} = K_R \times E_{ce} = 0.83E_{ce} = 0.83 \times 1.0 = 0.83 \text{ dS/m}$$

$$S_{R3} = 0.75 \text{ dS/m}$$

Con base en la tolerancia a la salinidad se obtienen los potenciales de salinización máximos (Psmax1, Psmax2 y Psmax3) que representan los límites entre las categorías de susceptibilidad: muy alta - alta, alta – moderada y moderada - baja, respectivamente.(p.245)

Los potenciales máximos se calculan tomando como referentes (SR1, SR2, SR3) y la salinidad mínima durante el ciclo de gestión (So: 2.7 dS/m) y se presentan a continuación:

$$P_{smax1} = \frac{(S_{R1} - S_0)}{S_0} \times 100 = \frac{(2.5 - 2.7)}{2.7} \times 100 = -7.4\%$$

$$P_{smax2} = \frac{(S_{R2} - S_0)}{S_0} \times 100 = \frac{(0.83 - 2.7)}{2.7} \times 100 = -69.3\%$$

$$P_{smax3} = \frac{(S_{R3} - S_0)}{S_0} \times 100 = \frac{(0.75 - 2.7)}{2.7} \times 100 = -72.2\%$$

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

Para su cálculo se introduce en el dominio la concentración de iones disueltos (S_o) 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.

Una vez obtenida la evolución temporal del potencial de salinización, se valora la susceptibilidad a la salinización y se clasifica en función de cuatro categorías de susceptibilidad: muy alta, alta, moderada y baja (Tabla 4.13).

Tabla 4.13

Umbrales para la valoración de la susceptibilidad frente a la salinización, a partir de los valores de los descriptores estratégicos.

Susceptibilidad	Umbrales
	P_s
Muy alta	$P_{Si} \geq P_{Smax1}$
Alta	$P_{Smax2} \leq P_{Si} < P_{Smax1}$
Moderada	$P_{Smax3} \leq P_{Si} < P_{Smax2}$
Baja	$P_{Si} < P_{Smax3}$

P_{Si} : Potencial de salinización global diario o potencial de salinización medio durante el ciclo de gestión en una celda.
 P_{Smax1} , P_{Smax2} , P_{Smax3} : Umbrales para la valoración de la susceptibilidad frente a la salinización.

4.2.2.1.1. *Potencial de salinización año 2015*

Para el cálculo del potencial de salinización se ha teniendo en cuenta el aporte de agua subterránea y de quebrada honda, la condición inicial se determinó como el promedio de la calidad medida en el mes de la corrida. El valor de S_o corresponde a la salinidad geogénica y el s_t es la salinidad en el día del muestreo. En la tabla 4.14 y 4.15 se presenta los cálculos del potencial y la evaluación de la susceptibilidad para el mes de abril y agosto de 2015.

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

En la tabla se presentan el cálculo de potencial de salinidad y valoración de la susceptibilidad para el 4 de abril, (día donde se realiza monitoreo de calidad en el Lago).

Tabla 4.14

Cálculo del potencial de Salinización (P_s) para el Lago Sochagota 4 abril 2015.

Punto	So (ppb)	St (ppb)	Ps %	Susceptibilidad a la salinización
P1	2.7	27.0043	900.16	muy alta
P2	2.7	13.1201	385.93	muy alta
P3	2.7	13.1431	386.78	muy alta
P4	2.7	13.0407	382.99	muy alta
P5	2.7	13.1269	386.18	muy alta
P6	2.7	13.1649	387.59	muy alta
P7	2.7	13.1358	386.51	muy alta
P8	2.7	13.1387	386.62	muy alta

Fuente: Autor.

Seguidamente, en la tabla 4.15 se presentan el cálculo de potencial de salinización y valoración de la susceptibilidad para el 1 de agosto, (día donde se realiza monitoreo de calidad en el Lago).

Tabla 4.15

Cálculo del potencial de Salinización (P_s) para el Lago Sochagota 1 agosto 2015.

Punto	So (ppb)	St (ppb)	Ps %	Susceptibilidad a la salinización
P1	2.7	25.1108	830.03	muy alta
P2	2.7	14.6008	440.77	muy alta
P3	2.7	14.6148	441.29	muy alta
P4	2.7	14.5994	440.72	muy alta
P5	2.7	14.6192	441.45	muy alta
P6	2.7	14.6040	440.89	muy alta
P7	2.7	14.6259	441.70	muy alta
P8	2.7	14.6267	441.73	muy alta

Fuente: Autor.

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

Puede observarse que la salinidad a la entrada del lago (P1) es más alta que en los otros puntos esto, puede deberse a la acumulación de sales en esta zona, debido a la disminución en la velocidad que se da en el punto de transición entre la quebrada y el lago. El Lago Sochagota presenta una muy alta susceptibilidad a presentar problemas de salinización, debido al efecto sinérgico de las tensiones naturales y antropogénicas que ocurren en el sistema, la salinidad del agua está íntimamente relacionada con la salinidad de los suelos que tienen los cultivos que se desarrollan en sus inmediaciones, por tal motivo, el drenaje directo al lago producto de estas actividades generan el aumento de este parámetro. (Torres & Acevedo, 2008)

4.2.2.1.2. *Potencial de salinización año 2016*

Para el cálculo del potencial de salinización para el año 2016 se tomaron en cuenta las mismas variables de entrada que para el 2015. El valor de S_o corresponde a la salinidad geogénica y el s_t es la salinidad en el día del muestreo. En la tabla 4.16 se presenta los cálculos del potencial y la evaluación de la susceptibilidad para el mes de octubre de 2016.

Tabla 4.16

Calculo del potencial de Salinización (P_s) para el Lago Sochagota octubre 24 2016.

Punto	S_o (ppb)	S_t (ppb)	P_s %	Susceptibilidad a la salinización
P1	2.7	3.1023	14.90	muy alta
P2	2.7	7.0487	161.06	muy alta
P3	2.7	7.3785	173.28	muy alta
P4	2.7	7.2839	169.77	muy alta
P5	2.7	6.8517	153.76	muy alta
P6	2.7	6.8031	151.97	muy alta
P7	2.7	6.5215	141.54	muy alta
P8	2.7	6.5131	141.22	muy alta

Fuente: Autor.

Puede observarse que la salinidad a la entrada del lago (P1) es más baja que en los otros puntos esto puede deberse a que este mes en este año presenta un alto régimen de lluvia y con

presencia de vegetación macrofita, generan un efecto de dilución en la entrada del lago en quebrada Honda.

4.2.2.1.3. *Potencial de salinización año 2017*

Para el cálculo del potencial de salinización se ha teniendo en cuenta el aporte de agua subterránea y de quebrada Honda, la condición inicial se determinó como el promedio de la calidad medida en el mes de la corrida. El valor de S_o corresponde a la salinidad geogénica y el s_t es la salinidad en el día del muestreo. En la tabla 4.17 y 4.18 se presenta los cálculos del potencial y la evaluación de la susceptibilidad para el mes de febrero y septiembre de 2017.

Tabla 4.17.

Cálculo del potencial de Salinización (P_s) para el Lago Sochagota 1 febrero 2017.

Punto	S_o (ppb)	S_t (ppb)	P_s %	Susceptibilidad a la salinización
P1	2.7	12.8441	375.71	muy alta
P2	2.7	4.3780	1.35	muy alta
P3	2.7	4.3778	62.14	muy alta
P4	2.7	4.3779	62.15	muy alta
P5	2.7	4.3779	62.15	muy alta
P6	2.7	4.3780	62.15	muy alta
P7	2.7	4.3780	62.15	muy alta
P8	2.7	4.3780	62.15	muy alta

Fuente: Autor.

Tabla 4.18.

Cálculo del potencial de Salinización (P_s) para el Lago Sochagota 1 septiembre 2017.

Punto	S_o (ppb)	S_t (ppb)	P_s %	Susceptibilidad a la salinización
P1	2.7	2.7398	1.47	muy alta
P2	2.7	1.3494	-50.02	Alta
P3	2.7	1.3493	-50.03	Alta
P4	2.7	1.3493	-50.02	Alta
P5	2.7	1.3493	-50.03	Alta
P6	2.7	1.3494	-50.02	Alta
P7	2.7	1.3493	-50.03	Alta

P8	2.7	1.3493	-50.03	Alta
----	-----	--------	--------	------

Fuente: Autor.

Puede observarse que la salinidad a la entrada del lago (P1) es más alta que en los otros puntos esto, puede deberse al aporte de caudal en la entra del lago. Para el mes de septiembre la susceptibilidad obtenida es alta.

4.2.3. Cálculo y valoración del potencial de déficit hídrico.

El potencial de déficit hídrico diario (PWd) es el indicador que evalúa la susceptibilidad de un dominio frente a la disponibilidad del recurso para los subsistemas natural y humano. Este indicador se define como el porcentaje en el cual varía el nivel del agua en el dominio con respecto a un nivel de referencia crítico (η_c) en un periodo de 24 horas (ΔT_c).

$$P_{Wd} = \frac{L_t - \eta_c}{\eta_c} \times 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

P_{Wd} : Potencial de déficit hídrico diario (%)

L_t : nivel o profundidad de la columna de agua (diario) en el dominio (m).

η_c : nivel o profundidad crítica en el dominio (m).

4.2.3.1. Umbrales para la valoración de la susceptibilidad al déficit hídrico.

Usaqué (2017) en su trabajo doctoral define:

El nivel de referencia a partir del cual se calcula el potencial de déficit hídrico y los límites para las categorías de susceptibilidad se corresponde con el nivel crítico (η_c). Este valor se ha calculado como el promedio del nivel medido en el lago, cuando el balance de precipitación y evaporación tiende a cero ($P-E \cong 0$) y en periodos en los que la actividad crítica (agrícola) demanda agua en las diferentes etapas del cultivo, también para definir el

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

nivel crítico se tuvo en cuenta la altura de navegabilidad en el lago y una lámina de agua de 0.3 m para las plantas del humedal que rodea al lago, obteniendo un nivel crítico de 2.46m (cota: 2491.74 m.s.n.m) ver figura 4.36. El nivel del lago influye en otras actividades antrópicas desarrolladas en el mismo. Así, dicho nivel no debe superar la cota (2491.56 m.s.n.m) para garantizar un borde libre de 0.50 m. Este valor fue definido históricamente con el fin de garantizar la operación de los muelles y zonas de embarque (p. ej. uso recreativo de contacto secundario). En cuanto a la navegabilidad dentro del lago (barco, lancha), el descenso en la lámina de agua condiciona alcanzar una lámina mínima de operación. En este sentido, la columna de agua presenta registros que oscilan entre 1.3 y 2.2 m en el ciclo de gestión, por lo tanto, se considera como valor mínimo la cota 2491.81 m.s.n.m. que corresponde a una lámina de 1.5 m en la zona cercana a la compuerta. Por lo anterior, los límites calculados permiten identificar periodos críticos para la actividad agrícola de uso indirecto, y para la actividad turística que se beneficia directamente de los servicios culturales que ofrece el humedal. (p.252).

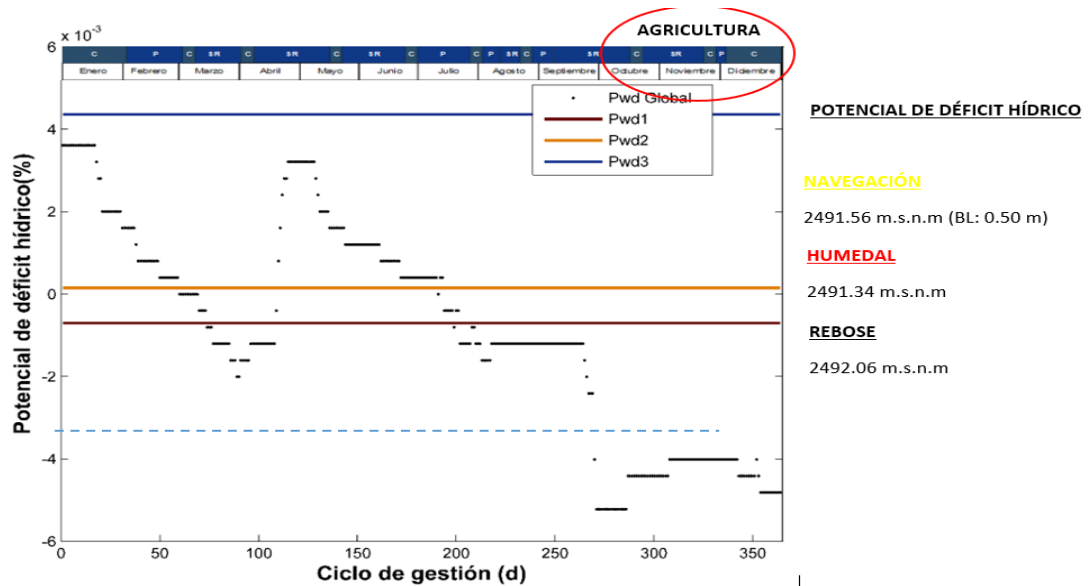


Figura 4.32 . Análisis del nivel crítico en el Lago Sochagota. Adaptado de (Usaquén-Perilla, 2017).

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

Por otra parte, el cálculo de los límites de cada categoría de susceptibilidad ha contemplado la definición del caudal máximo (tabla 4.19), es decir, la condición en la que el caudal de salida a través de la compuerta constituye un factor limitante para la calidad del sistema conexo (río Chicamocha). En este caso el caudal máximo se vincula con la condición operativa de la estructura de regulación (compuerta), pero también con los umbrales del potencial de salinización calculados para el río Chicamocha en función de su salinidad de referencia (conductividad mínima).

Los niveles de referencia (L_{R1} , L_{R2} , L_{R3}) se obtienen mediante la simulación de los casos hipotéticos descritos en la tabla 4.19, empleando el modelo de cajas (MSL-S) para un periodo de 24 horas de operación. (p.252).

Tabla 4.19.

Límites de referencia del potencial de déficit hídrico (P_{Wd}) para el lago Sochagota.

Escenario	Qr	Qe	η_b	η_o	P	E	Límite
E1	0.009	0.0320	2.46	0.44	0	18.1	L R1: 2.443
E2	0.064	0.0465	2.46	0.73	0	0	L R2: 2.464
E3	0.519	0.3936	2.46	1.44	77	0.1	L R3: 2.569

Nota: Qr: aportes de caudal al humedal (m^3/s); Qe: caudal de salida del humedal o grado de apertura de compuertas (a:1.12 m); $Q_{em\acute{a}x}$: caudal máximo de salida del humedal equivalente al 100% de apertura de la compuerta; η_b : superficie libre o nivel en el interior del humedal (m) con respecto a la zona más profunda; η_o : superficie libre o nivel en el exterior del humedal (m) en el río Chicamocha; P: precipitación (mm); E: evaporación (mm); L_{Ri} : límite del potencial de déficit hídrico (i) en cada categoría (%).(Usaquén-Perilla, 2017).

Los niveles de referencia permiten obtener los umbrales de las categorías de susceptibilidad, empleando las siguientes expresiones:

$$P_{Wd1} = \frac{L_{R1} - \eta_c}{\eta_c} \times 100 = \frac{2.443 - 2.46}{2.46} \times 100 = -\mathbf{0.69105}$$

$$P_{Wd2} = \frac{L_{R2} - \eta_c}{\eta_c} \times 100 = \frac{2.464 - 2.46}{2.46} \times 100 = \mathbf{0.16260}$$

$$P_{Wd3} = \frac{L_{R3} - \eta_c}{\eta_c} \times 100 = \frac{2.569 - 2.46}{2.46} \times 100 = \mathbf{4.43089}$$

Haciendo uso de la tabla 4.20, se obtiene la categoría de susceptibilidad. El potencial de déficit hídrico responde a la dinámica de flujos desde la quebrada Honda, la precipitación, la evaporación y los afloramientos subterráneos y superficiales, entre otras posibles detracciones asociadas con las necesidades básicas de agua en los cultivos del área cercana al lago y de la vegetación emergente en el mismo. a continuación, se presenta la evaluación de las fechas de interés en el Lago.

Tabla 4.20

Umbrales para la valoración de la susceptibilidad frente al déficit hídrico, a partir de los valores de los descriptores estratégicos.

Susceptibilidad	Umbrales
	P_{wd}
Muy alta	$P_{Wdi} \leq P_{Wd1}$
Alta	$P_{Wd1} < P_{Wdi} \leq P_{Wd2}$
Moderada	$P_{Wd2} < P_{Wdi} \leq P_{Wd3}$
Baja	$P_{Wdi} > P_{Wd3}$

P_{Wdi} : Potencial de déficit hídrico global diario o potencial de déficit hídrico medio durante el ciclo de gestión en una celda.
 P_{wd1} , P_{wd2} , P_{wd3} : Umbrales para la valoración de la susceptibilidad frente al déficit hídrico.

4.2.3.1.1. *Potencial de déficit hídrico año 2015*

A continuación, haciendo uso de los datos de partida antes descritos en el capítulo 4.1.4, se calcula el potencial de déficit hídrico para cada celda (escala local) con apoyo en el modelo Delft3D calibrado y validado. El valor de n_c corresponde a la profundidad de cada punto con un nivel de lámina de agua de 2491.74 m.s.n.m el valor L_t corresponde a la lámina de agua en los

puntos evaluado el día del muestreo. En la tabla 4.21 y 4.22 se presenta los cálculos del potencial y la evaluación de la susceptibilidad para el mes de abril y agosto de 2015.

Tabla 4.21

Cálculo del potencial de déficit hídrico (Pw) para el Lago Sochagota 4 de abril 2015.

Punto	nc (ppb)	lt (ppb)	Pw %	Susceptibilidad al déficit hídrico
P1	1.13	1.10	-2.65	muy alta
P2	1.60	1.57	-1.88	muy alta
P3	1.54	1.51	-1.95	muy alta
P4	2.03	2.00	-1.47	muy alta
P5	2.04	2.01	-1.47	muy alta
P6	1.49	1.46	-2.01	muy alta
P7	1.31	1.28	-2.29	muy alta
P8	0.90	0.87	-3.34	muy alta

Fuente: Autor.

En la tabla 4.22 se presentan el cálculo de potencial de déficit hídrico y valoración de la susceptibilidad para el 4 de abril, (día donde se realiza monitoreo de calidad en el Lago).

Tabla 4.22

Cálculo del potencial de déficit hídrico (Pw) para el Lago Sochagota 1 de agosto 2015.

Punto	nc (ppb)	lt (ppb)	Pw %	Susceptibilidad al déficit hídrico
P1	1.13	1.10	-2.65	muy alta
P2	1.60	1.57	-1.88	muy alta
P3	1.54	1.51	-1.95	muy alta
P4	2.03	2.00	-1.47	muy alta
P5	2.04	2.01	-1.47	muy alta
P6	1.49	1.46	-2.01	muy alta
P7	1.31	1.28	-2.29	muy alta
P8	0.90	0.87	-3.34	muy alta

Fuente: Autor.

Puede observarse que el lago presenta condiciones de susceptibilidad muy alta a déficit hídrico, en el que se suma la evaporación, la demanda de agua para satisfacer las necesidades

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

básicas de los cultivos. Cabe mencionar que el año 2015 presentó una condición climática de sequía extrema conocida como el fenómeno de niño, donde la temperatura del aire en el periodo de 2014 - 2015 presentó anomalías negativas (más frío que lo normal) al sur del continente sudamericano y positivas (más cálido que lo normal) en el norte y noreste, destacando a Ecuador y Colombia que presentaron anomalías de hasta $+4^{\circ}\text{C}$. Adicionalmente, desde mayo de 2015 hasta julio de 2016 aproximadamente, se produjo déficit de precipitaciones en la región de El Caribe, Centroamérica, gran parte de Venezuela, Colombia y Brasil. (Martínez et al., 2017)

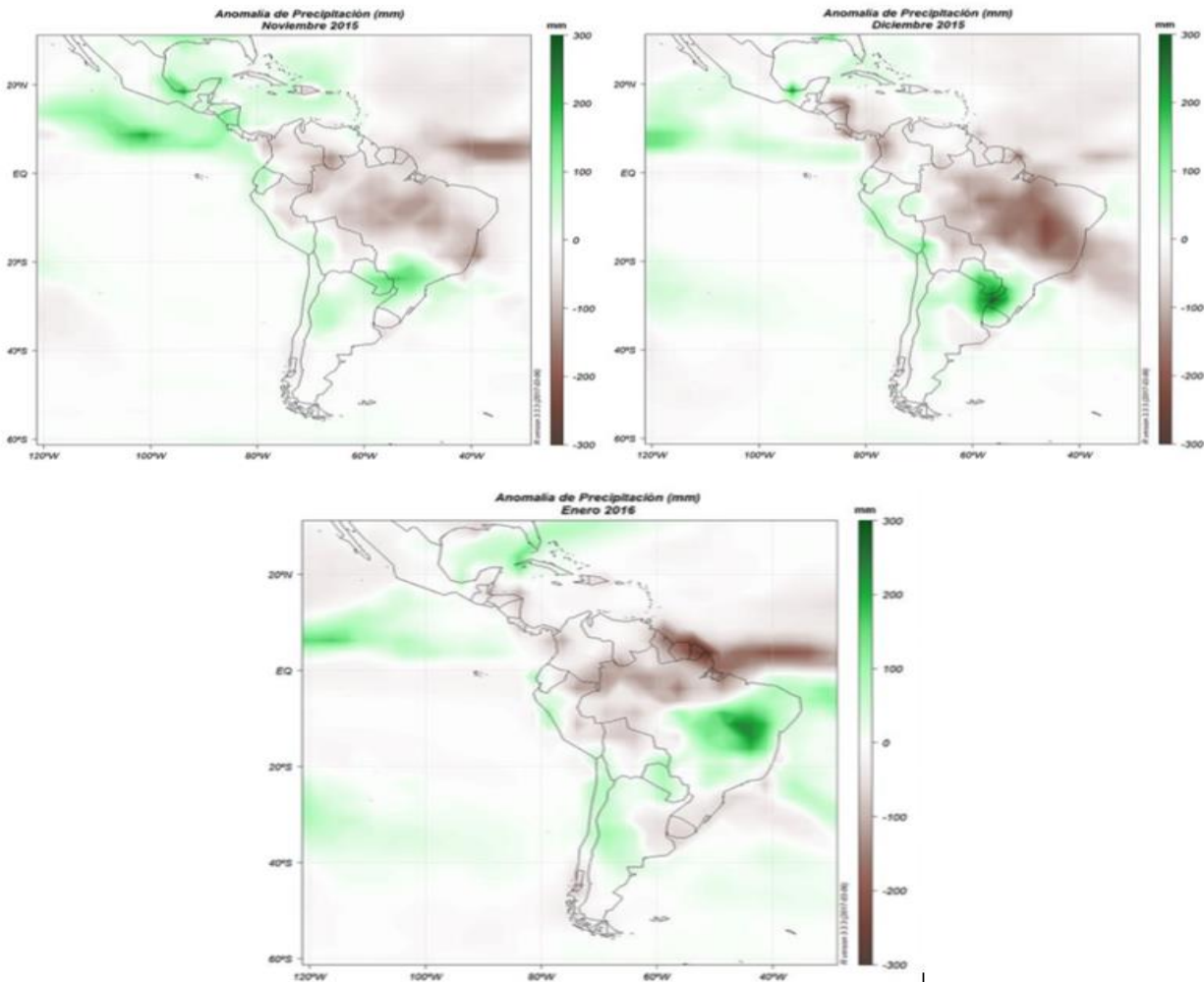


Figura 4.33 . Anomalía de precipitación (mm) para noviembre y diciembre de 2015 y enero de 2016. (Martínez et al., 2017)

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

4.2.3.1.2. Potencial de déficit hídrico año 2016.

Para este año se tienen en cuenta los mismos valores de nc y Lt del año 2015. En la tabla 4.23 se presentan los cálculos del potencial y la evaluación de la susceptibilidad para el mes de octubre de 2016.

Tabla 4.23

Cálculo del potencial de déficit hídrico (Pw) para el Lago Sochagota 24 de octubre 2016.

Punto	nc (ppb)	lt (ppb)	Pw %	Susceptibilidad al déficit hídrico
P1	1.12	1.20	7.12	Baja
P2	1.59	1.67	5.02	Baja
P3	1.54	1.62	5.20	Baja
P4	2.03	2.11	3.94	moderado
P5	2.04	2.12	3.93	moderado
P6	1.49	1.57	5.37	Baja
P7	1.31	1.39	6.11	Baja
P8	0.90	0.98	8.94	Baja

Fuente: Autor.

Para este año se presenta un déficit bajo para la gran mayoría del lago, en los puntos P4 y P5 son zonas cercanas al centro del lago, ocasionando que, las láminas en estos puntos estén influenciadas por la velocidad y dirección del viento, lo que condiciona la altura.

4.2.3.1.3. Potencial de déficit hídrico año 2017.

En la tabla 4.24 y 4.25 se presenta los cálculos del potencial y la evaluación de la susceptibilidad para el mes de febrero y de septiembre de 2017, los valores de nc y Lt son similares al año 2016.

Tabla 4.24

Cálculo del potencial de déficit hídrico (Pw) para el Lago Sochagota 1 de febrero 2017.

Punto	nc (ppb)	lt (ppb)	Pw %	Susceptibilidad al déficit hídrico
P1	1.13	1.21	7.12	Baja
P2	1.59	1.67	5.04	Baja
P3	1.54	1.62	5.20	Baja
P4	2.03	2.11	3.94	moderado
P5	2.04	2.12	3.93	moderado
P6	1.49	1.57	5.37	Baja
P7	1.31	1.39	6.11	Baja
P8	0.90	0.98	8.94	Baja

Fuente: Autor.

Tabla 4.25

Cálculo del potencial de déficit hídrico (Pw) para el Lago Sochagota 1 de septiembre 2017.

Punto	nc (ppb)	lt (ppb)	Pw %	Susceptibilidad al déficit hídrico
P1	1.13	1.30	15.04	Baja
P2	1.59	1.76	10.69	Baja
P3	1.54	1.71	11.08	Baja
P4	2.03	2.20	8.37	Baja
P5	2.04	2.21	8.37	Baja
P6	1.49	1.66	11.44	Baja
P7	1.31	1.48	13.02	Baja
P8	0.90	1.07	19.05	Baja

Fuente: Autor.

Para este año se presenta un déficit bajo para la gran mayoría del lago, en los puntos P4 y P5 son zonas cercanas al centro del lago estas para el mes de febrero presentan una susceptibilidad moderada, relacionado por la velocidad y dirección del viento.

Finalmente, una vez calculados los descriptores estratégicos (potencial de renovación, potencial de salinización y potencial de déficit hídrico) para los años 2015,2016 y 2017, se procede a integrar estos resultados a través del índice de susceptibilidad conjunta OSI por sus siglas en

inglés (Overall Susceptibility Index). Con base en los resultados de OSI, se evalúa la gestión ambiental en el periodo o ciclo de gestión.

4.3. Evaluación de la gestión ambiental

Para la aplicación del índice OSI, la categoría con mayor número de registros constituye el punto de partida para establecer la clasificación. Con base en los resultados, en la tabla 4.26 se presenta la clasificación y evaluación del índice OSI para las fechas evaluadas.

Tabla 4.26

Evaluación del índice OSI para el Lago Sochagota en el periodo 2015 – 2017.

Fecha	Eutrofización				Salinización				Déficit hídrico				Índice (OSI)
	B	M	A	MA	B	M	A	MA	B	M	A	MA	
4/04/2015													Alta
1/08/2015													Alta
24/10/2016													Moderada
1/09/2017													Moderada
19/12/2017													Moderada

Fuente: Autor.

La evaluación de los descriptores y su integración mediante el índice OSI permiten valorar y categorizar la gestión del lago, la cual no es sostenible para el humedal para el año 2015. Las estrategias de gestión deben priorizar el manejo de la naturaleza salina del recurso hídrico empleado para uso agrícola de forma directa e indirecta, la búsqueda de fuentes alternativas para satisfacer las necesidades hídricas asociadas a los cultivos menos tolerantes a la salinidad. Por ello, es necesario abordar regionalmente la gestión del sistema, buscando optimizar los flujos de entrada y salida al lago, con estrategias que incluyan la gestión desde la cuenca y el control del flujo de salida, hasta alcanzar límites de tolerancia apropiados para disminuir la susceptibilidad del sistema socio- ecológico en su conjunto.

Para el 2016 y 2017 el OSI permite determinar que la gestión del lago tiende a la sostenibilidad, las estrategias de gestión deben priorizar el manejo de la naturaleza salina del recurso hídrico empleado para uso agrícola de forma directa e indirecta, la búsqueda de fuentes alternativas para satisfacer las necesidades hídricas asociadas a los cultivos menos tolerantes a la salinidad. Por ello, es necesario abordar regionalmente la gestión del sistema, buscando optimizar los flujos de entrada y salida al lago, con estrategias que incluyan la gestión desde la cuenca y el control del flujo de salida, hasta alcanzar límites de tolerancia apropiados para disminuir la susceptibilidad del sistema socio- ecológico en su conjunto. de tal forma que la susceptibilidad de todos los descriptores no se aleje de la condición de susceptibilidad moderada o baja.

4.4. Correlación de los parámetros de calidad con los indicadores de base Hidrodinámica.

Una vez aplicados los indicadores de base hidrodinámica, los resultados y la calidad medida en el lago se someterán a pruebas estadísticas (capítulo 3.5), definiendo el tipo de normalidad y así tener un criterio más claro para definir el método de correlación, para identificar cuáles son los parámetros que se ven más fuertemente vinculados a los resultados de los indicadores de base hidrodinámica (Potencial de renovación, salinización y déficit hídrico).

4.4.1. Pruebas de normalidad.

Por parámetro y por indicador hay 8 puntos con resultados, se tienen 5 muestreos diferentes (abril de 2015, agosto de 2015, octubre de 2016, febrero de 2017 y septiembre de 2017). Para un aproximado de 40 datos por parámetro y por indicador. Por tal motivo se usa la prueba de Shapiro-Wilk, para contrastar la normalidad de los datos.

Para el cálculo se usó el software SPSS, que permitió determinar si los datos presentan una distribución normal, en la tabla 4.27 se puede observar los resultados de la prueba.

Tabla 4.27

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para los parámetros de Calidad e indicadores de base hidrodinámica (años 2015,2016,2017).

Parámetros normales ^{a,b}		pH	T. Amb	T.Ag	Conduct	ODc	Potencial RX	Sechhi D.	Turb	Alc. T	DT	CL	SO ₄
N		54	54	54	54	54	22	48	46	46	40	48	48
Parámetros normales ^{a,b}	Media	8.9865	18.6611	19.6185	9457.40	6.1800	-130.2773	0.2051	51.8685	452.45	128.25	825.54	3069.94
	Desv. Desviación	0.65002	3.80146	2.14547	4345.58	1.89558	40.39299	0.09317	144.23	167.77	34.495	653.13	1356.97
Máximas diferencias extremas	Absoluta	0.373	0.098	0.126	0.245	0.130	0.432	0.111	0.417	0.155	0.198	0.196	0.289
	Positivo	0.215	0.069	0.112	0.245	0.130	0.432	0.111	0.417	0.155	0.125	0.187	0.240
	Negativo	-0.373	-0.098	-0.126	-0.214	-0.070	-0.336	-0.081	-0.405	-0.129	-0.198	-0.196	-0.289
Estadístico de prueba		0.373	0.098	0.126	0.245	0.130	0.432	0.111	0.417	0.155	0.198	0.196	0.289
Sig. asin. (bilateral) ^c		0.000	.200	0.032	0.000	0.023	0.000	0.184	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000
Sig.		0.000	0.222	0.032	0.000	0.021	0.000	0.137	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000
Sig. Monte Carlo (bilateral) ^d	Interval o de	0.000	0.212	0.027	0.000	0.018	0.000	0.128	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000
	confianz a al 99% superior	0.000	0.233	0.036	0.000	0.025	0.000	0.145	0.000	0.008	0.001	0.000	0.000
Parámetros normales ^{a,b}		NO ₃	NO ₂	NH ₃	Ntotal	PT	Color R.	SST	ST	SDT	DBO ₅	DQO	Fe
N		48	48	48	40	54	32	52	52	28	40	40	54
Parámetros normales ^{a,b}	Media	1.9786	0.8021	1.2915	285.5750	0.2270	35.6719	716.0640	8597.9423	47816.92	107.30	190.12	7.3020
	Desv. Desviación	2.42582	1.80498	1.22189	662.05844	0.42159	12.16248	4410.31	5745.5332	127795.9	174.16	259.82	44.3741
Máximas diferencias extremas	Absoluta	0.327	0.498	0.428	0.465	0.335	0.268	0.500	0.296	0.494	0.364	0.371	0.472
	Positivo	0.327	0.498	0.428	0.465	0.335	0.268	0.500	0.296	0.494	0.364	0.371	0.472
	Negativo	-0.219	-0.328	-0.239	-0.335	-0.295	-0.186	-0.436	-0.190	-0.361	-0.278	-0.256	-0.435
Estadístico de prueba		0.327	0.498	0.428	0.465	0.335	0.268	0.500	0.296	0.494	0.364	0.371	0.472
Sig. asin. (bilateral) ^c		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sig.		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sig. Monte Carlo (bilateral) ^d	Interval o de	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	confianz a al 99% superior	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Parámetros normales ^{a,b}		Na	Ca	Mg	K	Coli. Tot	Coli. Fec	Chlo a	PRc	PSc	PWdc		

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

N		54	30	30	38	54	54	53	54	54	54
Parámetros normales ^{a,b}	Media	2281.51	56.47	13.451	395.001	2756080.18	351.653	109.08	9.03	304.20	2.0548
	Desv. Desviación	1493.393	46.93	4.804	622.463	15230552.70	507.158	69.869	24.352	244.15	5.68
Máximas diferencias extremas	Absoluta	0.130	0.353	0.155	0.406	0.477	0.298	0.146	0.464	0.226	0.325
	Positivo	0.130	0.353	0.155	0.406	0.477	0.298	0.122	0.464	0.213	0.325
	Negativo	-0.092	-0.225	-0.144	-0.291	-0.428	-0.244	-0.146	-0.349	-0.226	-0.171
Estadístico de prueba		0.130	0.353	0.155	0.406	0.477	0.298	0.146	0.464	0.226	0.325
Sig. asin. (bilateral) ^c		0.024	0.000	0.065	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000
Sig.		0.022	0.000	0.063	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000
Sig. Monte Carlo (bilateral) ^d	Intervalo de confianza a al 99%	Límite inferior Límite superior	0.018	0.000	0.057	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000
			0.026	0.000	0.069	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000

a. La distribución de prueba es normal.

b. Se calcula a partir de datos.

c. Corrección de significación de Lilliefors.

d. El método de Lilliefors basado en las muestras 10000 Monte Carlo con la semilla de inicio 2000000.

e. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

Nota: En la tabla se presenta el análisis de normalidad, donde se define que el parámetro sigue una distribución normal si el valor de significancia bilateral ($p > 0.05$). Autor basado en SPSS.

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

En la tabla 4.27 se observa que solo tres parámetros siguen una distribución normal ($p > 0.05$), que corresponden a temperatura, profundidad de disco secchi y magnesio. Por tal motivo para determinar la correlación y los parámetros que más vinculados están con los indicadores de base hidrodinámica, se usa el coeficiente de correlación de Spearman, el cual permite obtener un coeficiente de asociación ente variables que no se comportan siguiendo una distribución normal. Se calcula con base en una serie de rangos asignados. los valores van de - 1 a 1, siendo 0 el valor que indica no correlación, y los signos indican correlación directa e inversa.

4.4.2. Análisis de correlación de Spearman.

Para la evaluación de la correlación de los parámetros se usa el coeficiente de correlación de Spearman, para la evaluación se tienen los siguientes rangos: 0.00-.19 “muy debil”, 0.20-.39 “debil”, 0.40-0.59 “moderado”, de 0.60-0.79 “Fuerte” y de 0.80-1.0 “muy fuerte.” En la tabla 4.28 se presenta los resultados de la prueba.

Tabla 4.28

Prueba de correlación de Spearman para los parámetros de calidad e indicadores de base hidrodinámica (años 2015,2016,2017).

Parámetros			pH	T. Amb	T.Ag	Conduct	ODc	Potencial RX	Sechhi D.	Turb	Alc. T	DT	CL
Rho de Spearman	PRc	Coeficiente de correlación	-0.162	,646**	,539**	-,355**	,306*	0.422	-0.057	,344*	-0.065	-,564**	-,620**
		Sig. (bilateral)	0.243	0.000	0.000	0.008	0.025	0.050	0.703	0.019	0.670	0.000	0.000
		N	54	54	54	54	54	22	48	46	46	40	48
	PSc	Coeficiente de correlación	-0.254	-,421**	-0.125	,629**	-,580**	,534*	-,414**	0.042	0.059	,672**	,793**
		Sig. (bilateral)	0.063	0.002	0.370	0.000	0.000	0.011	0.003	0.779	0.697	0.000	0.000
		N	54	54	54	54	54	22	48	46	46	40	48
	PWdc	Coeficiente de correlación	,347*	,383**	0.041	-,439**	,467**	-0.232	,612**	-0.052	0.162	-,426**	-,668**
		Sig. (bilateral)	0.010	0.004	0.771	0.001	0.000	0.300	0.000	0.733	0.283	0.006	0.000
		N	54	54	54	54	54	22	48	46	46	40	48
Parámetros			NO ₃	NO ₂	NH ₃	Ntotal	PT	SO ₄	SST	ST	SDT	DBO ₅	DQO
Rho de Spearman	PRc	Coeficiente de correlación	0.171	0.186	-0.022	,363*	0.139	-0.244	,496**	0.259	,392*	-0.140	-0.153
		Sig. (bilateral)	0.245	0.205	0.883	0.022	0.318	0.094	0.000	0.064	0.039	0.390	0.347
		N	48	48	48	40	54	48	52	52	28	40	40
	PSc	Coeficiente de correlación	-,638**	0.141	0.167	-,685**	0.019	-,465**	-,357**	-0.135	-0.117	0.225	0.204
		Sig. (bilateral)	0.000	0.338	0.257	0.000	0.889	0.001	0.009	0.339	0.554	0.162	0.206
		N	48	48	48	40	54	48	52	52	28	40	40
	PWdc	Coeficiente de correlación	,685**	-0.060	-0.154	,688**	-0.070	-,291*	0.222	,294*	0.183	0.086	0.070
		Sig. (bilateral)	0.000	0.686	0.296	0.000	0.617	0.045	0.113	0.035	0.350	0.599	0.669
		N	48	48	48	40	54	48	52	52	28	40	40
Parámetros			Na	Ca	Mg	K	Coli. Tot	Coli. Fec	Chlo a	Fe			
Rho de Spearman	PRc	Coeficiente de correlación	-0.240	-0.104	-0.224	-0.250	,361**	-0.181	-0.046	0.074			
		Sig. (bilateral)	0.080	0.585	0.234	0.130	0.007	0.189	0.745	0.593			

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

	N	54	30	30	38	54	54	53	54
PSc	Coefficiente de correlación	,363**	,453*	0.300	,869**	-,582**	0.149	-0.035	0.242
	Sig. (bilateral)	0.007	0.012	0.107	0.000	0.000	0.283	0.806	0.078
	N	54	30	30	38	54	54	53	54
PWdc	Coefficiente de correlación	-,286*	-,438*	-0.239	-,791**	,460**	-0.119	-0.139	-0.126
	Sig. (bilateral)	0.036	0.015	0.203	0.000	0.000	0.393	0.321	0.363
	N	54	30	30	38	54	54	53	54

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Nota: En la tabla se presenta el análisis de correlación, donde se tendrá en cuenta aquellos parámetros que tengan una correlación significativa de 0.01 y 0.05.

Autor basado en SPSS.

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

En la tabla anterior, se puede observar que el único parámetro con una correlación muy fuerte es el potasio con un Rho de Spearman de 0.869, con el indicador de salinidad. Adicionalmente, se presentan los resultados (tabla 4.29) para los parámetros de correlación dependiendo de su clasificación (muy fuerte, moderado y débil).

Tabla 4.29

Análisis de correlación entre indicadores de base hidrodinámica y calidad del agua.

Parámetros con correlación fuerte	
Potencial de renovación	Rho de Spearman
Temperatura ambiente	0.646
Cloruros	-0.62
Potencial de salinización	
Conductividad	0.629
Dureza total	0.672
Cloruros	0.739
Nitratos	-6.38
Nitrógeno Total	-0.685
Potencial de déficit hídrico	
Profundidad de disco secchi	0.612
Cloruros	-0.668
Nitratos	0.685
Nitrogeno Total	0.688
Potasio	-0.791
Parámetros con correlación moderada	
Potencial de renovación	Rho de Spearman
Temperatura del agua	0.539
Dureza total	-0.564
Solidos suspendidos totales	0.496
Potencial de salinización	

Capítulo 4 – Evaluación de la calidad

Temperatura ambiente	-0.421
Profundidad de secchi	-0.414
Calcio	0.453
Oxígeno disuelto	-0.580
Potencial Redox	0.534
Coliformes totales	-0.582
Sulfatos	0.465

Potencial de déficit hídrico

Conductividad	-0.439
Oxígeno disuelto	0.467
Dureza total	-0.426
Calcio	-0.438
Coliformes totales	0.460

Parámetros con correlación débil

Potencial de renovación

	Rho de Spearman
Conductividad	-0.355
Oxígeno disuelto	0.306
Turbiedad	0.344
Nitrógeno total	0.363
Sólidos disueltos totales	0.392
Coliformes totales	0.361

Potencial de salinización

Disco secchi	-0.357
Sodio	0.363

Potencial de déficit hídrico

pH	0.347
Temperatura ambiente	0.383
Sólidos totales	0.294
Sodio	-0.286
Sulfatos	-0.291

Fuente: Autor.

El signo relaciona el comportamiento de la variable, se puede determinar si existe una variación simultánea entre las variables de calidad y los indicadores. El signo puede representar si, mientras aumenta una variable la otra aumenta (correlación +) o disminuye (correlación -).

4.4.2.1. Potencial de Renovación.

El potencial de renovación describe el tiempo de residencia o la capacidad de renovar el sistema, si el sistema no se renueva es más susceptible a eutrofizarse. la temperatura ambiente va a tener una influencia directa, en la temperatura del agua, este es un factor que aumenta la productividad al aumentar la tasa de reciclado de materia en el sistema (Klapper, 1991). Además, debido al efecto de la temperatura se rigen la producción, utilización y descomposición de la materia (Wetzel, 1981), con base en los resultados se puede presumir que el potencial de renovación al tener una susceptibilidad baja, va tener una incidencia directa en la temperatura. En cuanto a los cloruros la correlación es inversa, este funciona como un trazador en el lago, es decir con un potencial de renovación alto (susceptibilidad a eutrofización baja), se espera encontrar concentraciones bajas de cloruros. Con respecto al oxígeno disuelto la correlación es directa, un potencial de eutrofización bajo (PR alto o muy alto) se espera que corresponda con concentraciones altas de oxígeno disuelto en el lago, debido a que el agua del sistema entra y sale constantemente. En cuanto a la dureza total, a mayores potenciales de renovación se espera encontrar aguas con concentraciones bajas de sales disueltas, entre ellas las asociadas con la dureza y la conductividad, también debido al origen de las aguas (termo minerales), la no renovación del sistema implicará una acumulación de sales en el mismo.

Finalmente, los sólidos suspendidos totales, turbiedad, nitrógeno total, sólidos disueltos totales y coliformes totales van a tener una correlación directa, es decir, con potenciales de renovación alto puede haber una mayor dilución (reducción en la concentración de trazador)

debido a las entradas y salidas de agua en el sistema, pero esto puede generar un aumento en la concentración de estos parámetros en el lago dependiendo de la calidad del agua que ingrese al sistema.

4.4.2.2.Potencial de Salinización.

El potencial de salinización 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. Para este ejemplo de aplicación, se ha asumido la condición hipotética crítica de riego directo (con el agua del lago) en cultivos sensibles a la salinidad, tales como, frutales y hortalizas.

Se puede observar una correlación directa entre el potencial de salinización y los parámetros de potasio, cloruros, conductividad, sulfatos, sodio, calcio, potencial redox y dureza total, debido a que las sales disueltas aportarán directamente a la susceptibilidad por salinización, a mayor susceptibilidad de este indicador se puede decir que se espera encontrar mayor concentración de sales disueltas o mayor cantidad de iones disueltos;(Claudio Gómez, 2018) afirma que estos iones disueltos en el agua pueden provocar un incremento en el valor de la conductividad eléctrica, así como un aumento en la concentración de sólidos disueltos totales, de la dureza y de la alcalinidad total. Estos cuatro parámetros fisicoquímicos están relacionados directamente con la temperatura y el pH del agua.

Con respecto a los resultados, los nitratos, el nitrógeno total, la temperatura ambiente, la profundidad de secchi, el oxígeno disuelto y los coliformes totales, se encontró una correlación negativa; aguas con bajas concentraciones se espera que correspondan con susceptibilidades altas de salinización y viceversa, a susceptibilidad baja de salinización se espera encontrar

concentraciones altas de estos parámetros. Esto puede conectarse con la calidad del agua que ingresa al sistema y con su origen.

4.4.2.3. Potencial de déficit hídrico.

El potencial de déficit hídrico diario (PWd) es el indicador que evalúa la susceptibilidad de un dominio (global/sistema, local/celda) frente a la disponibilidad del recurso para los subsistemas natural y humano.

Para este indicador los parámetros que tienen una correlación directa son disco secchi, nitratos, oxígeno disuelto, nitrógeno total, coliformes totales, temperatura ambiente, pH y sólidos totales, es decir un aumento en el potencial de déficit hídrico, el nivel o mayor cantidad de volumen de agua en el lago se espera corresponda con altos valores en los parámetros mencionados.

Por el contrario, los parámetros que tuvieron una correlación negativa con el indicador son potasio, cloruros, conductividad, dureza total, calcio, sodio y sulfatos, debido a que un potencial de déficit hídrico al responder a un aumento del volumen de agua en el lago, e indica una dilución de sales disminuyendo la concentración de estos parámetros en el sistema

5. Evaluación de diferentes escenarios

Se plantearon tres escenarios de simulación en los cuales se evaluó el estado del sistema sometido a diferentes condiciones de operación, el año analizado corresponde al 2016 debido a que, fue el único año donde el lago presentaba un nivel suficiente para la operación y determinación del escenario más adecuado, el cual, tiene como fin promover un equilibrio en cuanto a la disponibilidad hídrica y la calidad del mismo, teniendo en cuenta, las diferentes actividades tanto agrícolas, turísticas y de preservación que dinamizan el sistema. La tabla 5.1 define las condiciones de operación para cada escenario.

Tabla 5.1

Escenarios de simulación aplicación de la metodología OSSEM

Escenario	Descripción
Escenario Actual (una apertura de las compuertas).	Una apertura de las compuertas en el mes.
Escenario 1 (no se presenta ninguna apertura de la compuerta).	Análisis del lago cuando no existe ninguna descarga
Escenario 2 (dos aperturas de las compuertas).	Dos aperturas de las compuertas al inicio y final del mes.

Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta los parámetros de renovación, salinidad y déficit hídrico, se analizaron los 3 escenarios para cada uno de ellos, donde se realizó el cálculo de los indicadores de susceptibilidad a los resultados del mes de octubre del año 2016, los datos estudiados corresponden a las 8 estaciones propuestas en la figura 3. En Anexo A, se evidencia los resultados y el análisis para el parámetro de renovación en el escenario actual, por ende, los demás parámetros con sus respectivos escenarios efectuaron el mismo procedimiento.

Capítulo 5 – Evaluación de diferentes escenarios

Para realizar una respectiva evaluación basados en los puntos con mayor relevancia, es necesario analizar y verificar si existe o no, una asociación o diferencia estadísticamente significativa entre ellos, por ende, se llevó a cabo la prueba de Cluster, la cual es un método estándar del análisis multivariado que puede reducir una compleja cantidad de información en pequeños grupos o clústers homogéneos, donde los miembros de cada uno de ellos comparten características similares (Heredia et al., 2012).

Con respecto a lo anterior, se presentan las pruebas efectuadas para los parámetros de renovación, salinización y déficit hídrico con cada escenario, donde se evidencia los dendogramas compuestos por grupos para seleccionar los puntos de relevancia, este procedimiento se realizó teniendo en cuenta las concentraciones de los trazadores.

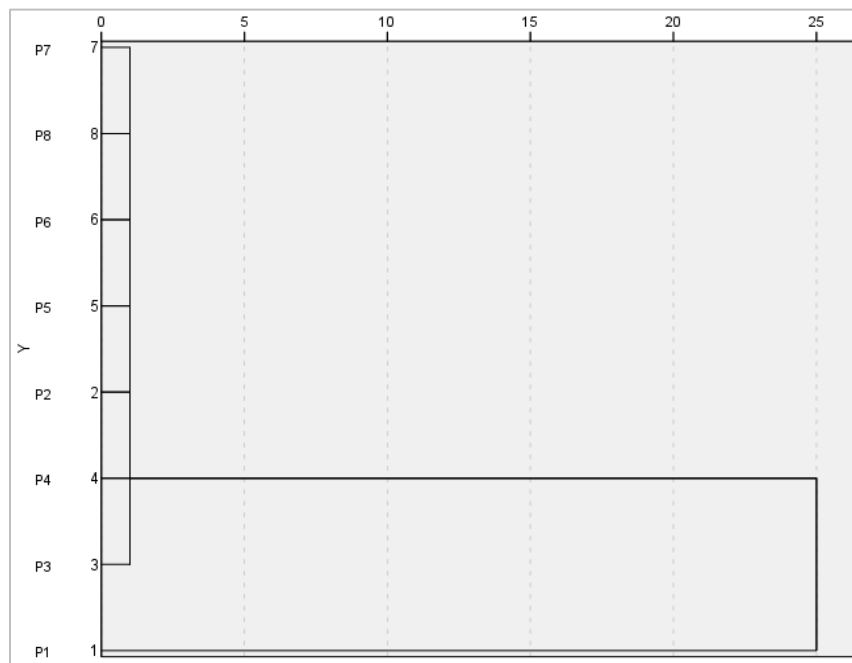


Figura 5.1. Clúster realizado a partir del potencial de renovación en el escenario actual. Autor

Refiriéndonos al potencial de renovación en el escenario actual, los resultados formaron en algunos casos un grupo de asociación al inicio del clúster, por otro lado, un solo punto es independiente respecto a los otros, cabe resaltar, que al final todos forman una relación respecto

al sistema, los puntos de referencia 1,2,3 y 4 corresponden a la zona de transición del lago y los restantes, a la zona interior del lago.

Para el escenario actual se seleccionan los siguientes puntos:

Tabla 5.2

Puntos de relevancia - Renovación esc. actual.

Punto de relevancia	Descripción
7	Compuerta de salida
2	Aportes y detracciones sector sur-este
4	Aportes por riego
3	Aportes y detracciones sector nor-oeste
1	Entrada al lago

Fuente: Autor.

Se realiza el mismo procedimiento para el escenario 1 y 2, el cual se presenta a continuación en la figura 5.2.

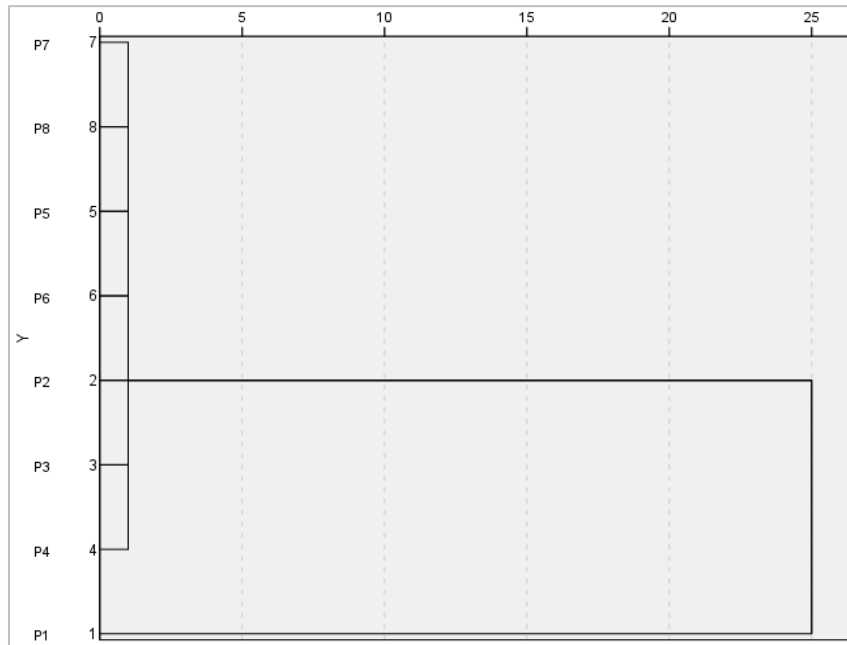


Figura 5.2. Clúster realizado a partir del potencial de renovación en el escenario 1. Autor

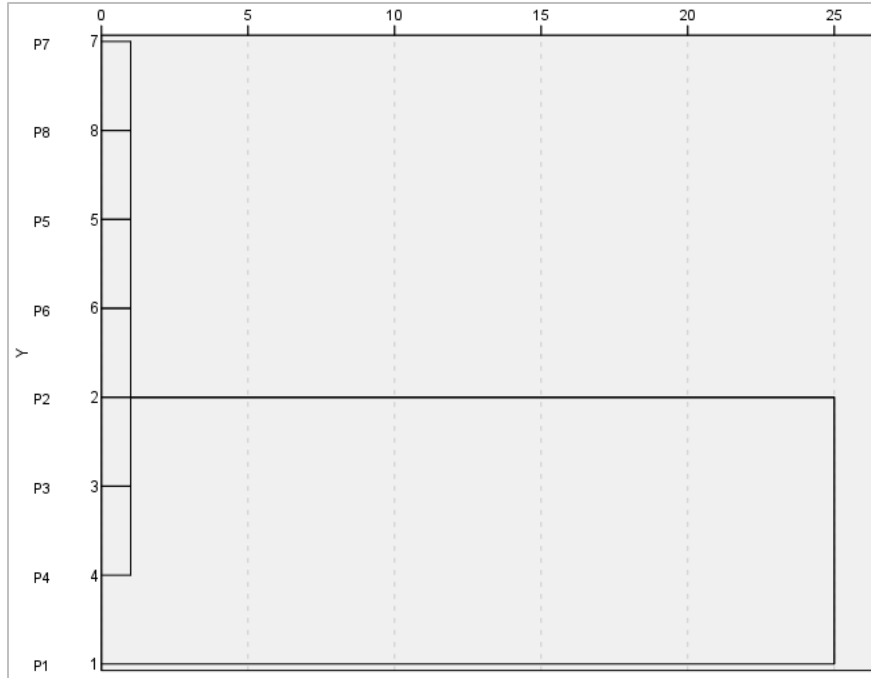


Figura 5.3. Clúster realizado a partir del potencial de renovación en el escenario 2. Autor

A diferencia de la condición actual, el punto 2 en los escenarios 1 y 2, compone una relación con el punto 3, debido a que se ubican en la costa del lago, así mismo, el P6 es cercano e indica una similitud, adicionalmente, conforman un grupo de asociación con los puntos 7,8,5, y 4, por ende, se pueden elegir los mismos puntos del escenario actual, por último, el punto 1 es independiente de los otros, por tal razón, conlleva a una selección directa.

Tabla 5.3

Puntos de relevancia - Renovación esc. 1 y 2.

Punto de relevancia	Descripción
7	Compuerta de salida
2	Aportes y detracciones sector sur-este
4	Aportes por riego
3	Aportes y detracciones sector nor-oeste
1	Entrada al lago

Fuente: Autor.

Capítulo 5 – Evaluación de diferentes escenarios

Por último, se llevó a cabo el cálculo del coeficiente de variación espacial (tabla 5.5), con el propósito de establecer una medida estadística sobre la dispersión relativa del conjunto de datos en los puntos seleccionado para cada escenario.

Tabla 5.4

Coefficientes de variación espacial para los 3 escenarios.

Renovación	Coefficiente de Variación Espacial
Escenario actual	55%
Escenario 1	32%
Escenario 2	32%

Fuente: Autor.

El escenario 1 y 2 comprenden poca variabilidad en los datos y es una muestra compacta a diferencia del escenario actual, el cual se encuentra superior al 50%, refiriéndose a que los datos o la muestra presentan mayor dispersión entre sus medias.

Tabla 5.5

Cálculo del coeficiente de variación espacial para los 3 escenarios.

Renovación Esc.Actual					Renovación Esc.1					Renovación Esc.2				
Concentración de Trazadores (ppb)					Concentración de Trazadores (ppb)					Concentración de Trazadores (ppb)				
P1	P2	P3	P4	P7	P1	P2	P3	P4	P7	P1	P2	P3	P4	P7
6.630	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63
0.370514	6.62	6.62	6.62	6.62	3.31	6.62	6.62	6.62	6.62	3.28	6.62	6.62	6.62	6.62
0.0298259	6.62	6.62	6.62	6.62	3.12	6.62	6.62	6.62	6.62	3.11	6.62	6.62	6.62	6.62
0.0021447	6.61	6.61	6.60	6.61	11.40	6.61	6.61	6.61	6.61	11.81	6.61	6.61	6.60	6.61
0.00013	6.59	6.60	6.53	6.60	13.85	6.60	6.60	6.57	6.60	13.94	6.59	6.60	6.54	6.60
6.25E-06	6.56	6.58	6.34	6.60	5.33	6.58	6.59	6.48	6.60	4.96	6.57	6.59	6.44	6.60
3.98E-05	6.50	6.51	6.16	6.58	3.18	6.55	6.55	6.47	6.59	3.13	6.54	6.54	6.49	6.59
1.39E-06	6.41	6.46	5.99	6.57	3.10	6.53	6.54	6.59	6.58	3.10	6.52	6.53	6.67	6.57
3.56E-08	6.29	6.36	5.86	6.54	12.14	6.55	6.53	6.71	6.56	12.44	6.56	6.55	6.76	6.55
6.42E-10	6.13	6.26	5.72	6.49	4.71	6.58	6.57	6.67	6.55	4.45	6.60	6.59	6.64	6.54
1.11E-11	5.97	6.07	5.56	6.42	12.42	6.59	6.62	6.54	6.54	12.66	6.59	6.63	6.50	6.53
3.62E-13	5.81	5.85	5.40	6.33	4.49	6.57	6.59	6.55	6.54	4.26	6.58	6.57	6.58	6.54
4.79E-14	5.68	5.81	5.17	6.20	3.11	6.57	6.54	6.62	6.54	3.10	6.58	6.53	6.65	6.55
6.43E-15	5.51	5.49	4.95	6.02	3.10	6.59	6.55	6.71	6.54	3.10	6.61	6.56	6.77	6.55
2.82E-17	5.25	4.99	4.70	5.87	3.10	6.62	6.63	6.70	6.54	3.10	6.64	6.68	6.69	6.55
5.60E-20	4.96	4.67	4.53	5.75	12.47	6.58	6.72	6.56	6.54	12.95	6.56	6.76	6.48	6.56
8.27E-20	4.77	4.86	4.25	5.59	13.98	6.51	6.67	6.42	6.55	14.00	6.44	6.66	6.30	6.57
9.07E-19	4.62	4.91	4.10	5.41	14.00	6.44	6.58	6.30	6.55	14.00	6.36	6.54	6.25	6.56
7.60E-18	4.46	4.69	4.02	5.22	14.00	6.41	6.45	6.38	6.54	14.00	6.37	6.40	6.55	6.53
2.61E-16	4.32	4.13	4.08	5.11	14.00	6.45	6.32	6.61	6.52	14.00	6.49	6.36	6.87	6.50
7.60E-11	4.23	4.03	4.04	5.00	14.00	6.58	6.39	6.78	6.50	14.00	6.70	6.55	7.05	6.48
2.67E-09	4.24	4.10	3.93	4.88	14.00	6.67	6.55	6.93	6.48	14.00	6.81	6.75	7.21	6.46
3.42E-11	4.23	4.01	3.94	4.77	5.74	6.72	6.74	6.99	6.48	4.91	6.89	6.97	7.24	6.48
5.15E-13	4.17	3.80	3.97	4.68	3.28	6.80	6.99	7.02	6.49	3.12	6.98	7.26	7.26	6.50
2.46E-14	4.09	3.72	3.99	4.62	3.11	6.89	7.15	7.04	6.50	3.10	7.10	7.44	7.27	6.53
2.10E-12	3.97	3.69	3.95	4.57	3.10	7.01	7.25	7.07	6.51	3.10	7.20	7.54	7.26	6.55
1.71E-14	3.89	3.70	3.76	4.50	3.10	7.05	7.29	7.15	6.53	3.10	7.12	7.54	7.27	6.60
1.33E-12	3.85	3.77	3.58	4.40	3.10	6.99	7.25	7.11	6.59	3.10	7.00	7.41	7.11	6.68
1.87E-13	3.80	3.57	3.56	4.32	3.10	6.93	7.24	6.93	6.64	3.10	6.94	7.27	6.90	6.75
4.64E-17	3.69	3.38	3.62	4.27	3.10	6.85	7.09	6.83	6.67	3.10	6.84	7.01	6.82	6.78
3.15E-20	3.55	3.46	3.36	4.18	12.79	6.71	6.99	6.73	6.71	13.13	6.67	6.93	6.66	6.81
Coefficiente de Variación Espacial				0.55	Coefficiente de Variación Espacial				0.32	Coefficiente de Variación Espacial				0.32

Fuente: Autor.

Capítulo 5 – Evaluación de diferentes escenarios

Seguidamente la selección de puntos se efectuó para el parámetro de déficit hídrico, donde se observa el análisis de cluster para identificar los grupos asociativos, los cuales se representan en la figura 5.4.

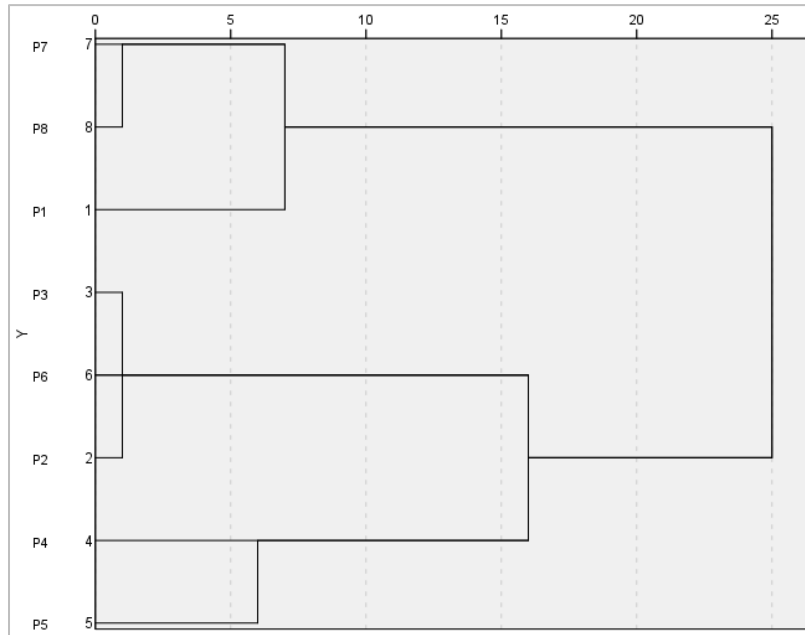


Figura 5.4. Clúster realizado a partir del potencial de déficit hídrico en el escenario actual.
Autor

El potencial de déficit hídrico está relacionado con la profundidad de la columna de agua, de acuerdo a los resultados, los puntos 4 y 5 son cercanos y se ubican en zona más profunda del lago, P2 y P3 están relacionados con la costa y P6 cuenta con una profundidad similar al punto 4, por último, P8 es cercano a P7 el cual corresponde a la salida del sistema y P1 a la entrada.

Para este caso los puntos seleccionados fueron:

Tabla 5.6

Puntos de relevancia – Déficit hídrico esc. actual.

Grupo	Punto de relevancia	Descripción
7 y 8	7	Compuerta de salida
3,6 y 2	3	Punto central del lago
	6	Aportes sector sur-este

Grupo	Punto de relevancia	Descripción
4 y 5	4	Aportes por riego
1	1	Entrada al lago

Fuente: Autor.

Se realiza la prueba para el escenario 1

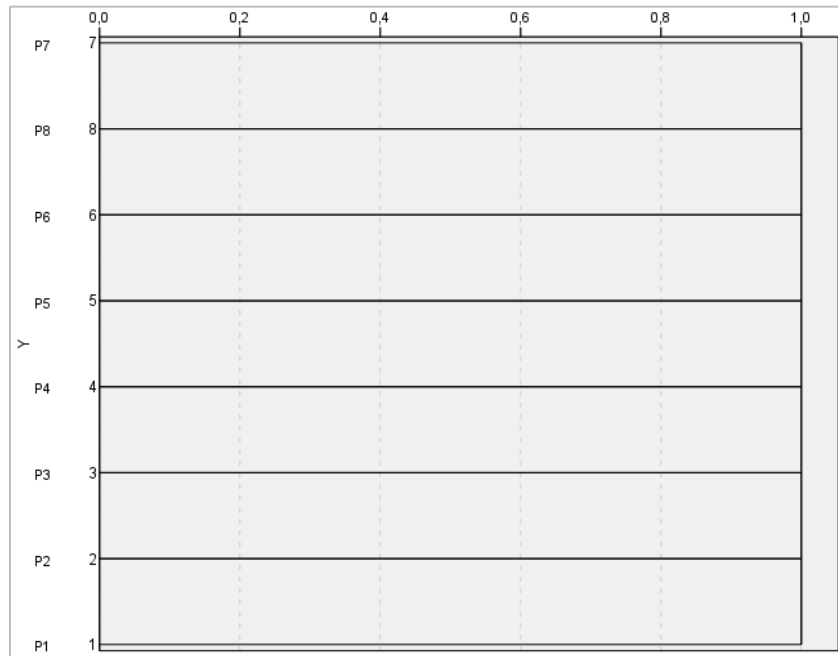


Figura 5.5. Clúster realizado a partir del potencial de déficit hídrico en el escenario 1. Autor.

En este caso, los resultados presentaron un comportamiento similar en la concentración de los trazadores, debido a que, en este escenario no se realizó la apertura de la compuerta y cada punto presento una variación independiente, por ende, los puntos de relevancia son los mismos del escenario actual.

Para el escenario 2, los puntos de relevancia son el 1,2,5,6 y 7, donde el comportamiento es similar al escenario actual, P7 representa la salida del lago y P8 es cercano a este, el punto 1 es la entrada al sistema, seguido de P2 y P3 que están relacionados con la costa y semejantes en términos de profundidad a P6, por último, la zona más profunda son los puntos P4 y P5.

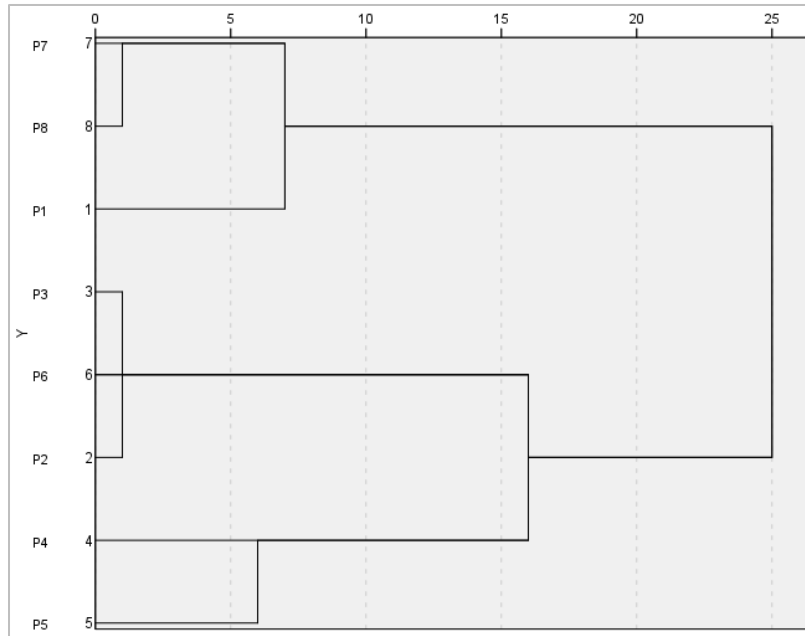


Figura 5.6. Clúster realizado a partir del potencial de déficit hídrico en el escenario 2. Autor

Adicionalmente, se llevó a cabo el cálculo del coeficiente de variación (tabla 5.7).

Tabla 5.7

Coefficientes de variación para los 3 escenarios.

Déficit hídrico	Coefficiente de variación
Escenario actual	19%
Escenario 1	16%
Escenario 2	19%

Fuente: Autor.

El escenario 1 comprende una poca variabilidad en los datos y es una muestra compacta, similar a el escenario 2 y actual.

En el caso del parámetro de salinización, se presenta los resultados similares para los 3 escenarios, por lo cual, se evidencia en la figura 5.7 el mismo patrón.

Capítulo 5 – Evaluación de diferentes escenarios

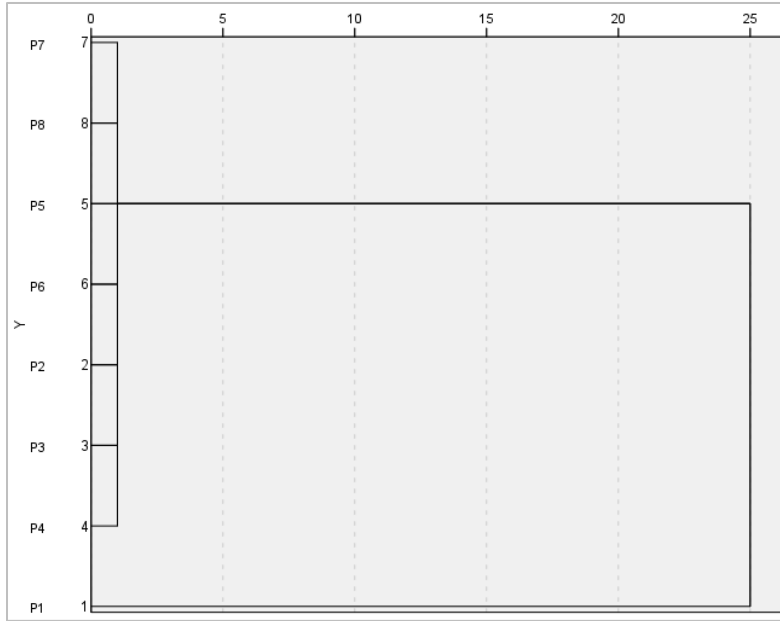


Figura 5.7 Clúster realizado a partir del potencial de salinización en los tres escenarios. Autor

Las concentraciones del punto 1 difieren con respecto a las demás (tabla 5.8), esta situación corresponde a los aportes que se realizan al sistema; la transición de caudal hasta el centro del lago (P5) genera una disminución de la concentración y es donde se evidencia una relación con los puntos restantes, partiendo de la cercanía de los puntos P8, P7, P2 y P6, hasta P3 y P4 que pueden ser próximos a los valores de la entrada del lago.

Tabla 5.8

Coefficientes de variación para los 3 escenarios.

Escenarios	Promedio de la concentración de trazadores (ppb)							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Actual	7.409	6.690	6.785	6.768	6.684	6.654	6.583	6.585
1	7.414	6.658	6.725	6.708	6.636	6.621	6.564	6.564
2	7.412	6.689	6.782	6.765	6.681	6.653	6.581	6.584

La elección de los puntos para el escenario actual, 1 y 2 de realización de acuerdo a la figura 5.8; 5.9; 5.10.

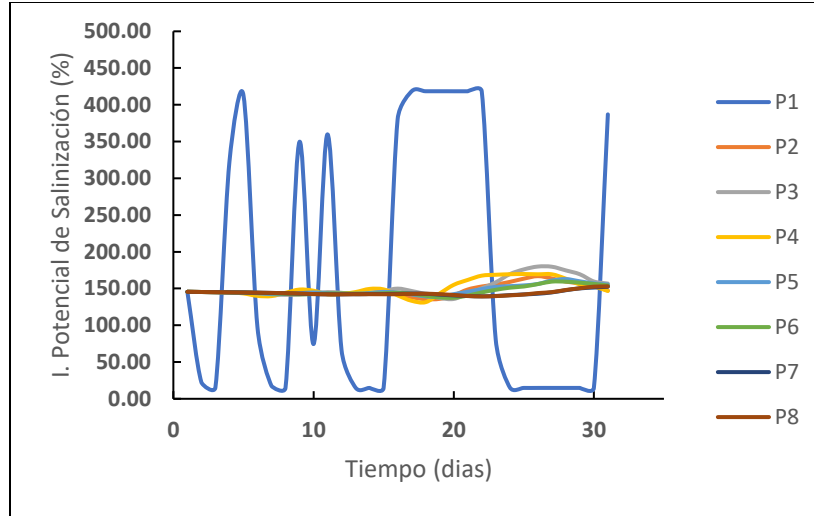


Figura 5.8 Salinización escenario actual. Autor

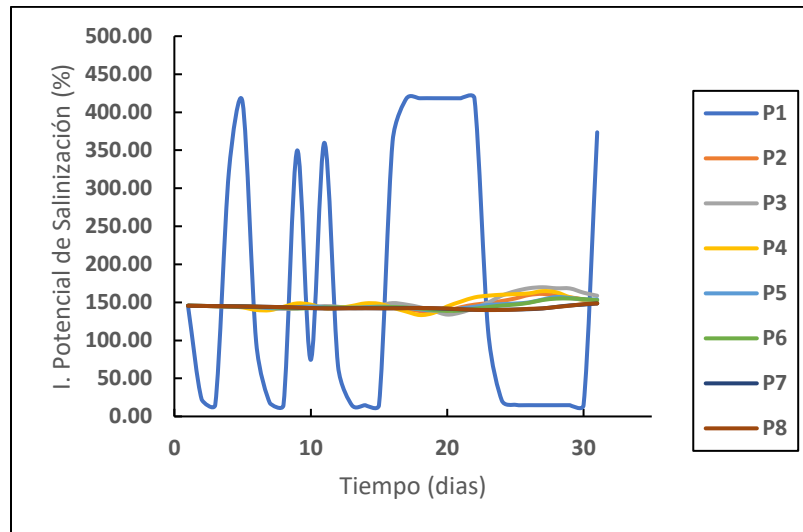


Figura 5.9 Salinización escenario 1. Autor

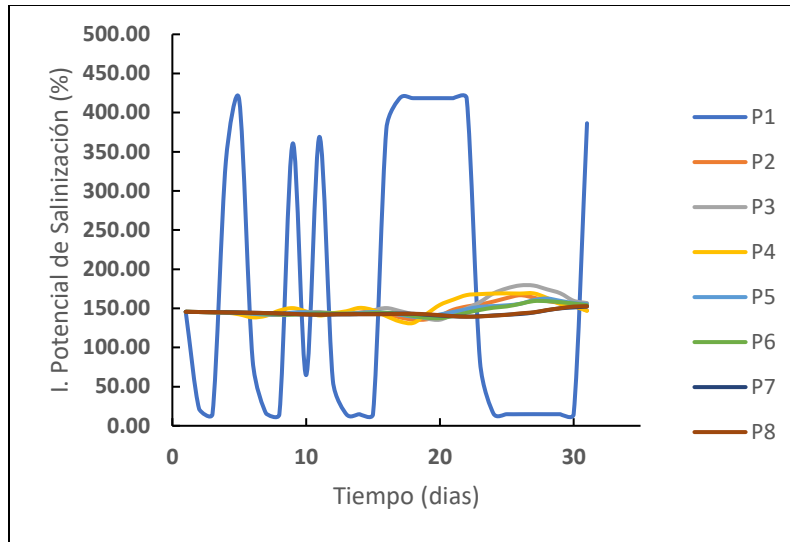


Figura 5.10 Salinización escenario 2. Autor

La variación se presenta para los puntos 1, 2,3,5 y 7, los cuales muestran una diferencia con respecto a los otros en la evaluación de los escenarios.

Tabla 5.9

Coefficientes de variación espacial para los 3 escenarios.

Salinización	Coefficiente de variación
Escenario actual	32%
Escenario 1	32%
Escenario 2	32%

Fuente: Autor.

Los tres escenarios para este parámetro representan un coeficiente de variación espacial cercano al 50%, por ende, la muestra presenta un 32% de dispersión en sus datos.

5.1. Cálculo de los descriptores estratégicos e índice OSI

Teniendo en cuenta los puntos de relevancia seleccionados para cada escenario, se obtiene la evolución temporal de los indicadores socio-ecológicos y el índice OSI en cada ciclo, con el fin

Capítulo 5 – Evaluación de diferentes escenarios

de evaluar y determinar la forma más adecuada de operación para cada uno de los escenarios de interés.

Se obtienen los resultados descritos en las tablas 5.10 y 5.11, en donde se observa que, a pesar de variar la dinámica de operación, los indicadores socio-ecológicos en los 3 escenarios presentan los mismos resultados.

Tabla 5.10

Resultados indicadores socio-ecológicos para los 3 escenarios del mes de octubre.

Escenario	Potencial de renovación				Potencial de salinización				Déficit hídrico			
	Muy alto	Alto	Moderado	Bajo	Muy alto	Alto	Moderado	Bajo	Muy alto	Alto	Moderado	Bajo
Actual	10.00%	2.00%	70.67%	17.33%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	28.39%	71.61%
1	14.00%	16.00%	64.67%	5.33%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
2	16.00%	14.00%	64.67%	5.33%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	20.00%	80.00%

Fuente: Autor.

Adicionalmente, el comportamiento similar en los escenarios para el mes de octubre del 2016, se refleja a partir de los resultados del índice OSI.

Tabla 5.11

Resultados categóricos indicadores socio-ecológicos e índice OSI para los 3 escenarios del mes de octubre.

Escenario	Eutrofización				Salinización				Déficit hídrico				Índice (OSI)
	B	M	A	MA	B	M	A	MA	B	M	A	MA	
Actual													Moderada
1													Moderada
2													Moderada

Fuente: Autor.

No obstante, revisando detalladamente, el porcentaje de días en cada categoría dentro de cada indicador, se observa una diferencia en cuanto a la magnitud en los distintos escenarios (tabla 5.12), lo que sugiere que, el escenario 2 es el que mejores resultados presenta. El déficit hídrico se

Capítulo 5 – Evaluación de diferentes escenarios

logra mantener en una categoría de susceptibilidad baja a lo largo de un 74.19 % de los días, lo que indica que el sistema no tendría problemas en torno a la oferta hídrica, teniendo en cuenta que está sometido a condiciones climáticas de alta precipitación, lo que contribuye a mejorar la renovación del cuerpo: susceptibilidad alta (6.66 %) y susceptibilidad moderada (83.33 %). Por otra parte, el potencial de salinización se mantiene en una categoría de susceptibilidad muy alta (100%) en los tres escenarios, debido a la naturaleza salina del cuerpo y del área de influencia en general, lo cual no puede ser modificado bajo estos escenarios de operación previstos.

Tabla 5.12

Resultados categóricos indicadores socio-ecológicos e índice OSI para los 3 escenarios.

Escenario	Potencial de renovación				Potencial de salinización				Déficit hídrico			
	Muy alto	Alto	Moderado	Bajo	Muy alto	Alto	Moderado	Bajo	Muy alto	Alto	Moderado	Bajo
Actual	12.90%	0.00%	80.64%	6.45%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	29.03%	70.96%
1	10.00%	13.33%	76.66%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
2	10.00%	6.66%	83.33%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	25.80%	74.19%

Fuente: Autor.

Con base en los resultados diarios, se puede observar que los escenarios no solo dependen de las diferentes formas de operación del sistema con respecto a las aperturas de la compuerta, también se basan en las condiciones climáticas, cuyos aportes de precipitación, atribuyen a factores como la dilución. El escenario 2 es el resultado del conjunto de las condiciones climáticas y la apertura de las compuertas, donde el sistema presenta un potencial de eutrofización moderado en la mayoría de los días evaluados y cuya diferencia se debe los demás factores (evaporación, velocidad del viento). Los resultados del índice OSI para los 3 escenarios se reflejan a continuación:

Tabla 5.13

Resultados categóricos indicadores socio-ecológicos e índice OSI para el escenario actual.

Escenario Actual													Índice (OSI)
Día	Eutrofización				Salinización				Déficit hídrico				
	B	M	A	MA	B	M	A	MA	B	M	A	MA	
1/10/2016													Moderada
2/10/2016													Moderada
3/10/2016													Moderada
4/10/2016													Moderada
5/10/2016													Moderada
6/10/2016													Moderada
7/10/2016													Moderada
8/10/2016													Moderada
9/10/2016													Moderada
10/10/2016													Moderada
11/10/2016													Moderada
12/10/2016													Moderada
13/10/2016													Moderada
14/10/2016													Moderada
15/10/2016													Moderada
16/10/2016													Alta
17/10/2016													Moderada
18/10/2016													Moderada
19/10/2016													Alta
20/10/2016													Moderada
21/10/2016													Alta
22/10/2016													Moderada
23/10/2016													Moderada
24/10/2016													Moderada
25/10/2016													Moderada
26/10/2016													Moderada
27/10/2016													Alta
28/10/2016													Moderada
29/10/2016													Moderada
30/10/2016													Moderada
31/10/2016													Moderada

Fuente: Autor.

Tabla 5.14

Resultados categóricos indicadores socio-ecológicos e índice OSI para el escenario 1.

Escenario 1													Índice (OSI)
Día	Eutrofización				Salinización				Déficit hídrico				
	B	M	A	MA	B	M	A	MA	B	M	A	MA	
1/10/2016													Moderada
2/10/2016													Moderada
3/10/2016													Moderada
4/10/2016													Moderada
5/10/2016													Moderada
6/10/2016													Moderada
7/10/2016													Moderada
8/10/2016													Moderada
9/10/2016													Alta
10/10/2016													Moderada
11/10/2016													Moderada
12/10/2016													Moderada
13/10/2016													Moderada
14/10/2016													Moderada
15/10/2016													Moderada
16/10/2016													Moderada
17/10/2016													Moderada
18/10/2016													Moderada
19/10/2016													Moderada
20/10/2016													Alta
21/10/2016													Alta
22/10/2016													Alta
23/10/2016													Alta
24/10/2016													Moderada
25/10/2016													Alta
26/10/2016													Alta
27/10/2016													Moderada
28/10/2016													Moderada
29/10/2016													Moderada
30/10/2016													Moderada
31/10/2016													Moderada

Fuente: Autor.

Tabla 5.15

Resultados categóricos indicadores socio-ecológicos e índice OSI para el escenario 2.

Escenario 2													Índice (OSI)
Día	Eutrofización				Salinización				Déficit hídrico				
	B	M	A	MA	B	M	A	MA	B	M	A	MA	
1/10/2016													Moderada
2/10/2016													Moderada
3/10/2016													Moderada
4/10/2016													Moderada
5/10/2016													Moderada
6/10/2016													Moderada
7/10/2016													Moderada
8/10/2016													Moderada
9/10/2016													Alta
10/10/2016													Moderada
11/10/2016													Moderada
12/10/2016													Moderada
13/10/2016													Moderada
14/10/2016													Moderada
15/10/2016													Moderada
16/10/2016													Moderada
17/10/2016													Moderada
18/10/2016													Moderada
19/10/2016													Moderada
20/10/2016													Alta
21/10/2016													Alta
22/10/2016													Alta
23/10/2016													Alta
24/10/2016													Moderada
25/10/2016													Moderada
26/10/2016													Moderada
27/10/2016													Moderada
28/10/2016													Moderada
29/10/2016													Moderada
30/10/2016													Moderada
31/10/2016													Moderada

Fuente: Autor.

Para el mes de octubre del año 2016, gran parte del lago se encuentran en la categoría de susceptibilidad moderada con respecto al potencial de renovación, debido a que, el sistema presenta una dinámica de flujos de agua, ya sea por aportes de las condiciones climáticas o por las

Capítulo 5 – Evaluación de diferentes escenarios

entradas y salidas del lago. La calidad del lago tendrá una incidencia directa con la temperatura ambiente y su aumento, ya que rige la temperatura del agua y todos los procesos de transformación de la materia, al mismo tiempo, la turbiedad, nitrógeno total, sólidos disueltos y coliformes totales tendrán una dinámica relacionada con el tiempo de renovación, donde la susceptibilidad moderada puede generar una disminución en la concentración de estos parámetros en el lago.

Para el potencial de salinización, se presenta una susceptibilidad muy alta, en consecuencia, a la sensibilidad frente a la salinización que tienen los drenajes directos que están presentes en sus inmediaciones y su incremento por parte de la evaporación, las consecuencias en la calidad del agua corresponden al aumento de parámetros como la conductividad, pH y la dureza total, los cuales pueden afectar directamente a los cultivos si se emplea este recurso. Contrario al aumento de los parámetros mencionados anteriormente, las concentraciones de nitratos, profundidad de disco secchi, oxígeno disuelto y coliformes totales, serán bajas con respecto a la alta salinización.

El déficit hídrico presente en el sistema es de baja susceptibilidad, determinado por las altas precipitaciones, aportes de flujos de entrada y drenaje de los cultivos. Por otra parte, la influencia sobre la calidad del agua se refleja en los parámetros de profundidad de disco secchi, nitratos, oxígeno disuelto, nitrógeno total, coliformes totales, temperatura ambiente, pH y sólidos totales, ya que, la concentración de estos parámetros aumenta, cuando el volumen incrementa, caso contrario, a los parámetros de potasio, cloruros, conductividad, dureza total, calcio, sodio y sulfatos.

Por último, el índice OSI en su categoría de susceptibilidad moderado, equivalente a la susceptibilidad del lago, significa que la gestión ambiental del sistema tiende a la sostenibilidad, pero requiere priorizar estrategias para mejorar al menos uno de los descriptores estratégicos tipificado en la categoría alta o muy alta en su valoración general (Usaquén-Perilla, 2017). Los

Capítulo 5 – Evaluación de diferentes escenarios

tres escenarios evaluados y modificados en las condiciones actuales de operación presentan categorías altas en el parámetro de salinidad, por ello, es necesario abordar regionalmente la gestión del sistema, buscando optimizar los flujos de entrada y salida al lago, con estrategias que incluyan la gestión desde la cuenca y el control del flujo de salida, hasta alcanzar límites de tolerancia apropiados para disminuir la susceptibilidad del sistema socio- ecológico en su conjunto. de tal forma que la susceptibilidad de todos los descriptores no se aleje de la condición de susceptibilidad moderada o baja

6. Conclusiones

. El uso de modelos numéricos con resolución espacio-temporal ofrece ventajas en la modelización en sistemas como lagos, debido a que permite tener resultados de la hidrodinámica en puntos específicos del sistema, permitiendo aplicar diferentes metodologías en este caso la metodología OSSEM.

La metodología es flexible a los cambios y establece condiciones para adaptarse con las variables de interés ambiental, donde se puede ejecutar de manera global o local con escala temporal o espacio – temporal.

Para la corrida de los modelos, se usa el modelo calibrado (2015) y se alimenta con las series climáticas de 2016 y 2017, precipitación, evaporación caudal de entrada proveniente de quebrada honda, apertura de compuerta (si la hay) y las características de conductividad medidas en los años 2016 (octubre) y 2017 (febrero y septiembre). Una vez corridos los modelos, se realiza ajuste en las detracciones del sistema y se valida la información obtenida con el nivel medido en el lago y la conductividad de lo muestreos realizados. El grado de ajuste entre los datos medidos y simulados se evalúa mediante el uso de los criterios estadísticos, los cuales aceptan y verifican que el modelo representa la condición real evaluada.

Una vez se verifico el modelo, se procede a hacer uso de las características hidrodinámicas, para estimar aspectos como la dirección del flujo de masa, tiempo de concentración y comportamiento de trazadores en el lago. Siendo estas variables el insumo para la aplicación de los indicadores de base hidrodinámica.

Una vez obtenidas las variables hidrodinámicas del modelo para las series de tiempo evaluadas se procede a evaluar los potenciales de renovación, salinidad y déficit hídrico para los periodos

Capítulo 6 – Conclusiones

2015(abril y agosto), 2016 (octubre) y 2017(febrero y septiembre, observando que para el 2015 en los dos meses analizados, gran parte del lago se encuentran en la categoría de susceptibilidad moderada, el punto 1 (entrada de Lago) tiene una susceptibilidad baja, lo cual puede deberse a la entrada de flujo de quebrada honda haciendo un cambio de masa de agua en este punto, disminuyendo el tiempo de residencia en esta zona. Por otro lado, abril se caracteriza por ser el mes con la mayor precipitación de este año, mientras que agosto presenta una mayor evaporación.

Para el año 2016 en el mes de octubre, en gran parte del lago se encuentran en la categoría de susceptibilidad moderada, el punto 1 (entrada de Lago) tiene una susceptibilidad baja. El punto 4 del sistema da alta susceptibilidad a la eutrofización, debido a que la concentración del trazador se relaciona con el patrón de la velocidad de la corriente lo que favoreció un aumento de la concentración de trazador en este punto para este día. Este mes para los días analizados se caracteriza por tener un balance positivo entre la precipitación y la evaporación. Finalmente, para febrero de 2017 se observa que el rango de susceptibilidad a la eutrofización esta moderado, la categoría de susceptibilidad moderada es la que más está relacionada con el lago, la concentración del trazador se relaciona con el patrón de la velocidad de la corriente, por otro lado, los días analizados en febrero y septiembre se caracterizaron por tener un balance negativo de precipitación y evaporación, disminuyendo el volumen del sistema. lo que favoreció un aumento de la concentración de trazador en los puntos en este.

En cuanto al potencial de salinización los años 2015,2016 y 2017 presentaron una susceptibilidad entre alta y muy alta, esto se debe principalmente a que el lago tiene afloramientos termominerales, además de que la cuenca de quebrada honda recibe descargas de piscinas termales contribuyendo a un alto contenido de sales en el lago.

Capítulo 6 – Conclusiones

Finalmente, el potencial de déficit hídrico para el año 2015, presenta una susceptibilidad alta, esto debido a que este año se caracterizó por presentar fenómeno del niño, razón por lo cual el nivel del lago se mantuvo bajo. Para los años 2016 y 2017 se presenta una susceptibilidad baja para déficit hídrico.

La evaluación de los descriptores y su integración mediante el índice OSI permiten valorar y categorizar la gestión del lago, la cual no es sostenible para el lago para el año 2015, para el 2016 y 2017 el OSI permite determinar que la gestión del lago tiende a la sostenibilidad, Las estrategias de gestión deben priorizar el manejo de la naturaleza salina del recurso hídrico empleado para uso agrícola de forma directa e indirecta, la búsqueda de fuentes alternativas para satisfacer las necesidades hídricas asociadas a los cultivos menos tolerantes a la salinidad. Por ello, es necesario abordar regionalmente la gestión del sistema, buscando optimizar los flujos de entrada y salida al lago, con estrategias que incluyan la gestión desde la cuenca y el control del flujo de salida, hasta alcanzar límites de tolerancia apropiados para disminuir la susceptibilidad del sistema socio-ecológico en su conjunto. de tal forma que la susceptibilidad de todos los descriptores no se aleje de la condición de susceptibilidad moderada o baja.

Una vez aplicados los indicadores de base hidrodinámica, los resultados y la calidad medida en el lago se somete a pruebas estadísticas, definiendo el tipo de normalidad, se observa que solo tres parámetros siguen una distribución normal ($p > 0.05$), que corresponden a temperatura, profundidad de disco secchi y magnesio. Por tal motivo para determinar la correlación y los parámetros que más vinculados están con los indicadores de base hidrodinámica, se usa el coeficiente de correlación de Spearman,

Al realizar la correlación se identificó que el único parámetro con una correlación muy fuerte con la salinidad es el potasio, los parámetros con correlación fuerte con el potencial de

Capítulo 6 – Conclusiones

renovación son la temperatura y los cloruros, para el potencial de salinización la conductividad, dureza, cloruros, nitratos y nitrógeno total, para déficit hídrico la profundidad de Secchi, cloruros, nitratos, nitrógeno total y potasio.

El potencial de renovación describe el tiempo de residencia o la capacidad de renovar el sistema, si el sistema no se renueva es más susceptible a eutrofizarse. la temperatura ambiente va a tener una influencia directa, en la temperatura del agua, este es un factor que aumenta la productividad al aumentar la tasa de reciclado de materia en el sistema (Klapper, 1991). Además, debido al efecto de la temperatura se rigen la producción, utilización y descomposición de la materia (Wetzel, 1981), con base en los resultados se puede presumir que el potencial de renovación al tener una susceptibilidad baja, va tener una incidencia directa en la temperatura. En cuanto a los cloruros la correlación es inversa, este funciona con un trazador en el lago, es decir con un potencial de renovación alto (susceptibilidad a eutrofización baja), se espera encontrar concentraciones bajas de cloruros. Con respecto al oxígeno disuelto la correlación es directa, un potencial de eutrofización bajo (PR alto o muy alto) se espera que corresponda con concentraciones altas de oxígeno disuelto en el lago, debido a que el agua del sistema entra y sale constantemente. En cuanto a la dureza total, a mayores potenciales de renovación se espera encontrar aguas con concentraciones bajas de sales disueltas, entre ellas las asociadas con la dureza y la conductividad, también debido al origen de las aguas (termo minerales), la no renovación del sistema implicará una acumulación de sales en el mismo.

El potencial de salinización 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. Para este ejemplo de aplicación, se ha asumido la condición

Capítulo 6 – Conclusiones

hipotética crítica de riego directo (con el agua del lago) en cultivos sensibles a la salinidad, tales como, frutales y hortalizas.

Se puede observar una correlación directa entre el potencial de salinización y los parámetros de potasio, cloruros, conductividad, sulfatos, sodio, calcio, potencial redox y dureza total, debido a que las sales disueltas aportarán directamente a la susceptibilidad por salinización, a mayor susceptibilidad de este indicador se puede decir que se espera encontrar mayor concentración de sales disueltas o mayor cantidad de iones disueltos;(Claudio Gómez, 2018) afirma que estos iones disueltos en el agua pueden provocar un incremento en el valor de la conductividad eléctrica, así como un aumento en la concentración de sólidos disueltos totales, de la dureza y de la alcalinidad total. Estos cuatro parámetros fisicoquímicos están relacionados directamente con la temperatura y el pH del agua.

Con respecto a los resultados, los nitratos, el nitrógeno total, la temperatura ambiente, la profundidad de secchi, el oxígeno disuelto y los coliformes totales, se encontró una correlación negativa; aguas con bajas concentraciones se espera que correspondan con susceptibilidades altas de salinización y viceversa, a susceptibilidad baja de salinización se espera encontrar concentraciones altas de estos parámetros.

El potencial de déficit hídrico diario (PWD) es el indicador que evalúa la susceptibilidad de un dominio (global/sistema, local/celda) frente a la disponibilidad del recurso para los subsistemas natural y humano.

Para este indicador los parámetros que tienen una correlación directa son disco secchi, nitratos, oxígeno disuelto, nitrógeno total, coliformes totales, temperatura ambiente, pH y sólidos

Capítulo 6 – Conclusiones

totales, es decir un aumento en el potencial de déficit hídrico, el nivel o mayor cantidad de volumen de agua en el lago se espera corresponda con altos valores en los parámetros mencionados.

Por el contrario, los parámetros que tuvieron una correlación negativa con el indicador son potasio, cloruros, conductividad, dureza total, calcio, sodio y sulfatos, debido a que un potencial de déficit hídrico al responder a un aumento del volumen de agua en el lago, e indica una dilución de sales disminuyendo la concentración de estos parámetros en el sistema.

Finalmente se evaluó 3 escenarios de operación diferentes para el año 2016 (Escenario Actual (una apertura de las compuertas), Escenario 1 (no se presenta ninguna apertura de la compuerta), Escenario 2 (dos aperturas de las compuertas)). observando que los escenarios no solo dependen de las diferentes formas de operación del sistema con respecto a las aperturas de la compuerta, también se basan en las condiciones climáticas, cuyos aportes de precipitación, atribuyen a factores como la dilución. El escenario 2 (mejor resultado) es el resultado del conjunto de las condiciones climáticas y la apertura de las compuertas, donde el sistema presenta un potencial de eutrofización moderado en la mayoría de los días evaluados,

Los resultados del índice OSI para los 3 escenarios se reflejan que gran parte del lago se encuentran en la categoría de susceptibilidad moderada con respecto al potencial de renovación, debido a que, el sistema presenta una dinámica de flujos de agua, ya sea por aportes de las condiciones climáticas o por las entradas y salidas del lago. La calidad del lago tendrá una incidencia directa con la temperatura ambiente y su aumento, ya que rige la temperatura del agua y todos los procesos de transformación de la materia, al mismo tiempo, la turbiedad, nitrógeno total, sólidos disueltos y coliformes totales tendrán una dinámica relacionada con el tiempo de renovación, donde la susceptibilidad moderada puede generar una disminución en la concentración de estos parámetros en el lago.

Capítulo 6 – Conclusiones

Para el potencial de salinización, se presenta una susceptibilidad muy alta, en consecuencia, a la sensibilidad frente a la salinización que tienen los drenajes directos que están presentes en sus inmediaciones y su incremento por parte de la evaporación, las consecuencias en la calidad del agua corresponden al aumento de parámetros como la conductividad, pH y la dureza total, los cuales pueden afectar directamente a los cultivos si se emplea este recurso. Contrario al aumento de los parámetros mencionados anteriormente, las concentraciones de nitratos, profundidad de disco secchi, oxígeno disuelto y coliformes totales, serán bajas con respecto a la alta salinización.

El déficit hídrico presente en el sistema es de baja susceptibilidad, determinado por las altas precipitaciones, aportes de flujos de entrada y drenaje de los cultivos. Por otra parte, la influencia sobre la calidad del agua se refleja en los parámetros de profundidad de disco secchi, nitratos, oxígeno disuelto, nitrógeno total, coliformes totales, temperatura ambiente, pH y sólidos totales, ya que, la concentración de estos parámetros aumenta, cuando el volumen incrementa, caso contrario, a los parámetros de potasio, cloruros, conductividad, dureza total, calcio, sodio y sulfatos.

Por último, el índice OSI en su categoría de susceptibilidad moderado, equivalente a la susceptibilidad del lago, significa que la gestión ambiental del sistema tiende a la sostenibilidad, pero requiere priorizar estrategias para mejorar al menos uno de los descriptores estratégicos tipificado en la categoría alta o muy alta en su valoración general. Los tres escenarios evaluados y modificados en las condiciones actuales de operación presentan categorías altas en el parámetro de salinidad, por ello, es necesario abordar regionalmente la gestión del sistema, buscando optimizar los flujos de entrada y salida al lago, con estrategias que incluyan la gestión desde la cuenca y el control del flujo de salida, hasta alcanzar límites de tolerancia apropiados para disminuir la susceptibilidad del sistema socio- ecológico en su conjunto. de tal forma que la

Capítulo 6 – Conclusiones

susceptibilidad de todos los descriptores no se aleje de la condición de susceptibilidad moderada o baja.

Los indicadores socio-ecológicos propuestos en la metodología OSSEM, presentan correlaciones significativas con variables de interés ambiental, que se vinculan con procesos de eutrofización, salinización y la dinámica hídrica del lago Sochagota.

El potencial de renovación se correlaciona con variables asociadas a procesos de contaminación orgánica, características climáticas iones disueltos y partículas en suspensión (temperatura ambiente, cloruros, temperatura del agua, dureza total, sólidos suspendidos totales, conductividad, oxígeno disuelto, turbiedad, nitrógeno total, sólidos disueltos totales y coliformes totales).

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.

Finalmente, el déficit hídrico muestra una correlación asociada a factores de dilución de diferentes sustancias, las condiciones climáticas que favorecen la precipitación, conllevan en algunos casos al aumento del nivel del sistema, y en otros, presentan procesos de disminución, producto de la demanda de agua para satisfacer las necesidades básicas de los cultivos.

7. Recomendaciones

Se recomienda, que el presente trabajo sea alimentado con más información de calidad medida en el lago, ya que al hacer la correlación de los parámetros es importante mencionar que la calidad de las diferentes fechas monitoreadas no abordó el mismo número de parámetros.

Se debe realizar más investigaciones que busquen alternativas económicas y viables para la evaluación de las condiciones de calidad del agua.

Debido a los costos asociados a monitoreos, se cuenta con información escasa de calidad del lago, actualmente corpoboyaca situó una estación de calidad en la compuerta del Lago, se recomienda realizar la gestión para mayor inversión en otros puntos de monitoreo, generando una base de datos que sirva de insumo, para mejorar la gestión del lago y su operación.

Se recomienda tomar este insumo junto con otros proyectos para plantear las reglas de operación de aperturas de compuertas en el lago Sochagota,

Referencias

- Acosta, P., Sierra, L. (2013). Evaluación de métodos de construcción de curvas IDF a partir de distribuciones de probabilidad y parámetros de juste. Colombia, Revista Facultad de ingeniería, UPTC. Vol. 22. No.35 pp 25-33.
- Andrade, Á., & Navarrete, F. (2004). Lineamientos para la aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integral del recurso hídrico. Serie Manuales de Educación y Capacitación Ambiental, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente - PNUMA - Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Red de Formación Ambiental. México. 111pp. Obtenido de: <http://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-11/semana1/andrade01.pdf>.
- Batista, S., & Harari, J. (2017). Modelagem da dispersão de coliformes termotolerantes e enterococos em duas enseadas na região xosteira de Ubatuba (SP), Brasil. Eng Sanit Ambient, 22, 403-414.
- Betancur, G., Toro, F., & Gómez, Á. (2016). Methodology for hydrodynamic model selectio. Case study: spatial variability of the thermal structure in the Riogrande II tropical resevoir, Colombia. DYNA, Universidad Nacional de Colombia, 154-164.
- Cañedo-Argüelles et al., 2013; Newton et al., 2014; Sumner & Belaineh, 2005).Cañedo-Argüelles, M., Kefford, B. J., Piscart, C., Prat, N., Schäfer, R. B., & Schulz, C.- J. (2013). Salinisation of rivers: An urgent ecological issue. Environmental Pollution, 173, 157–167. doi: 10.1016/j.envpol.2012.10.011.
- Chen, F., Zhang, C., Brett, M., & Nielsen, J. (2020). The importance of the wind-grag coefficient parameterization for hydrodynamic modeling of a large sallow lake. Ecological Informatics, 59, 101-106.
- Claudio Gómez, O. (2018). Desalinización De Agua Para Aplicaciones De Potabilización Mediante El Desarrollo De Tecnología Solar Sustentable. 12–50.
- Danish Hydraulic Institute DHI. (2013). Mike 21 & MIKE 3 Flow Model FM: Hydrodynamic Module. Danish Hydraulic Institute, DHI.

- Dantong Liu, Changchun Song, Chong Fang, Zhuohang Xin, Jia Xi, Yongzheng Lu, A recommended nitrogen application strategy for high crop yield and low environmental pollution at a basin scale, *Science of The Total Environment*, Volume 792, 2021, 148464, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148464>.
- Deltares . (2021). DELFT 3D User manual: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows. Deltares.
- Deltares. (2013). DELFT 3D- FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. The Netherlands: Deltares.
- Díaz, C. García, M. León, F. Ruiz F. Torres, P.Lizama, G. B. (2014). Universidad de Chile Facultad de Ciencias Sociales (FACSO) Departamento de Sociología.
- Dinius, S. H. (1987). Desing of an Index of Water Quality. *Water Resour*, 23, 833-842.
- Drezner, Z., & Turel, O. (2011). Normalizing variables with too-frequent values using a Kolmogorov-Smirnov test: A practical approach. *Computers and Industrial Engineering*, 61(4), 1240–1244. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.07.015>
- Dupas, R., Delmas, M., Dorioz, J., & Garnier, J. (2015). Assessing the impact of agricultural pressures on N and P loads and eutrophication risk. *Ecological Indicators*, 48, 396–407. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.007>
- Dudgeon, D., Arthington, A.H., Gessner, M.O., Kawabata, Z.-I., Knowler, D.J., L veque, Naiman, C., R.J., Prieur-Richard, A.-H., Soto, D., Stiassny, M.L.J., & Sullivan, C.A. (2005). Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Review* 81, 163–182. doi: 10.1017/S1464793105006950.
- E.G. Pulgar n . Fórmulas regionales para la estimación de curvas intensidad - frecuencia duración basadas en las propiedades de escala de la lluvia (Región Andina Colombiana) . Medellín : Universidad Nacional de Colombia . 2009 .
- Espinal, T., Sedeño, J., & López, E. (2013). Evaluación de la calidad del agua en la laguna de Yuriria, Guanajuato, México, mediante técnicas multivariadas: un análisis de valoración para dos épocas 2005, 2009-2010. *Rev. Int. Contam. Ambie*, 29, 147-163.

- EPA. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. Obtenido de <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL>.
- EPA. (2008). United States Environmental Protection Agency, Indicator development for Estuaries. 138pp. EPA, Washington, DC
- Flores Muñoz, P., Muñoz Escobar, L., & Sánchez Acalo, T. (2019). Estudio De Potencia De Pruebas De Normalidad Usando Distribuciones Desconocidas Con Distintos Niveles De No Normalidad. *Perfiles*, 1(21), 4–11. <https://doi.org/10.47187/perf.v1i21.42>
- Finlayson, C.M., D’Cruz, R. (2005). Inland water systems. In: Millennium Ecosystem Assessment, Conditions and Trends, Island Press, Washington, DC, 68 pp.
- García, M., Ramírez, I., Verlaan , M., & Castillo , J. (2015). Application of a three-dimensional hydrodynamic model for San Quintin Bay, B.C., Mexico. Validation and calibration using OpenDA. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 273, 428-437.
- Gallopín, G.C. (1994), Impoverishment and Sustainable Development. A Systems Approach. International Institute for Sustainable Development; Winnipeg, Canada.
- Gallopín, G. (2003). Medio Ambiente y Desarrollo. In *Revista Desarrollo y Sociedad* (Issue 64). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5763/S033120_es.pdf?sequence=1
- Gallopín, G. C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 16(3), 293–303. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004.
- Gentile, J. H., Harwell, M. A., Cropper Jr., W., Harwell, C. C., DeAngelis, D., Davis, S., Ogden, J. C., & Lirman, D. (2001). Ecological conceptual models: framework and case study on ecosystem management for South Florida sustainability. *Science of the Total Environment* 274, 231–253. doi: 10.1016/S0048-9697(01)00746-X.
- Gómez, A. G., Juanes, J. A., Ondiviela, B., & Revilla, J. A. (2014). Assessment of susceptibility to pollution in littoral waters using the concept of recovery time. *Marine Pollution Bulletin*, 81, 140–148. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.02.004.

Gumbell , Statistics of extremes . New York : Columbia University , Dover edition , 2004 . D. Koutsoyiannis , " Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall : I Theoretical investigation " . Hydrological Sciences Journal - des Sciences Hydrologiques , 2004 , pp . 575-590 .

Heredia, L. M. C., Escobar, Y. C., & Escobar, Y. C. (2012). CLUSTER ANALYSIS AS A TECHNIQUE FOR EXPLORATORY ANALYSIS OF MULTIPLE RECORDS ON WEATHER DATA Lina.

Hertwich, E. G., Salem, J., Sonnemann, G., & der Voet, van. (2010). Assessing the Environmental Impacts of Consumption and Production. 112pp. A Report of the Working Group on the Environmental Impacts of Products and Materials to the International Panel for Sustainable Resource Management. Obtenido de: http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1262xPAPriorityProductsAndMaterials_Report.pdf.

Huser, B. J., Egemose, S., Harper, H., Hupfer, M., Jensen, H., Pilgrim, K. M., ... Futter, M. (2016). Longevity and effectiveness of aluminum addition to reduce sediment phosphorus release and restore lake water quality. *Water Research*, 97, 122– 132. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.051>.

Kadlec, R.H., Knight, R.L., 1996. Treatment Wetlands. Lewis Publishers CRC, New York, 893 pp.

Kondratyev, S., Gronskaya, T., Ignatieva, N., Blinova, I., Telesh, I., & Yefremova, L. (2002). Assessment of present state of water resources of Lake Ladoga and its drainage basin using Sustainable Development indicators. *Ecological Indicators*, 2(1), 79–92. [https://doi.org/10.1016/S1470-160X\(02\)00049-3](https://doi.org/10.1016/S1470-160X(02)00049-3)

Ledesma, C., Bonansea, M., Rodriguez, C. M., & Sánchez, R. (2013). Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina). *Revista Ciência Agrônômica*, Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 44, 419-425.

- Liang, Y., Zhu, H., Bañuelos, G., Yan, B., Zhou, Q., Yu, X., & Cheng, X. (2017). Constructed wetlands for saline wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, 98, 275–285. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.11.005.
- Luek, A., & Rasmussen, J. (2017). Chemical, Physical, and Biological Factors Shape Littoral Invertebrate Community in Coal-Mining End-Pit Lakes. *Environmental Management*, 652-664.
- Machado, A. I., Beretta, M., Fragoso, R., & Duarte, E. (2017). Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 187, 560–570. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.11.015.
- Maine, M. A., Hadad, H. R., Sánchez, G. C., Di Luca, G. A., Mufarrege, M. M., Caffaratti, S. E., & Pedro, M. C. (2017). Long-term performance of two free-water surface wetlands for metallurgical effluent treatment. *Ecological Engineering*, 98, 372–377. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.07.005>.
- Martínez, R., Zambrano, E., Nieto López, J. J., Hernández, J., & Costa, F. (2017). Evolución, vulnerabilidad e impactos económicos y sociales de El Niño 2015-2016 en América Latina. *Investigaciones Geográficas*, 68, 65. <https://doi.org/10.14198/ingeo2017.68.04>
- Matamoros, V., Nguyen, L. X. Arias, C. A., Salvadó, V., & Brix, H. (2012). Evaluation of aquatic plants for removing polar microcontaminants: A microcosm experiment, *Chemosphere*, 88(10), 1257-1264, doi: 10.1016/j.chemosphere.2012.04.004.
- Missaghi, S., & Hondzo, M. (2010). Evaluation and application of a three-dimensional water quality model in a shallow lake with complex morphometry. *Ecological Modelling*, 221, 1512-1525.
- Naciones unidas. Agenda 21: Programa de acción para el desarrollo sustentable, conferencia de las naciones unidas sobre el medio ambiente y el desarrollo, Rio de Janeiro, cap. 18 3-14 junio, 1992
- Newton, A., Icely, J., Cristina, S., Brito, A., Cardoso, A. C., Colijn, F., Zaldívar, J.M. (2014). An overview of ecological status, vulnerability and future perspectives of European large

- shallow, semi-enclosed coastal systems, lagoons and transitional waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 140, 95–122. doi: 10.1016/j.ecss.2013.05.023.
- Nivala, J., Wallace, S., Headley, T., Kassa, K., Brix, H., van Afferden, M., & Müller, R. (2013). Oxygen transfer and consumption in subsurface flow treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 61, 544–554. doi: doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.08.028.
- Oliveira, A., Fortunato, A.B., & Rego, J.R.L. (2006). Effect of morphological changes on the hydrodynamics and flushing properties of the Óbidos lagoon (Portugal). *Continental Shelf Research*, 26: 917-942. doi: 10.1016/j.csr.2006.02.011.
- OECD. (1993). *OECD Environmental Indicators. Development, Measurement and Use. Reference paper*. 37pp.
- Ortega, M., Pendás, L. C. T., Ortega, M. M., & Abreu, A. P. (2009). El coeficiente de correlacion de los rangos de spearman caracterizacion. *Revista Habanera de Ciencias Médicas.*, 8.
- Organization for Economic Cooperation and Development, OECD. (1982). *Eutrophication of Waters. Monitoring, Assesment and Control. Francia : Cooperative Progremmers on Monitoring of Inland Waters, Enviromental Directorate, OECD.*
- Otsu, T., & Taniguchi, G. (2020). Kolmogorov–Smirnov type test for generated variables. *Economics Letters*, 195, 109401. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2020.109401>
- Perico, N., Caro, C., Acosta, P., & Bohórquez, J. (2015). Páramo de Siscunsi, en la cuenca alta de la Martinera. *Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería ACOFI*, 8. <https://www.acofipapers.org/index.php/eiei2015/2015/paper/viewFile/1404/510>
- Romero, M. (2016). Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal. *Revista Enfermería Del Trabajo*, 3, 105–114. file:///C:/Users/HP_1080P_HD/Downloads/Dialnet-PruebasDeBondadDeAjusteAUnaDistribucionNormal-5633043.pdf
- SAMBONI, CARVAJAL & ESCOBAR, Natalia, Yesid & Juan. Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Revista ingeniería e investigación* VOL. 27 No.3, Diciembre, 2007. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/18917/1/14858-44740-1-PB.pdf>

- S. Chavoshi , W.N. Azmin . " Development of L - Moment based models for extreme flood events " . *Malaysian Journal of Mathematical Sciences* , vol . 3 , pp . 281-296 , 2009
- Smolders, S., Plancke, Y., Ides, S., Meire, P., & Temmerman, S. (2015). Role of intertidal wetlands for tidal and storm tide attenuation along a confined estuary: a model study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 15, 1659–1675. doi: 10.5194/nhess-15- 1659-2015
- Paturi, S., Boegman, L., & Rao, Y. (2012). Hydrodynamics of eastern Lake Ontario and the upper St. Lawrence River. *Journal of Great Lakes Research*, 38, 194-204.
- Sumner, D. M., & Belaine, G. (2005). Evaporation, precipitation, and associated salinity changes at a humid, subtropical estuary. *Estuaries*, 28(6), 844–855. <https://doi.org/10.1007/BF02696014>
- Torres, A. H., & Acevedo, E. H. (2008). El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los valles de Lluta y Azapa en el Norte de Chile. *Idesia*, 26(3), 31–44. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292008000300004>
- Usaquén Perilla, O. L., Gómez, A. G., Gómez, A. G., Díaz, C. Á., & Cortezón, J. A. R. (2012). Methodology to assess sustainable management of water resources in coastal lagoons with agricultural uses: An application to the Albufera lagoon of Valencia (Eastern Spain). *Ecological Indicators*, 13(1), 129–143. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.05.019>
- Usaquén Perilla, O. L. (2017). Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas [Universidad de Cantabria]. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/11538>
- Usaquén Perilla, O., García Gómez, A., García Gómez, A., García Alba, J., & Díaz Gómez, J., (2020). Valoración de la susceptibilidad a efectos de salinización, déficit hídrico y eutrofización en el lago Sochagota (Boyacá, Colombia). En: Mejía Ávila, D., Soto Barrera, V. & Torres Bejarano, F., (Eds.), *Investigación para la Sostenibilidad Ambiental*. Red Internacional para la Sostenibilidad Ambiental - RISA (pp. 11-36). 1ª ed. [online] Montería: Universidad de Córdoba, p.226. Disponible en: [Consultado dd - mes - año].

- Verhoeven, J. T. A., Arheimer, B., Yin, C., & Hefting, M. M. (2006). Regional and global concerns over wetlands and water quality. *Trends in Ecology and Evolution* 21 (2), (2), 96–103. doi: 10.1016/j.tree.2005.11.015.
- Zhang, C., Gao, X. P., Wang, L. Y., & Chen, Y. (2013). Analysis of agricultural pollution by flood flow impact on water quality in a reservoir using a three dimensional water quality modeling. *Journal Hydroinf*, 15, 1061-1072.
- Zhang, C., Huang, Y. X., Javed, A., & Arhonditsis, G. B. (2019). An ensemble modeling framework to study the effects of climate change on the trophic state of shallow reservoirs. *Sci Total Environ*, 697, 134078.

8. ANEXOS

8.1. Anexo A, Calculo de los descriptores estratégicos para los escenarios planteados en el capítulo 5.

Tabla 8.1

Descriptorios estratégicos – Renovación esc. actual.

	Renovación Esc.Actual																							
	Concentración de Trazadores (ppb)								Indice Pontencial de Renovación (%)								Susceptibilidad a Eutrofización							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5	LP6	LP7	LP8	S.P1	S.P2	S.P3	S.P4	S.P5	S.P6	S.P7	S.P8
1/10/2016	6.630	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63																
2/10/2016	0.370514	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	94.41	0.10	0.11	0.10	0.10	0.11	0.10	0.10	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
3/10/2016	0.0298259	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	91.95	0.10	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
4/10/2016	0.00214469	6.61	6.61	6.60	6.61	6.61	6.61	6.61	92.81	0.12	0.10	0.19	0.10	0.10	0.10	0.10	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
5/10/2016	0.000130018	6.59	6.60	6.53	6.60	6.60	6.60	6.60	93.94	0.25	0.10	1.12	0.21	0.12	0.10	0.10	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
6/10/2016	6.25E-06	6.56	6.58	6.34	6.55	6.59	6.60	6.60	95.19	0.49	0.32	2.87	0.67	0.24	0.11	0.11	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
7/10/2016	3.98E-05	6.50	6.51	6.16	6.47	6.55	6.58	6.59	-537.03	0.88	1.07	2.87	1.24	0.49	0.17	0.16	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
8/10/2016	1.39E-06	6.41	6.46	5.99	6.36	6.50	6.57	6.57	96.51	1.37	0.78	2.77	1.72	0.88	0.29	0.24	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
9/10/2016	3.56E-08	6.29	6.36	5.86	6.27	6.41	6.54	6.55	97.45	1.99	1.58	2.23	1.39	1.28	0.43	0.39	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
10/10/2016	6.42E-10	6.13	6.26	5.72	6.19	6.31	6.49	6.50	98.19	2.41	1.59	2.39	1.29	1.67	0.70	0.64	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
11/10/2016	1.11E-11	5.97	6.07	5.56	6.10	6.18	6.42	6.44	98.27	2.65	2.89	2.71	1.40	1.93	1.04	0.92	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
12/10/2016	3.62E-13	5.81	5.85	5.40	6.02	6.06	6.33	6.36	96.74	2.75	3.64	2.82	1.42	2.05	1.45	1.34	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
13/10/2016	4.79E-14	5.68	5.81	5.17	5.84	5.94	6.20	6.24	86.78	2.18	0.81	4.40	2.99	1.93	2.03	1.76	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
14/10/2016	6.43E-15	5.51	5.49	4.95	5.64	5.81	6.02	6.14	86.58	2.95	5.37	4.28	3.33	2.27	3.01	1.75	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
15/10/2016	2.82E-17	5.25	4.99	4.70	5.44	5.62	5.87	6.05	99.56	4.79	9.22	4.99	3.58	3.18	2.45	1.44	Baja	Moderada	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
16/10/2016	5.60E-20	4.96	4.67	4.53	5.28	5.40	5.75	5.92	99.80	5.47	6.39	3.49	2.95	3.90	2.03	2.07	Baja	Moderada	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
17/10/2016	8.27E-20	4.77	4.86	4.25	5.03	5.19	5.59	5.71	-47.59	3.97	-4.10	6.17	4.66	3.94	2.78	3.65	Muy Alta	Moderada	Muy Alta	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
18/10/2016	9.07E-19	4.62	4.91	4.10	4.87	4.99	5.41	5.50	-996.52	3.11	-1.01	3.53	3.17	3.86	3.28	3.67	Muy Alta	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
19/10/2016	7.60E-18	4.46	4.69	4.02	4.76	4.79	5.22	5.31	-738.21	3.47	4.39	2.16	2.29	3.89	3.51	3.36	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
20/10/2016	2.61E-16	4.32	4.13	4.08	4.72	4.63	5.11	5.18	-3334.21	3.16	11.99	-1.61	0.81	3.41	2.07	2.42	Muy Alta	Moderada	Baja	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
21/10/2016	7.60E-11	4.23	4.03	4.04	4.65	4.51	5.00	5.02	-29121051.42	2.03	2.36	1.03	1.62	2.67	2.07	3.09	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
22/10/2016	2.67E-09	4.24	4.10	3.93	4.47	4.44	4.88	4.88	-3405.65	-0.23	-1.74	2.70	3.80	1.54	2.42	2.83	Muy Alta	Moderada	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
23/10/2016	3.42E-11	4.23	4.01	3.94	4.37	4.39	4.77	4.77	98.72	0.16	2.39	-0.29	2.35	1.19	2.33	2.27	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
24/10/2016	5.15E-13	4.17	3.80	3.97	4.34	4.33	4.68	4.68	98.49	1.33	5.05	-0.78	0.68	1.18	1.95	1.80	Baja	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
25/10/2016	2.46E-14	4.09	3.72	3.99	4.31	4.30	4.62	4.63	95.23	1.98	2.08	-0.42	0.66	0.69	1.25	1.18	Baja	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
26/10/2016	2.10E-12	3.97	3.69	3.95	4.25	4.23	4.57	4.55	-8467.98	2.89	0.99	1.01	1.38	1.64	1.02	1.80	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
27/10/2016	1.71E-14	3.89	3.70	3.76	4.10	4.12	4.50	4.49	99.19	2.18	-0.34	4.62	3.56	2.66	1.50	1.19	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
28/10/2016	1.33E-12	3.85	3.77	3.58	3.97	4.04	4.40	4.40	-7631.76	0.83	-1.84	4.89	3.10	2.08	2.15	2.09	Muy Alta	Moderada	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
29/10/2016	1.87E-13	3.80	3.57	3.56	3.94	3.98	4.32	4.32	85.87	1.35	5.36	0.53	0.86	1.28	1.96	1.71	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
30/10/2016	4.64E-17	3.69	3.38	3.62	3.91	3.92	4.27	4.24	99.98	2.87	5.33	-1.59	0.62	1.54	1.23	1.80	Baja	Moderada	Moderada	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
31/10/2016	3.15E-20	3.55	3.46	3.36	3.74	3.82	4.18	4.18	99.93	3.89	-2.48	7.03	4.25	2.74	2.03	1.59	Baja	Moderada	Muy Alta	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada

Fuente: Autor.

Tabla 8.2

Descriptorios estratégicos – Salinización esc. actual.

	Salinización Esc. Actual																							
	Concentración de Trazadores (ppb)								Índice Pontencial de Salinización (%)								Susceptibilidad a Salinización							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5	LP6	LP7	LP8	S.P1	S.P2	S.P3	S.P4	S.P5	S.P6	S.P7	S.P8
1/10/2016	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	145.56	145.56	145.56	145.56	145.56	145.56	145.56	145.56	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
2/10/2016	3.31	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	22.50	145.32	145.29	145.32	145.32	145.32	145.32	145.32	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
3/10/2016	3.12	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	15.46	145.08	145.03	145.08	145.08	145.08	145.08	145.08	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
4/10/2016	11.40	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	322.16	144.82	144.78	144.74	144.84	144.84	144.85	144.85	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
5/10/2016	13.85	6.60	6.60	6.57	6.60	6.60	6.60	6.60	413.13	144.42	144.55	143.36	144.48	144.59	144.62	144.63	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
6/10/2016	5.33	6.58	6.59	6.48	6.58	6.59	6.60	6.60	97.28	143.74	144.08	140.03	143.59	144.20	144.37	144.38	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
7/10/2016	3.18	6.55	6.55	6.47	6.54	6.58	6.59	6.59	17.62	142.76	142.76	139.73	142.38	143.53	144.05	144.07	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
8/10/2016	3.10	6.53	6.54	6.59	6.54	6.55	6.58	6.58	14.90	142.02	142.08	144.17	142.14	142.64	143.62	143.69	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
9/10/2016	12.14	6.55	6.53	6.71	6.58	6.54	6.56	6.57	349.60	142.44	141.89	148.64	143.62	142.09	143.07	143.18	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
10/10/2016	4.71	6.58	6.57	6.67	6.60	6.55	6.55	6.55	74.40	143.66	143.36	147.05	144.61	142.48	142.47	142.55	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
11/10/2016	12.42	6.59	6.62	6.54	6.58	6.57	6.54	6.54	359.84	143.93	145.15	142.19	143.85	143.28	142.12	142.11	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
12/10/2016	4.49	6.57	6.59	6.55	6.55	6.57	6.54	6.54	66.21	143.46	144.22	142.68	142.67	143.40	142.17	142.08	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
13/10/2016	3.11	6.57	6.54	6.62	6.56	6.56	6.54	6.54	15.13	143.51	142.30	145.24	142.88	143.04	142.37	142.29	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
14/10/2016	3.10	6.59	6.55	6.74	6.58	6.56	6.55	6.54	14.80	144.18	142.75	149.51	143.88	142.92	142.57	142.34	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
15/10/2016	3.10	6.63	6.66	6.72	6.63	6.58	6.55	6.54	14.80	145.68	146.49	148.86	145.49	143.61	142.58	142.21	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
16/10/2016	12.97	6.56	6.75	6.50	6.60	6.60	6.56	6.54	380.29	142.82	149.90	140.65	144.41	144.30	142.82	142.29	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
17/10/2016	14.00	6.43	6.66	6.30	6.54	6.56	6.57	6.56	418.43	138.25	146.66	133.33	142.12	142.87	143.17	142.82	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
18/10/2016	14.00	6.36	6.54	6.25	6.46	6.49	6.56	6.56	418.46	135.49	142.36	131.50	139.27	140.27	142.89	143.01	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
19/10/2016	14.00	6.37	6.41	6.57	6.45	6.42	6.53	6.54	418.46	135.99	137.25	143.31	138.97	137.95	141.70	142.30	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
20/10/2016	14.00	6.50	6.37	6.89	6.54	6.41	6.50	6.51	418.45	140.86	135.84	155.02	142.36	137.55	140.67	141.26	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
21/10/2016	14.00	6.71	6.57	7.07	6.63	6.49	6.47	6.48	418.43	148.69	143.22	161.72	145.65	140.41	139.79	139.91	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
22/10/2016	14.00	6.83	6.76	7.22	6.73	6.61	6.46	6.46	418.44	152.78	150.26	167.55	149.25	144.69	139.41	139.27	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
23/10/2016	4.87	6.90	6.98	7.26	6.81	6.70	6.48	6.47	80.34	155.48	158.45	168.76	152.25	148.31	139.93	139.72	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
24/10/2016	3.12	6.99	7.28	7.28	6.84	6.78	6.51	6.50	15.64	159.03	169.56	169.49	153.29	151.15	141.03	140.76	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
25/10/2016	3.10	7.11	7.45	7.28	6.87	6.83	6.53	6.53	14.81	163.44	176.06	169.75	154.28	152.80	141.99	141.85	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
26/10/2016	3.10	7.21	7.56	7.27	6.92	6.91	6.56	6.58	14.80	166.86	179.94	169.40	156.24	156.06	142.95	143.86	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
27/10/2016	3.10	7.12	7.55	7.27	7.04	7.01	6.61	6.62	14.81	163.78	179.73	169.42	160.89	159.46	144.77	145.13	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
28/10/2016	3.10	7.00	7.42	7.11	7.10	7.00	6.69	6.70	14.80	159.41	174.71	163.41	162.87	159.35	147.74	148.08	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
29/10/2016	3.10	6.94	7.27	6.90	7.02	6.97	6.76	6.76	14.81	157.08	169.44	155.66	159.85	157.97	150.22	150.39	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
30/10/2016	3.10	6.84	7.01	6.82	6.94	6.92	6.79	6.82	14.81	153.50	159.61	152.71	156.94	156.35	151.39	152.56	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
31/10/2016	13.15	6.68	6.93	6.66	6.90	6.86	6.82	6.83	387.00	147.36	156.78	146.64	155.46	154.18	152.45	152.92	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta

Fuente: Autor.

Tabla 8.3

Descriptorios estratégicos – Déficit hídrico esc. actual.

	Déficit Hídrico Esc. Actual																							9.
	Concentración de Trazadores (ppb)								Índice Pontencial de Déficit (%)								Susceptibilidad a Déficit Hídrico							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5	LP6	LP7	LP8	S.P1	S.P2	S.P3	S.P4	S.P5	S.P6	S.P7	
1/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
2/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
3/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
4/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
5/10/2016	1.46	1.92	1.87	2.36	2.37	1.82	1.64	1.23	29.26	20.98	21.29	16.37	15.98	22.05	25.16	36.15	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
6/10/2016	1.46	1.92	1.87	2.36	2.37	1.82	1.64	1.23	29.26	20.98	21.29	16.37	15.98	22.05	25.16	36.15	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
7/10/2016	1.46	1.92	1.87	2.36	2.37	1.82	1.64	1.23	29.26	20.98	21.29	16.37	15.98	22.05	25.16	36.15	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
8/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
9/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
10/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
11/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
12/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
13/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
14/10/2016	1.38	1.83	1.78	2.27	2.28	1.73	1.55	1.14	22.18	15.32	15.45	11.94	11.57	16.01	18.29	26.15	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
15/10/2016	1.24	1.70	1.65	2.14	2.15	1.60	1.42	1.01	9.80	7.14	7.01	5.53	5.19	7.29	8.37	11.70	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
16/10/2016	1.17	1.63	1.58	2.07	2.08	1.53	1.35	0.94	3.60	2.74	2.46	2.08	1.76	2.59	3.03	3.93	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
17/10/2016	1.18	1.63	1.58	2.07	2.08	1.53	1.35	0.94	4.49	2.74	2.46	2.08	1.76	2.59	3.03	3.93	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
18/10/2016	1.17	1.63	1.58	2.07	2.08	1.53	1.35	0.94	3.60	2.74	2.46	2.08	1.76	2.59	3.03	3.93	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
19/10/2016	1.17	1.62	1.57	2.06	2.07	1.52	1.34	0.93	3.60	2.11	1.81	1.59	1.27	1.92	2.26	2.82	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
20/10/2016	1.17	1.63	1.58	2.07	2.08	1.53	1.35	0.94	3.60	2.74	2.46	2.08	1.76	2.59	3.03	3.93	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
21/10/2016	1.16	1.62	1.57	2.06	2.07	1.52	1.34	0.93	2.72	2.11	1.81	1.59	1.27	1.92	2.26	2.82	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
22/10/2016	1.14	1.60	1.55	2.04	2.05	1.50	1.32	0.91	0.95	0.85	0.51	0.61	0.29	0.58	0.74	0.59	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
23/10/2016	1.17	1.63	1.58	2.07	2.08	1.53	1.35	0.94	3.60	2.74	2.46	2.08	1.76	2.59	3.03	3.93	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
24/10/2016	1.19	1.65	1.60	2.09	2.10	1.55	1.37	0.96	5.37	4.00	3.76	3.07	2.74	3.93	4.55	6.15	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Baja
25/10/2016	1.21	1.67	1.62	2.11	2.12	1.57	1.39	0.98	7.14	5.26	5.06	4.05	3.72	5.28	6.08	8.37	Baja	Baja	Baja	Moderada	Moderada	Baja	Baja	Baja
26/10/2016	1.24	1.70	1.65	2.14	2.15	1.60	1.42	1.01	9.80	7.14	7.01	5.53	5.19	7.29	8.37	11.70	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
27/10/2016	1.28	1.74	1.69	2.18	2.19	1.64	1.46	1.05	13.34	9.66	9.61	7.50	7.16	9.97	11.42	16.15	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
28/10/2016	1.25	1.71	1.66	2.15	2.16	1.61	1.43	1.02	10.68	7.77	7.66	6.02	5.68	7.96	9.13	12.82	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
29/10/2016	1.23	1.68	1.63	2.12	2.13	1.58	1.40	0.99	8.91	5.89	5.71	4.55	4.21	5.95	6.84	9.48	Baja	Baja	Baja	Baja	Moderada	Baja	Baja	Baja
30/10/2016	1.28	1.73	1.68	2.17	2.18	1.63	1.45	1.04	13.34	9.03	8.96	7.01	6.67	9.30	10.66	15.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
31/10/2016	1.31	1.77	1.72	2.21	2.22	1.67	1.49	1.08	15.99	11.55	11.55	8.98	8.63	11.99	13.71	19.48	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja

Fuente: Autor.

Tabla 8.4

Descriptorios estratégicos – Renovación esc. I.

	Renovación Esc.1																							
	Concentración de Trazadores (ppb)								Índice Pontencial de Renovación (%)								Susceptibilidad a Eutrofización							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5	LP6	LP7	LP8	S.P1	S.P2	S.P3	S.P4	S.P5	S.P6	S.P7	S.P8
1/10/2016	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63																
2/10/2016	3.31	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	50.11	0.10	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
3/10/2016	3.12	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	5.74	0.10	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
4/10/2016	11.40	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	-265.62	0.10	0.10	0.14	0.10	0.10	0.10	0.10	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
5/10/2016	13.85	6.60	6.60	6.57	6.60	6.60	6.60	6.60	-21.55	0.16	0.09	0.57	0.14	0.10	0.09	0.09	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
6/10/2016	5.33	6.58	6.59	6.48	6.58	6.59	6.60	6.60	61.55	0.28	0.20	1.37	0.37	0.16	0.11	0.10	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
7/10/2016	3.18	6.55	6.55	6.47	6.54	6.57	6.59	6.59	40.38	0.40	0.54	0.13	0.50	0.27	0.13	0.13	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
8/10/2016	3.10	6.53	6.54	6.59	6.54	6.55	6.58	6.58	2.31	0.31	0.28	-1.85	0.10	0.37	0.18	0.16	Moderada	Moderada	Moderada	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
9/10/2016	12.14	6.55	6.53	6.71	6.58	6.54	6.56	6.57	-291.29	-0.17	0.08	-1.83	-0.61	0.23	0.22	0.21	Muy Alta	Moderada	Moderada	Muy Alta	Alta	Moderada	Moderada	Moderada
10/10/2016	4.71	6.58	6.57	6.67	6.60	6.55	6.55	6.55	61.21	-0.51	-0.61	0.64	-0.40	-0.16	0.25	0.26	Baja	Alta	Alta	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada
11/10/2016	12.42	6.59	6.62	6.54	6.58	6.57	6.54	6.54	-163.67	-0.11	-0.73	1.97	0.31	-0.33	0.15	0.18	Muy Alta	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
12/10/2016	4.49	6.57	6.59	6.55	6.55	6.57	6.54	6.54	63.86	0.19	0.38	-0.20	0.49	-0.05	-0.02	0.01	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
13/10/2016	3.11	6.57	6.54	6.62	6.56	6.56	6.54	6.54	30.73	-0.02	0.79	-1.05	-0.09	0.15	-0.08	-0.08	Baja	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
14/10/2016	3.10	6.59	6.55	6.71	6.58	6.56	6.54	6.54	0.29	-0.22	-0.15	-1.41	-0.28	0.04	0.01	-0.01	Moderada	Moderada	Moderada	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
15/10/2016	3.10	6.62	6.63	6.70	6.60	6.57	6.54	6.54	0.00	-0.46	-1.24	0.21	-0.32	-0.18	0.04	0.04	Moderada	Alta	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
16/10/2016	12.47	6.58	6.72	6.56	6.58	6.58	6.54	6.54	-302.29	0.57	-1.39	2.07	0.19	-0.19	-0.02	0.02	Muy Alta	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
17/10/2016	13.98	6.51	6.67	6.42	6.56	6.57	6.55	6.54	-12.11	1.15	0.80	2.09	0.43	0.27	-0.11	-0.08	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
18/10/2016	14.00	6.44	6.58	6.30	6.50	6.53	6.55	6.55	-0.13	0.98	1.41	1.95	0.81	0.59	-0.03	-0.08	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
19/10/2016	14.00	6.41	6.45	6.38	6.46	6.48	6.54	6.54	0.00	0.54	1.91	-1.23	0.70	0.71	0.19	0.08	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
20/10/2016	14.00	6.45	6.32	6.61	6.48	6.45	6.52	6.53	0.00	-0.60	2.09	-3.58	-0.41	0.51	0.25	0.21	Moderada	Alta	Moderada	Muy Alta	Alta	Moderada	Moderada	Moderada
21/10/2016	14.00	6.58	6.39	6.78	6.53	6.46	6.50	6.51	0.01	-2.03	-1.20	-2.58	-0.79	-0.22	0.30	0.35	Moderada	Muy Alta	Alta	Muy Alta	Alta	Moderada	Moderada	Moderada
22/10/2016	14.00	6.67	6.55	6.93	6.59	6.52	6.48	6.48	0.00	-1.40	-2.48	-2.22	-0.91	-0.92	0.27	0.34	Moderada	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Alta	Alta	Moderada	Moderada
23/10/2016	5.74	6.72	6.74	6.99	6.66	6.58	6.48	6.48	58.96	-0.84	-2.90	-0.89	-0.94	-0.93	0.08	0.13	Baja	Alta	Muy Alta	Alta	Alta	Alta	Moderada	Moderada
24/10/2016	3.28	6.80	6.99	7.02	6.69	6.64	6.49	6.48	42.97	-1.08	-3.65	-0.49	-0.45	-0.83	-0.10	-0.07	Baja	Alta	Muy Alta	Alta	Alta	Alta	Moderada	Moderada
25/10/2016	3.11	6.89	7.15	7.04	6.71	6.67	6.50	6.49	4.97	-1.36	-2.30	-0.28	-0.35	-0.54	-0.15	-0.16	Moderada	Alta	Muy Alta	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Moderada
26/10/2016	3.10	7.01	7.25	7.07	6.75	6.73	6.51	6.52	0.42	-1.77	-1.44	-0.40	-0.58	-0.92	-0.17	-0.45	Moderada	Muy Alta	Muy Alta	Alta	Alta	Alta	Moderada	Alta
27/10/2016	3.10	7.05	7.29	7.15	6.85	6.83	6.53	6.54	0.02	-0.54	-0.50	-1.13	-1.54	-1.46	-0.40	-0.26	Moderada	Alta	Alta	Alta	Muy Alta	Muy Alta	Alta	Moderada
28/10/2016	3.10	6.99	7.25	7.11	6.94	6.88	6.59	6.58	0.00	0.91	0.51	0.59	-1.31	-0.72	-0.83	-0.73	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Alta	Alta	Alta
29/10/2016	3.10	6.93	7.24	6.93	6.91	6.89	6.64	6.63	-0.01	0.84	0.08	2.49	0.50	-0.06	-0.80	-0.72	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Alta
30/10/2016	3.10	6.85	7.09	6.83	6.85	6.86	6.67	6.68	0.00	1.11	2.07	1.44	0.79	0.31	-0.42	-0.81	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Alta
31/10/2016	12.79	6.71	6.99	6.73	6.86	6.83	6.71	6.71	-312.59	2.02	1.52	1.45	-0.07	0.56	-0.64	-0.40	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Alta

Fuente: Autor.

Tabla 8.5

Descriptorios estratégicos – Salinización esc. 1.

	Salinización Esc. 1																							
	Concentración de Trazadores (ppb)								Índice Pontencial de Salinización (%)								Susceptibilidad a Salinización							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5	LP6	LP7	LP8	S.P1	S.P2	S.P3	S.P4	S.P5	S.P6	S.P7	S.P8
1/10/2016	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	145.56	145.56	145.56	145.56	145.56	145.56	145.56	145.56	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
2/10/2016	3.31	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	22.50	145.32	145.29	145.32	145.32	145.32	145.32	145.32	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
3/10/2016	3.12	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	15.46	145.08	145.03	145.08	145.08	145.08	145.08	145.08	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
4/10/2016	11.40	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	322.16	144.82	144.78	144.74	144.84	144.84	144.85	144.85	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
5/10/2016	13.85	6.60	6.60	6.57	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	413.13	144.42	144.55	143.36	144.48	144.59	144.62	144.63	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
6/10/2016	5.33	6.58	6.59	6.48	6.58	6.59	6.60	6.60	6.60	97.28	143.74	144.08	140.03	143.59	144.20	144.37	144.38	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
7/10/2016	3.18	6.55	6.55	6.47	6.54	6.58	6.59	6.59	6.59	17.62	142.76	142.76	139.73	142.38	143.53	144.05	144.07	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
8/10/2016	3.10	6.53	6.54	6.59	6.54	6.55	6.58	6.58	6.58	14.90	142.02	142.08	144.17	142.14	142.64	143.62	143.69	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
9/10/2016	12.14	6.55	6.53	6.71	6.58	6.54	6.56	6.57	6.57	349.60	142.44	141.89	148.64	143.62	142.09	143.07	143.18	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
10/10/2016	4.71	6.58	6.57	6.67	6.60	6.55	6.55	6.55	6.55	74.40	143.66	143.36	147.05	144.61	142.48	142.47	142.55	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
11/10/2016	12.42	6.59	6.62	6.54	6.58	6.57	6.54	6.54	6.54	359.84	143.93	145.15	142.19	143.85	143.28	142.12	142.11	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
12/10/2016	4.49	6.57	6.59	6.55	6.55	6.57	6.54	6.54	6.54	66.21	143.46	144.22	142.68	142.67	143.40	142.17	142.08	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
13/10/2016	3.11	6.57	6.54	6.62	6.56	6.56	6.54	6.54	6.54	15.13	143.51	142.30	145.24	142.88	143.04	142.37	142.29	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
14/10/2016	3.10	6.59	6.55	6.71	6.58	6.56	6.54	6.54	6.54	14.80	144.05	142.66	148.69	143.56	142.95	142.35	142.32	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
15/10/2016	3.10	6.62	6.63	6.70	6.60	6.57	6.54	6.54	6.54	14.80	145.17	145.66	148.18	144.34	143.40	142.25	142.22	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
16/10/2016	12.47	6.58	6.73	6.56	6.58	6.58	6.54	6.54	6.54	361.83	143.78	149.08	143.05	143.88	143.86	142.29	142.17	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
17/10/2016	13.98	6.51	6.67	6.43	6.56	6.57	6.55	6.54	6.54	417.76	140.99	147.09	137.96	142.82	143.20	142.57	142.37	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
18/10/2016	14.00	6.44	6.58	6.30	6.50	6.53	6.55	6.55	6.55	418.41	138.62	143.60	133.32	140.85	141.77	142.64	142.57	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
19/10/2016	14.00	6.41	6.45	6.38	6.46	6.48	6.54	6.54	6.54	418.42	137.32	138.95	136.19	139.17	140.06	142.19	142.38	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
20/10/2016	14.00	6.45	6.32	6.61	6.48	6.45	6.52	6.53	6.53	418.41	138.75	133.95	144.65	140.16	138.84	141.57	141.86	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
21/10/2016	14.00	6.58	6.39	6.78	6.54	6.46	6.50	6.51	6.51	418.38	143.59	136.76	150.96	142.05	139.36	140.86	141.02	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
22/10/2016	14.00	6.67	6.55	6.93	6.59	6.52	6.49	6.49	6.49	418.38	147.01	142.64	156.52	144.24	141.56	140.22	140.21	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
23/10/2016	5.74	6.73	6.74	6.99	6.66	6.58	6.48	6.48	6.48	112.73	149.08	149.69	158.80	146.53	143.82	140.02	139.90	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
24/10/2016	3.28	6.80	6.99	7.02	6.69	6.64	6.49	6.48	6.48	21.33	151.77	158.81	160.06	147.64	145.84	140.27	140.06	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
25/10/2016	3.11	6.89	7.15	7.04	6.71	6.67	6.50	6.49	6.49	15.30	155.21	164.75	160.80	148.52	147.17	140.62	140.44	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
26/10/2016	3.10	7.01	7.25	7.07	6.75	6.74	6.51	6.52	6.52	14.82	159.73	168.55	161.85	149.96	149.46	141.04	141.52	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
27/10/2016	3.10	7.05	7.29	7.15	6.85	6.83	6.53	6.54	6.54	14.79	161.13	169.91	164.80	153.80	153.09	142.01	142.14	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
28/10/2016	3.10	6.99	7.25	7.11	6.94	6.88	6.59	6.59	6.59	14.80	158.76	168.53	163.24	157.12	154.91	144.03	143.90	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
29/10/2016	3.10	6.93	7.24	6.93	6.91	6.89	6.64	6.63	6.63	14.80	156.59	168.31	156.69	155.83	155.09	145.99	145.65	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
30/10/2016	3.10	6.85	7.09	6.83	6.85	6.87	6.67	6.69	6.69	14.80	153.73	162.74	152.98	153.81	154.30	147.03	147.63	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
31/10/2016	12.79	6.71	6.99	6.73	6.86	6.83	6.71	6.71	6.71	373.67	148.61	158.76	149.33	153.98	152.87	148.61	148.64	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta

Fuente: Autor.

Tabla 8.6

Descriptorios estratégicos – Déficit hídrico esc. 1.

	Déficit Hídrico Esc. 1																							
	Concentración de Trazadores (ppb)							Índice Potencial de Déficit (%)								Susceptibilidad a Déficit Hídrico								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5	LP6	LP7	LP8	S.P1	S.P2	S.P3	S.P4	S.P5	S.P6	S.P7	S.P8
1/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
2/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
3/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
4/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
5/10/2016	1.46	1.92	1.87	2.36	2.37	1.82	1.64	1.23	29.26	20.98	21.29	16.37	15.98	22.05	25.16	36.15	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
6/10/2016	1.46	1.92	1.87	2.36	2.37	1.82	1.64	1.23	29.26	20.98	21.29	16.37	15.98	22.05	25.16	36.15	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
7/10/2016	1.46	1.92	1.87	2.36	2.37	1.82	1.64	1.23	29.26	20.98	21.29	16.37	15.98	22.05	25.16	36.15	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
8/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
9/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
10/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
11/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
12/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
13/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
14/10/2016	1.46	1.92	1.87	2.36	2.37	1.82	1.64	1.23	29.26	20.98	21.29	16.37	15.98	22.05	25.16	36.15	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
15/10/2016	1.50	1.96	1.91	2.40	2.41	1.86	1.68	1.27	32.80	23.50	23.89	18.34	17.94	24.74	28.22	40.59	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
16/10/2016	1.52	1.98	1.93	2.42	2.43	1.88	1.70	1.29	34.57	24.75	25.19	19.33	18.92	26.08	29.74	42.82	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
17/10/2016	1.52	1.98	1.93	2.42	2.43	1.88	1.70	1.29	34.57	24.75	25.19	19.33	18.92	26.08	29.74	42.82	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
18/10/2016	1.52	1.98	1.93	2.42	2.43	1.88	1.70	1.29	34.57	24.75	25.19	19.33	18.92	26.08	29.74	42.82	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
19/10/2016	1.51	1.97	1.92	2.41	2.42	1.87	1.69	1.28	33.69	24.12	24.54	18.83	18.43	25.41	28.98	41.70	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
20/10/2016	1.52	1.98	1.93	2.42	2.43	1.88	1.70	1.29	34.57	24.75	25.19	19.33	18.92	26.08	29.74	42.82	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
21/10/2016	1.51	1.97	1.92	2.41	2.42	1.87	1.69	1.28	33.69	24.12	24.54	18.83	18.43	25.41	28.98	41.70	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
22/10/2016	1.49	1.95	1.90	2.39	2.40	1.85	1.67	1.26	31.92	22.87	23.24	17.85	17.45	24.07	27.45	39.48	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
23/10/2016	1.52	1.98	1.93	2.42	2.43	1.88	1.70	1.29	34.57	24.75	25.19	19.33	18.92	26.08	29.74	42.82	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
24/10/2016	1.54	2.00	1.95	2.44	2.45	1.90	1.72	1.31	36.34	26.01	26.49	20.31	19.90	27.42	31.27	45.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
25/10/2016	1.56	2.02	1.97	2.46	2.47	1.92	1.74	1.33	38.11	27.27	27.79	21.30	20.88	28.77	32.80	47.26	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
26/10/2016	1.59	2.05	2.00	2.49	2.50	1.95	1.77	1.36	40.77	29.16	29.74	22.77	22.35	30.78	35.09	50.59	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
27/10/2016	1.63	2.09	2.04	2.53	2.54	1.99	1.81	1.40	44.31	31.67	32.33	24.74	24.31	33.46	38.14	55.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
28/10/2016	1.60	2.06	2.01	2.50	2.51	1.96	1.78	1.37	41.65	29.78	30.38	23.27	22.84	31.45	35.85	51.70	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
29/10/2016	1.58	2.03	1.98	2.47	2.48	1.93	1.75	1.34	39.88	27.90	28.44	21.79	21.37	29.44	33.56	48.37	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
30/10/2016	1.62	2.08	2.03	2.52	2.53	1.98	1.80	1.39	43.42	31.04	31.68	24.25	23.82	32.79	37.38	53.93	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
31/10/2016	1.66	2.12	2.07	2.56	2.57	2.02	1.84	1.43	46.96	33.56	34.28	26.22	25.78	35.48	40.43	58.37	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja

Fuente: Autor.

Tabla 8.7

Descriptores estratégicos – Renovación esc. 2.

	Renovación Esc.2																							
	Concentración de Trazadores (ppb)								Índice Pontencial de Renovación (%)								Susceptibilidad a Eutrofización							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5	LP6	LP7	LP8	S.P1	S.P2	S.P3	S.P4	S.P5	S.P6	S.P7	S.P8
1/10/2016	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63																
2/10/2016	3.28	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	50.49	0.10	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
3/10/2016	3.11	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	5.30	0.10	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
4/10/2016	11.81	6.61	6.61	6.60	6.61	6.61	6.61	6.61	-279.96	0.12	0.10	0.21	0.10	0.10	0.10	0.10	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
5/10/2016	13.94	6.59	6.60	6.54	6.60	6.60	6.60	6.60	-18.01	0.22	0.10	0.91	0.20	0.11	0.10	0.09	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
6/10/2016	4.96	6.57	6.59	6.44	6.56	6.59	6.60	6.60	64.39	0.39	0.26	1.59	0.50	0.22	0.11	0.11	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
7/10/2016	3.13	6.54	6.54	6.49	6.53	6.56	6.59	6.59	36.96	0.49	0.63	-0.84	0.48	0.37	0.16	0.15	Baja	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
8/10/2016	3.10	6.52	6.53	6.67	6.55	6.54	6.57	6.57	0.92	0.21	0.17	-2.77	-0.23	0.41	0.23	0.20	Moderada	Moderada	Moderada	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
9/10/2016	12.44	6.56	6.55	6.76	6.60	6.53	6.55	6.56	-301.13	-0.50	-0.19	-1.27	-0.84	0.09	0.27	0.26	Muy Alta	Alta	Moderada	Alta	Alta	Moderada	Moderada	Moderada
10/10/2016	4.45	6.60	6.59	6.64	6.62	6.56	6.54	6.54	64.25	-0.63	-0.75	1.70	-0.22	-0.41	0.25	0.28	Baja	Alta	Alta	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Moderada
11/10/2016	12.66	6.59	6.63	6.50	6.58	6.58	6.53	6.53	-184.86	0.07	-0.48	2.11	0.61	-0.39	0.06	0.11	Muy Alta	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
12/10/2016	4.26	6.58	6.57	6.58	6.55	6.58	6.54	6.54	66.38	0.20	0.82	-1.24	0.43	0.08	-0.12	-0.11	Baja	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
13/10/2016	3.10	6.58	6.53	6.65	6.56	6.56	6.55	6.55	27.14	-0.02	0.59	-0.98	-0.22	0.19	-0.12	-0.14	Baja	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
14/10/2016	3.10	6.61	6.56	6.77	6.59	6.57	6.55	6.55	0.09	-0.38	-0.42	-1.78	-0.42	0.00	0.01	-0.01	Moderada	Moderada	Alta	Muy Alta	Alta	Moderada	Moderada	Moderada
15/10/2016	3.10	6.64	6.68	6.69	6.62	6.58	6.55	6.54	0.00	-0.44	-1.79	1.17	-0.49	-0.29	-0.06	0.05	Moderada	Alta	Muy Alta	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada
16/10/2016	12.95	6.56	6.76	6.48	6.59	6.60	6.56	6.55	-317.70	1.16	-1.21	3.07	0.50	-0.20	-0.13	-0.03	Muy Alta	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
17/10/2016	14.00	6.44	6.66	6.30	6.53	6.56	6.57	6.56	-8.11	1.82	1.50	2.82	0.86	0.60	-0.12	-0.20	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
18/10/2016	14.00	6.36	6.54	6.25	6.46	6.49	6.56	6.56	-0.01	1.20	1.78	0.84	1.13	1.07	0.12	-0.05	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
19/10/2016	14.00	6.37	6.40	6.55	6.45	6.42	6.53	6.54	0.001	-0.13	2.10	-4.93	0.16	0.97	0.49	0.30	Moderada	Moderada	Moderada	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
20/10/2016	14.00	6.49	6.36	6.87	6.54	6.41	6.50	6.52	0.002	-1.97	0.69	-4.80	-1.38	0.21	0.43	0.43	Moderada	Muy Alta	Moderada	Muy Alta	Alta	Moderada	Moderada	Moderada
21/10/2016	14.00	6.70	6.55	7.05	6.63	6.48	6.48	6.48	0.004	-3.20	-3.08	-2.63	-1.33	-1.14	0.38	0.57	Moderada	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Alta	Alta	Moderada	Moderada
22/10/2016	14.00	6.81	6.75	7.21	6.72	6.60	6.46	6.46	-0.001	-1.65	-2.93	-2.23	-1.44	-1.74	0.18	0.29	Moderada	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Moderada
23/10/2016	4.91	6.89	6.97	7.24	6.80	6.69	6.48	6.47	64.96	-1.08	-3.28	-0.47	-1.18	-1.46	-0.19	-0.16	Baja	Alta	Muy Alta	Alta	Alta	Muy Alta	Moderada	Moderada
24/10/2016	3.12	6.98	7.26	7.26	6.83	6.77	6.50	6.50	36.30	-1.42	-4.27	-0.25	-0.41	-1.14	-0.43	-0.41	Baja	Muy Alta	Muy Alta	Moderada	Alta	Alta	Alta	Alta
25/10/2016	3.10	7.10	7.44	7.27	6.85	6.81	6.53	6.52	0.80	-1.73	-2.38	-0.09	-0.38	-0.67	-0.39	-0.44	Moderada	Muy Alta	Muy Alta	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Alta
26/10/2016	3.10	7.20	7.54	7.26	6.91	6.90	6.55	6.58	0.01	-1.36	-1.38	0.08	-0.76	-1.30	-0.38	-0.81	Moderada	Alta	Alta	Moderada	Alta	Alta	Moderada	Alta
27/10/2016	3.10	7.12	7.54	7.27	7.03	7.00	6.60	6.61	-0.03	1.11	0.05	-0.09	-1.81	-1.37	-0.74	-0.51	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Muy Alta	Alta	Alta	Alta
28/10/2016	3.10	7.00	7.41	7.11	7.09	7.00	6.68	6.69	0.03	1.67	1.73	2.17	-0.79	0.02	-1.20	-1.20	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Alta	Alta
29/10/2016	3.10	6.94	7.27	6.90	7.01	6.96	6.75	6.75	-0.004	0.93	1.83	2.93	1.11	0.52	-1.00	-0.92	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Alta
30/10/2016	3.10	6.84	7.01	6.82	6.93	6.92	6.78	6.81	0.0003	1.41	3.58	1.16	1.10	0.63	-0.47	-0.86	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Alta
31/10/2016	13.13	6.67	6.93	6.66	6.89	6.86	6.81	6.82	-323.71	2.42	1.12	2.34	0.54	0.85	-0.44	-0.17	Muy Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Moderada

Fuente: Autor.

Tabla 8.8

Descriptorios estratégicos – Salinización esc. 2.

	Salinización Esc. 2																							
	Concentración de Trazadores (ppb)								Índice Pontencial de Salinización (%)								Susceptibilidad a Salinización							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	IP1	IP2	IP3	IP4	IP5	IP6	IP7	IP8	S.P1	S.P2	S.P3	S.P4	S.P5	S.P6	S.P7	S.P8
1/10/2016	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	6.63	145.56	145.56	145.56	145.56	145.56	145.56	145.56	145.56	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
2/10/2016	3.28	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	21.57	145.32	145.29	145.32	145.32	145.32	145.32	145.32	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
3/10/2016	3.11	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	6.62	15.13	145.08	145.02	145.08	145.08	145.08	145.08	145.08	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
4/10/2016	11.81	6.61	6.61	6.60	6.61	6.61	6.61	6.61	337.43	144.79	144.77	144.56	144.82	144.84	144.85	144.85	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
5/10/2016	13.94	6.59	6.60	6.54	6.60	6.60	6.60	6.60	416.23	144.25	144.54	142.33	144.34	144.56	144.62	144.63	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
6/10/2016	4.96	6.57	6.59	6.44	6.56	6.59	6.60	6.60	83.83	143.30	143.91	138.49	143.12	144.02	144.35	144.37	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
7/10/2016	3.13	6.54	6.54	6.49	6.53	6.56	6.59	6.59	15.88	142.11	142.38	140.49	141.96	143.13	143.97	144.01	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
8/10/2016	3.10	6.52	6.53	6.67	6.55	6.54	6.57	6.58	14.82	141.61	141.98	147.15	142.52	142.12	143.41	143.52	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
9/10/2016	12.44	6.56	6.55	6.76	6.60	6.53	6.55	6.56	360.56	142.83	142.43	150.30	144.57	141.91	142.74	142.88	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
10/10/2016	4.45	6.60	6.59	6.64	6.62	6.56	6.54	6.54	64.67	144.35	144.25	146.04	145.11	142.90	142.13	142.19	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
11/10/2016	12.66	6.59	6.63	6.50	6.58	6.58	6.53	6.53	369.06	144.17	145.42	140.85	143.63	143.84	141.98	141.92	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
12/10/2016	4.26	6.58	6.57	6.58	6.55	6.58	6.54	6.54	57.69	143.70	143.41	143.84	142.57	143.64	142.27	142.19	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
13/10/2016	3.10	6.58	6.53	6.65	6.56	6.57	6.55	6.55	14.90	143.75	141.98	146.23	143.12	143.17	142.57	142.52	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
14/10/2016	3.10	6.61	6.56	6.77	6.59	6.57	6.55	6.55	14.80	144.67	143.00	150.62	144.14	143.18	142.56	142.54	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
15/10/2016	3.10	6.64	6.68	6.69	6.62	6.58	6.55	6.55	14.80	145.76	147.34	147.68	145.32	143.89	142.71	142.43	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
16/10/2016	12.95	6.56	6.76	6.48	6.59	6.60	6.56	6.55	379.53	142.91	150.34	140.09	144.10	144.38	143.01	142.50	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
17/10/2016	14.00	6.44	6.66	6.30	6.53	6.56	6.57	6.56	418.42	138.48	146.59	133.32	142.00	142.92	143.32	142.99	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
18/10/2016	14.00	6.36	6.54	6.25	6.46	6.49	6.56	6.56	418.46	135.61	142.20	131.37	139.27	140.33	143.02	143.13	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
19/10/2016	14.00	6.37	6.40	6.55	6.45	6.43	6.53	6.54	418.46	135.91	137.13	142.77	138.89	138.00	141.82	142.40	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
20/10/2016	14.00	6.50	6.36	6.87	6.54	6.41	6.50	6.52	418.45	140.56	135.49	154.43	142.19	137.51	140.78	141.36	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
21/10/2016	14.00	6.70	6.55	7.05	6.63	6.49	6.48	6.48	418.43	148.25	142.75	161.13	145.42	140.21	139.87	140.00	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
22/10/2016	14.00	6.81	6.75	7.21	6.72	6.60	6.47	6.46	418.43	152.34	149.85	166.95	148.94	144.39	139.45	139.30	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
23/10/2016	4.91	6.89	6.97	7.24	6.80	6.69	6.48	6.47	81.68	155.07	158.06	168.20	151.89	147.96	139.90	139.68	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
24/10/2016	3.12	6.98	7.27	7.26	6.83	6.77	6.51	6.50	15.74	158.68	169.08	168.88	152.92	150.79	140.94	140.65	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
25/10/2016	3.10	7.11	7.44	7.27	6.85	6.82	6.53	6.53	14.81	163.17	175.49	169.13	153.88	152.47	141.87	141.70	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
26/10/2016	3.10	7.20	7.54	7.26	6.91	6.91	6.56	6.58	14.80	166.75	179.30	168.91	155.82	155.75	142.80	143.65	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
27/10/2016	3.10	7.12	7.54	7.27	7.03	7.00	6.60	6.61	14.83	163.78	179.15	169.16	160.46	159.25	144.59	144.90	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
28/10/2016	3.10	7.00	7.41	7.11	7.09	7.00	6.68	6.69	14.80	159.37	174.31	163.33	162.51	159.18	147.53	147.84	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
29/10/2016	3.10	6.94	7.27	6.90	7.01	6.96	6.75	6.75	14.81	156.96	169.28	155.62	159.59	157.85	150.00	150.12	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
30/10/2016	3.10	6.84	7.01	6.82	6.93	6.92	6.78	6.81	14.81	153.34	159.63	152.67	156.74	156.22	151.17	152.27	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
31/10/2016	13.13	6.68	6.93	6.66	6.89	6.86	6.81	6.82	386.44	147.22	156.72	146.75	155.36	154.03	152.28	152.71	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta

Fuente: Autor.

Tabla 8.9

Descriptorios estratégicos – Déficit hídrico esc. 2.

	Déficit Hídrico Esc. 2																							
	Concentración de Trazadores (ppb)								Índice Pontencial de Déficit (%)								Susceptibilidad a Déficit Hídrico							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5	LP6	LP7	LP8	S.P1	S.P2	S.P3	S.P4	S.P5	S.P6	S.P7	S.P8
1/10/2016	1.45	1.91	1.86	2.35	2.36	1.81	1.63	1.22	28.38	20.35	20.64	15.88	15.49	21.38	24.40	35.04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
2/10/2016	1.37	1.83	1.78	2.27	2.28	1.73	1.55	1.14	21.30	15.32	15.45	11.94	11.57	16.01	18.29	26.15	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
3/10/2016	1.29	1.75	1.70	2.19	2.20	1.65	1.47	1.06	14.22	10.29	10.25	8.00	7.65	10.64	12.19	17.26	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
4/10/2016	1.29	1.75	1.70	2.19	2.20	1.65	1.47	1.06	14.22	10.29	10.25	8.00	7.65	10.64	12.19	17.26	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
5/10/2016	1.30	1.76	1.71	2.20	2.21	1.66	1.48	1.07	15.11	10.92	10.90	8.49	8.14	11.32	12.95	18.37	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
6/10/2016	1.30	1.76	1.71	2.20	2.21	1.66	1.48	1.07	15.11	10.92	10.90	8.49	8.14	11.32	12.95	18.37	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
7/10/2016	1.30	1.76	1.71	2.20	2.21	1.66	1.48	1.07	15.11	10.92	10.90	8.49	8.14	11.32	12.95	18.37	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
8/10/2016	1.29	1.75	1.70	2.19	2.20	1.65	1.47	1.06	14.22	10.29	10.25	8.00	7.65	10.64	12.19	17.26	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
9/10/2016	1.29	1.75	1.70	2.19	2.20	1.65	1.47	1.06	14.22	10.29	10.25	8.00	7.65	10.64	12.19	17.26	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
10/10/2016	1.29	1.75	1.70	2.19	2.20	1.65	1.47	1.06	14.22	10.29	10.25	8.00	7.65	10.64	12.19	17.26	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
11/10/2016	1.29	1.75	1.70	2.19	2.20	1.65	1.47	1.06	14.22	10.29	10.25	8.00	7.65	10.64	12.19	17.26	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
12/10/2016	1.29	1.75	1.70	2.19	2.20	1.65	1.47	1.06	14.22	10.29	10.25	8.00	7.65	10.64	12.19	17.26	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
13/10/2016	1.29	1.75	1.70	2.19	2.20	1.65	1.47	1.06	14.22	10.29	10.25	8.00	7.65	10.64	12.19	17.26	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
14/10/2016	1.30	1.76	1.71	2.20	2.21	1.66	1.48	1.07	15.11	10.92	10.90	8.49	8.14	11.32	12.95	18.37	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
15/10/2016	1.26	1.71	1.66	2.15	2.16	1.61	1.43	1.02	11.57	7.77	7.66	6.02	5.68	7.96	9.13	12.82	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
16/10/2016	1.19	1.65	1.60	2.09	2.10	1.55	1.37	0.96	5.37	4.00	3.76	3.07	2.74	3.93	4.55	6.15	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Baja
17/10/2016	1.19	1.65	1.60	2.09	2.10	1.55	1.37	0.96	5.37	4.00	3.76	3.07	2.74	3.93	4.55	6.15	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Baja
18/10/2016	1.19	1.65	1.60	2.09	2.10	1.55	1.37	0.96	5.37	4.00	3.76	3.07	2.74	3.93	4.55	6.15	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Baja
19/10/2016	1.18	1.64	1.59	2.08	2.09	1.54	1.36	0.95	4.49	3.37	3.11	2.58	2.25	3.26	3.79	5.04	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Baja
20/10/2016	1.19	1.65	1.60	2.09	2.10	1.55	1.37	0.96	5.37	4.00	3.76	3.07	2.74	3.93	4.55	6.15	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Baja
21/10/2016	1.17	1.63	1.58	2.07	2.08	1.53	1.35	0.94	3.60	2.74	2.46	2.08	1.76	2.59	3.03	3.93	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
22/10/2016	1.16	1.62	1.57	2.06	2.07	1.52	1.34	0.93	2.72	2.11	1.81	1.59	1.27	1.92	2.26	2.82	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
23/10/2016	1.18	1.64	1.59	2.08	2.09	1.54	1.36	0.95	4.49	3.37	3.11	2.58	2.25	3.26	3.79	5.04	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Baja
24/10/2016	1.21	1.66	1.61	2.10	2.11	1.56	1.38	0.97	7.14	4.63	4.41	3.56	3.23	4.60	5.32	7.26	Baja	Baja	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Baja	Baja
25/10/2016	1.23	1.69	1.64	2.13	2.14	1.59	1.41	1.00	8.91	6.51	6.36	5.04	4.70	6.62	7.61	10.59	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
26/10/2016	1.26	1.72	1.67	2.16	2.17	1.62	1.44	1.03	11.57	8.40	8.31	6.52	6.17	8.63	9.90	13.93	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
27/10/2016	1.29	1.75	1.70	2.19	2.20	1.65	1.47	1.06	14.22	10.29	10.25	8.00	7.65	10.64	12.19	17.26	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
28/10/2016	1.26	1.72	1.67	2.16	2.17	1.62	1.44	1.03	11.57	8.40	8.31	6.52	6.17	8.63	9.90	13.93	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
29/10/2016	1.24	1.70	1.65	2.14	2.15	1.60	1.42	1.01	9.80	7.14	7.01	5.53	5.19	7.29	8.37	11.70	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
30/10/2016	1.29	1.75	1.70	2.19	2.20	1.65	1.47	1.06	14.22	10.29	10.25	8.00	7.65	10.64	12.19	17.26	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
31/10/2016	1.33	1.79	1.74	2.23	2.24	1.69	1.51	1.10	17.76	12.80	12.85	9.97	9.61	13.33	15.24	21.70	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja

Fuente: Autor

