



LA FORMACIÓN DE INGENIEROS:
UN COMPROMISO PARA EL
DESARROLLO Y LA SOSTENIBILIDAD

15 al 18
DE SEPTIEMBRE

20
20

www.acofi.edu.co/eiei2020

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

Diego Camilo Guio Sandoval

**Universidad Santo Tomás
Tunja, Colombia**

Olga Lucía Usaquén Perilla

**Universidad de Boyacá
Tunja, Colombia**

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 Sochagota, se emplea para la aplicación de la metodología OSSEM. Esta metodología vincula factores hidrológicos, climáticos, la 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, con el fin de establecer la correlación entre éstas 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 Sochagota. Los resultados preliminares para el año extremo seco (2015), permiten encontrar correlaciones significativas ($p < 0.01$) entre los indicadores y variables clave de calidad del agua, tales como DBO_5 , DQO, clorofila *a*, sólidos totales y suspendidos, nitritos, nitratos, coliformes totales, entre otras.

Palabras clave: modelación hidrodinámica; calidad de agua; indicadores socio-ecológicos

Abstract

*Water systems are been influenced by natural and anthropogenic stresses, which affect the use of water, its availability, quality, its ecological status and sustainability. This study is developing within the framework of the project: Resilience and management of strategic socio-ecological systems for agricultural activity, in scenarios of climatic variability. Case study: Sochagota Lake (Boyacá, Colombia) and it is oriented to establish the relationship between water quality variables and hydrodynamic-based socio-ecological indicators. The numerical modeling of the hydrodynamics and transport phenomena in Lake Sochagota was used for the application of the OSSEM methodology. This links hydrological, climatic factors, the occupation of the area and the storage volume, with tensions associated with the dynamics of supply, use and quality of the water. The effects of salinization, water deficit and eutrophication in the Lake Sochagota are evaluated using hydrodynamic based socio-ecological indicators. The behavior of these variables is analyzed under different climatic periods, in order to establish the correlation between socio-ecological indicators and water quality (physical-chemical and microbiological parameters) measured in the same period. Using a hydrodynamic model developed in Delft3D software, socio-ecological indicators (renewal potential, salinization potential, and water deficit potential) in Lake Sochagota are calculated. The preliminary results for the dry extreme year (2015), allow to find significant correlations ($p < 0.01$) between the indicators and key variables of water quality, such as BOD_5 , COD, chlorophyll *a*, total and suspended solids, nitrites, nitrates, total coliforms, among others.*

Keywords: hydrodynamic modeling; water quality; socio-ecological indicators

1. Introducción

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 (Dupas, Delmas, Dorioz, & Garnier, 2015; Billen & Garnier, 2007); En sistemas con información ambiental escasa o dispersa, en los que la información hidrodinámica y climatológica es, generalmente, evaluada permanentemente, el uso de indicadores de base hidrodinámica constituye una alternativa que debe ser considerada.

La evaluación del estado de los sistemas hídricos mediante el uso de herramientas numéricas, ha contribuido con la comprensión de fenómenos complejos, tales como, la eutrofización, la salinización y el déficit de agua en humedales costeros y continentales (Gómez, Juanes, Ondiviela, & Revilla, 2014; Usaquén-Perilla, 2017). La metodología OSSEM (Usaquén Perilla, Gómez, Gómez, Díaz, & Cortezón, 2012) propone el uso de indicadores socio-ecológicos 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.

El presente estudio, se desarrolla en el marco del proyecto: Resiliencia y gestión de sistemas socio-ecológicos estratégicos para la actividad agrícola. Caso de estudio: lago Sochagota (Boyacá, Colombia). El objetivo es establecer la relación entre variables de calidad del agua e indicadores socio-ecológicos de base hidrodinámica propuestos en la metodología OSSEM. 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, mediante análisis de correlación, se vincula con los indicadores socio-ecológicos de base hidrodinámica.

2. Área de Estudio

El Lago Sochagota (Paipa, Boyacá - Colombia), forma parte de un sistema hidrotermal de origen volcánico localizado en la cordillera de los Andes (Cifuentes, Jiménez-Millán, Quevedo, & Jiménez-Espinosa, 2020). Fue construido en el año 1956, sobre el área de drenaje del río Salitre o quebrada Honda, con fines de regulación agrícola. Posteriormente, este humedal ha sido destinado a recreación (deportes náuticos) y reconocido como un ecosistema estratégico en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá. El Lago Sochagota forma parte de la cuenca alta del río Chicamocha, principal fuente de abastecimiento y aprovechamiento agrícola del sistema regional (Figura 1). De esta cuenca, forma parte la Quebrada Honda – río Salitre (principal afluente superficial al lago); esta microcuenca está influenciada por actividades agrícolas, pecuarias, recreativas, entre otras y recibe aportes de naturaleza salina provenientes de aguas termales, termominerales, de origen natural y antropogénico (Balnearios la Playa, los Delfines, etc).

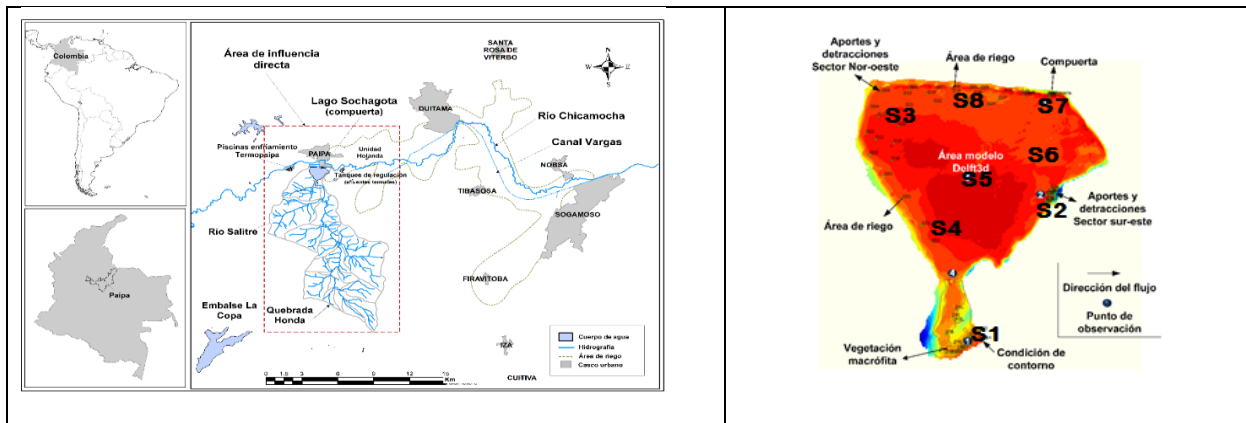


Figura 1. Localización del sistema socio-ecológico Lago Sochagota (izq.) y distribución de los aportes, detracciones y estaciones de medición de calidad del agua en el dominio de cálculo asociado al Lago Sochagota en el modelo hidrodinámico Delft3D (der.). Fuente: Adaptado de (Usaquén-Perilla, 2017)

El efluente del lago es regulado mediante una compuerta que conduce el agua hacia el río Chicamocha del cual depende el distrito de riego, así como, acueductos urbanos y rurales. Por lo

anterior, el sistema regional es afectado por la calidad del Lago y de su dinámica de manejo y gestión.

3. Materiales y métodos

La metodología para evaluar la relación entre la calidad del agua en el sistema Lago Sochagota y los indicadores socio-ecológicos de base hidrodinámica propuestos por Usaquén O. (2017), se describe en dos apartados: i) una síntesis de la metodología OSSEM, del desarrollo del modelo hidrodinámico y el cálculo de los indicadores socio-ecológicos; y ii) el análisis de la calidad del agua en el sistema y de correlación con indicadores socio-ecológicos.

3.1 Aplicación de la metodología OSSEM para el cálculo de indicadores socio-ecológicos de base hidrodinámica

La metodología base para la formulación de este trabajo se describe en Usaquén, et al. (2012), y ha sido validada por Usaquén, O. (2017) para humedales costeros y continentales. Se realiza el cálculo de tres descriptores estratégicos priorizados en la metodología OSSEM, considerando que integran las condiciones climáticas, de operación, físicas, morfológicas e hidrológicas del sistema con las tensiones socio-ecológicas del mismo. El Potencial de renovación (PR) es el Indicador que evalúa la susceptibilidad del sistema a la eutrofización, teniendo en cuenta la dinámica de ingreso y salida de flujos, a partir del porcentaje en el cual varía la concentración de un trazador conservativo introducido en el dominio de interés, transcurridas 24 horas desde su aplicación. El Potencial de salinización (PS) es el Indicador que evalúa la posibilidad de que un sistema o dominio, supere los niveles de referencia de salinidad propios de su naturaleza o condición geogénica. Al igual que el potencial de renovación, se calcula diariamente durante el ciclo de gestión anual. El Potencial de déficit hídrico (P_{WD}) es el Indicador que evalúa la susceptibilidad del sistema frente a la disponibilidad de agua en los subsistemas natural y humano, con respecto a un nivel de referencia crítico, en un periodo de 24 horas. El nivel crítico (η_c) es aquel que satisface las necesidades de agua de la actividad de mayor demanda sin comprometer el recurso base del sistema.

La valoración de los indicadores socio-ecológicos se fundamenta en la definición de límites específicos para el humedal objeto de estudio en condiciones hipotéticas de operación. Los límites se clasifican en cuatro categorías (Baja, moderada, alta o muy alta), que permiten identificar periodos o zonas del sistema susceptibles a presentar los efectos priorizados, bajo las condiciones hidrológicas, morfológicas, climáticas, operativas, de calidad y las impuestas por el uso del recurso durante el ciclo de gestión. A escala local (celda), la variación espacial de los potenciales puede obtenerse mediante el uso de modelos bidimensionales o tridimensionales. En esta aplicación el cálculo de los límites de valoración se obtiene mediante el uso del modelo de cajas MSL-S desarrollado por (Díaz, Usaquén, & Viasus, 2015) adaptado por Usaquén O. (2017) y el modelo tridimensional Delft, empleando una capa σ y en coordenadas cartesianas, para el cálculo de los indicadores socio-ecológicos a escala local.

3.2 Análisis de la calidad del agua en el lago Sochagota, ciclo de gestión 2015.

Se ha seleccionado el año 2015 para ilustrar los resultados parciales del presente estudio; este periodo se caracteriza por anomalías climáticas (Fenómeno El Niño) y cuenta con registros de calidad del agua, proporcionados por la Autoridad Ambiental (Corpoboyacá) y la Fundación PROAGUA. El Lago fue caracterizado en 8 estaciones de medición, mediante el uso de 35 variables de calidad físico-química y bacteriológica, obtenidas en dos épocas del año (23 de abril y 3 de agosto de 2015). Por cada estación se dispone de registros en campo y en laboratorio acreditado por el IDEAM, en dos puntos de la columna de agua (a la profundidad del disco Secchi y en la superficie del lago). Para analizar la calidad del agua, se aplicaron los índices de calidad de agua ICADinus (Dinius S.H 1987, citado por (Pérez, Nardini, & Galindo, 2018)), ICOMO, ICOSUS, ICOTRO, e ICOMI (Ramírez, Restrepo, & Viña, 1997), teniendo en cuenta, primero, los puntos medidos en superficie, luego los datos a la profundidad del disco de Secchi.

4. Resultados y discusión

El cálculo de los indicadores se realiza con apoyo de la herramienta Delft3D, éste es un sistema de modelado, 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*). La información utilizada en el proceso de calibración y validación del modelo Delft3d, al igual que en el modelo MSL-S, corresponde a las bases de datos y a los registros históricos proporcionados por el IDEAM, Corpoboyacá, la Fundación Proagua, el distrito de riego (Usochicamocha) y la Universidad de Boyacá, en el año 2015. Durante el proceso de calibración se tuvo en cuenta: i) 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 1, der); ii) el coeficiente de rugosidad de Manning; y iii) la constante del humedal K_{sth} (1×10^{-3} 1/día). Se evaluaron cuatro criterios de ajuste del modelo tomando como referencia el nivel observado y simulado (D_L : 0.017 (m²); R^2 : 0.99; CE: 0.99; Er: 0.38 %), que indican que el modelo refleja de forma confiable y excelente la hidrodinámica del sistema. Una vez calibrado el modelo hidrodinámico, se aplica la metodología OSSEM para calcular los indicadores socio-ecológicos. En la Tabla 1 se presenta una síntesis de los estadísticos descriptivos que tipifican la calidad del agua en el Lago Sochagota durante las campañas realizadas en el año 2015, durante la campaña de abril (C1) y agostos (C2), así como, los índices de calidad y los potenciales de renovación, salinización y déficit hídrico a escala de celda calculados con apoyo en el modelo desarrollado en Delft3D.

Tabla 1. Características e índices de calidad y potenciales de renovación, salinización y déficit hídrico en el lago Sochagota para el año 2015.

Variable de calidad del agua	N	Medi a	Desv.	Punt o	ICO MO	ICOS US	ICO MI	ICA Dini us	PR (%)	PS (%)	Pwd (%)
Acidez (mg/L CaCO ₃)	1 6	1.35	1.57	SS1- C1	0,48	0,25	0,61	43,6 2	50, 96	900 ,16	- 51,2 7
Alcalinidad total (mg/L CaCO ₃)	1 6	440. 56	154.26	SS2- C1	0,67	0,15	1,00	43,6 4	- 0,1 0	385 ,93	- 24,9 9
Carbono Orgánico Total (mg/l)	1 6	31.8 4	51.18	SS3- C1	0,58	0,12	1,00	37,5 0	- 0,1 4	386 ,78	- 34,0 4
Clorofila a (µg/l)	1 6	107. 22	58.77	SS4- C1	0,62	0,14	1,00	40,1 7	- 0,1 1	382 ,99	- 13,8 2
Cloruros (mg/l)	1 6	1183 .4	495.08	SS5- C1	0,63	0,15	1,00	36,6 4	- 0,1 1	386 ,18	- 13,6 9
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	1 6	439. 62	496.24	SS6- C1	0,52	0,19	1,00	37,8 3	- 0,1 1	387 ,59	- 29,2 7
Coliformes Totales (NMP/100 ml)	1 6	7394 4.7	70739. 4	SS7- C1	0,80	0,18	1,00	36,1 9	- 0,1 3	386 ,51	- 44,8 7
Color Real (UPC)	1 6	35.6 7	12.16	SS8- C1	0,66	0,17	1,00	38,3 8	- 0,1 4	386 ,62	- 61,8 0
Conductividad (µS/cm)	1 6	1100 5.6	3684.6	SP1- C1	0,96	1,00	0,71	33,3 7	50, 96	900 ,16	- 51,2 7
DBO5 (mg O ₂ /l)	1 6	105. 50	195.04	SP2- C1	0,67	0,15	1,00	37,8 0	- 0,1 0	385 ,93	- 24,9 9
Disco de Secchi (m)	1 6	0.17	0.07	SP3- C1	0,64	0,14	1,00	37,1 8	- 0,1 4	386 ,78	- 34,0 4
DQO (mg/l)	1 6	189. 06	291.18	SP4- C1	0,70	0,17	1,00	36,2 0	- 0,1 1	382 ,99	- 13,8 2
Dureza Cálcica (mg/L CaCO ₃)	1 6	101. 65	13.19	SP5- C1	0,72	0,18	1,00	35,3 7	- 0,1 1	386 ,18	- 13,6 9
Dureza Magnésica (mg/L CaCO ₃)	1 6	38.9 9	17.38	SP6- C1	0,70	0,18	1,00	36,3 9	- 0,1 1	387 ,59	- 29,2 7
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	1 6	140. 65	26.52	SP7- C1	0,73	0,24	1,00	38,6 5	- 0,1 3	386 ,51	- 44,8 7
Fósforo Soluble total (mg P/l)	1 6	0.22	0.43	SP8- C1	0,65	0,20	1,00	36,0 8	- 0,1 4	386 ,62	- 61,8 0

Fósforo Total (mg P/l)	1 6	0.27 0.54	SS1- C2	0,65 0,22	1,00	36,6 37, 7 11	830 - 03	- 56,6 3
Grasas y/o Aceites (mg/l)	1 6	0.34 0.00	SS2- C2	0,75 0,08	1,00	34,3 5 0,1 8	440 - 77	- 30,1 6
Hierro total (mg/l)	1 6	11.5 9	SS3- C2	0,80 0,07	1,00	33,1 7 0,2 4	441 - 29	- 39,0 5
Nitratos (mg N-NO₃-/l)	1 6	0.28 0.33	SS4- C2	0,77 0,13	1,00	33,7 1 0,1 9	440 - 72	- 18,9 3
Nitrógeno amoniacal (mg N-NH₃/l)	1 6	0.50 0.00	SS5- C2	0,81 0,06	1,00	33,4 2 0,1 9	441 - 45	- 18,8 1
Nitrógeno total (mg N/l)	1 6	1.50 0.00	SS6- C2	0,70 0,14	1,00	34,0 3 0,1 8	440 - 89	- 34,4 0
Nitritos (mg N-NO₂-/l)	1 6	0.02 0.05	SS7- C2	0,73 0,06	1,00	33,4 1 0,2 3	441 - 70	- 49,9 3
Oxígeno disuelto (mg/l)	1 6	5.19 1.15	SS8- C2	0,74 0,12	1,00	33,8 4 0,2 4	441 - 73	- 66,8 3
pH	1 6	8.89 0.78	SP1- C2	0,79 0,71	1,00	38,0 7 11	830 - 03	- 56,6 3
Silicio (mg/l)	1 6	3.36 4.70	SP2- C2	0,80 0,18	1,00	33,1 4 0,1 8	440 - 77	- 30,1 6
Sodio (mg/l)	1 6	2395 .41	SP3- C2	0,79 0,12	1,00	32,9 3 0,2 4	441 - 29	- 39,0 5
Sólidos Disueltos (mg/l)	1 6	6304 .88	SP4- C2	0,73 0,15	1,00	32,8 3 0,1 9	440 - 72	- 18,9 3
Sólidos Suspendidos (mg/l)	1 6	1056 .37	SP5- C2	0,74 0,12	1,00	34,5 7 0,1 9	441 - 45	- 18,8 1
Sólidos Totales (mg/l)	1 6	7361 .25	SP6- C2	0,73 0,07	1,00	33,6 7 0,1 8	440 - 89	- 34,4 0
Sulfatos (mg/l)	1 6	3486 .88	SP7- C2	0,74 0,15	1,00	34,0 3 0,2 3	441 - 70	- 49,9 3
Temperatura Ambiente (°C)	1 6	17.5 9	SP8- C2	0,74 0,14	1,00	33,9 4 0,2 4	441 - 73	- 66,8 3
Temperatura del Agua (°C)	1 6	19.2 8						
Tensoactivos (mg/l LAS)	1 6	0.07 0.00						
Turbiedad (NTU)	1 6	59.8 5						

Fuente: Adaptado de Usaquén-Perilla, 2017

Los límites de evaluación de los potenciales de renovación, salinización y déficit hídrico (Tabla 2), indican que, en general, la susceptibilidad del sistema a efectos de eutrofización es moderada ($PR < LS$) para gran parte del sistema y baja para la zona de entrada del lago ($PR \text{ en } S1 > LS$).

Tabla 2. Límites de evaluación de los potenciales de renovación, salinización y déficit hídrico en el lago Sochagota para el año 2015.

INDICADOR SOCIO-ECOLÓGICO	LÍMITE INFERIOR (LI, %)	LÍMITE INTERMEDIO (LI, %)	LÍMITE SUPERIOR (LS, %)
POTENCIAL DE RENOVACIÓN (PR)	-1.40	-0.39	5.79
POTENCIAL DE SALINIZACIÓN (PS)	-72.2	-69.3	-7.4
POTENCIAL DE DÉFICIT HÍDRICO (P_{wd})	-0.7	0.15	4.4

Fuente: Adaptado de (Usaquén-Perilla, 2017)

El potencial de salinización indica que el lago presenta una muy alta susceptibilidad a salinizarse ($PS > LS$), siendo la zona de entrada la que reporta valores más extremos, típicos de zonas de humedal con vegetación macrófita (halófila). Finalmente, el lago presenta una muy alta susceptibilidad a presentar déficit hídrico ($P_{wd} < LI$), siendo las zonas más someras ($S1, S8$) las que presentan registros más bajos.

En cuanto a los índices de calidad, el lago presenta contaminación orgánica en un rango de moderada a muy alta (ICOMO), por el contrario, el índice ICOSUS señala que es baja con base en los sólidos suspendidos totales. El índice ICOTRO indica que el sistema es eutrófico (Fósforo total $> 0.02 \text{ mg/l}$) y el ICOMI (valores cercanos a 1) que se presenta muy alta contaminación por mineralización (Conductividad, dureza, alcalinidad). El ICA Dinius señala que el lago Sochagota presenta mala calidad para consumo humano, agricultura y fines recreativos.

Antes de determinar la correlación de la calidad medida e indicadores, se realiza un análisis de normalidad usando la prueba de bondad de ajuste Shapiro-Wilks, evidenciando que solo 5 parámetros (Temperatura ambiente, Oxígeno disuelto, dureza cálcica, índice Icomo y potencial de déficit hídrico), tienen una significancia superior a 0.05, lo que indica una distribución normal en los datos, para el resto de parámetros no se acepta esta hipótesis de normalidad. Debido a esta característica, se realizó una correlación de Spearman (prueba no paramétrica), permitiendo evaluar la asociación entre las variables. Para evaluar el grado de correlación, se tienen los siguientes rangos según (Ellis and Victoria, 2011) Ellis y Victoria (2011): 0.00-0.19 "muy débil", 0.20-0.39 "débil", 0.40-0.59 "moderado", 0.60-0.79 "Fuerte" y 0.80-1.0 "muy fuerte."

En la tabla 3 se observa que el potencial de déficit hídrico presenta correlación significativa ($p < 0.05$) negativa y baja para nitratos, fósforo soluble total y fósforo total y moderada con los sólidos Totales. El déficit hídrico presenta una correlación baja con los parámetros de calidad evaluados, esto se puede atribuirse, principalmente a que es un indicador pensado en la evaluación



de oferta y disponibilidad de agua, sin embargo, el nivel de la columna de agua, es un indicador de la dinámica hídrica del lago y puede relacionarse con procesos de dilución.

Tabla 3. Análisis de correlación para el potencial de déficit hídrico en el lago Sochagota para el año 2015.

Rho de Spearman	Parámetro		NO2	PST	PT	ST
	PWdc	Coeficiente de correlación	-,350*	-,386*	-,360*	-,404*
		Sig. (bilateral)	0.049	0.029	0.043	0.022
N		32	32	32	32	

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). * correlación significativa en el nivel 0.05 (bilateral)

Fuente: Autores.

En la tabla 4, el análisis para la potencia de Renovación (PRc) indica correlaciones positivas significativas ($p < 0.01$), muy fuertes con la profundidad del disco Sechhi; fuertes con el pH, la temperatura del agua, los sólidos suspendidos totales, ICA, Nitrato, Nitrito, Silicio, sulfatos, DQO, Sodio e ICOMO y una correlación moderada con la conductividad, la alcalinidad total, dureza total, Carbono Orgánico Total, cloruros y los sólidos disueltos totales.

Tabla 4. Análisis de correlación para el potencial de renovación en el lago Sochagota para el año 2015 Altamente correlacionados.

Rho de Spearman PRc	Parámetros		pH	T. Amb	T. Agua	NO2-L	ICA	Sechhi D.	Si
	PRc	Coeficiente de correlación	-,599**	,769**	,867**	-,739**	,696**	-,809**	,709**
		Sig. (bilateral)	0	0	0	0	0	0	0
N		32	32	32	32	32	32	32	
PRc	Parámetros		Acidez	Alc. T	DT	SST	DMg	NO3	ICOSUS
	Coeficiente de correlación	,420*	-,592**	-,588**	,679**	-,700**	,686**	,679**	
	Sig. (bilateral)	0.017	0	0	0	0	0	0	
	N	32	32	32	32	32	32	32	

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). * correlación significativa en el nivel 0.05 (bilateral)

Fuente: Autores.

Con respecto al potencial de renovación, todas las especies nitrogenadas están correlacionadas fuertemente entre sí. La presencia de elevadas concentraciones de estas especies es un claro indicador del desarrollo de procesos de eutrofización (Boyd, 2015 citado por Blasco (2017)). Por otro lado, la correlación muy fuerte del disco de secchi puede ser explicada mencionando que a través de la transparencia se puede determinar el nivel de eutrofización de un sistema léntico (Índice del Estado Trófico (IET o TSI)) Carlson (1977). El pH al tener una correlación fuerte evidencia que es una variable importante, pues incide en la fotosíntesis y, consecuente, en la asimilación de nutrientes, que está relacionada con un incremento del pH en los cuerpos de agua (Boyd, 2015). Finalmente, la temperatura es un factor que aumenta la productividad y, con ello, 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 orgánica (Wetzel, 1981 citado por Moreno-Franco, Quintero-Manzano, & López-Cuevas, 2010).

El análisis de correlaciones para el potencial de Salinidad (PRs), ver tabla 5, presentó una correlación significativa ($p < 0.01$) moderada con conductividad, alcalinidad, Dureza total, Sodio,

Dureza Magnésica, Carbono orgánico total, hierro, sólidos disueltos, cloruros y Sulfatos y, una correlación Fuerte, con nitritos, clorofila, nitratos, sólidos totales, DBO₅ y DQO.

Tabla 5. Análisis de correlación para el potencial de Salinización en el lago Sochagota para el año 2015.

Correlaciones								
Rho de Spearman	Parámetro		Conduct	Alc. T	DT	Na	Chlo a	Fe
	PSc	Coeficiente de correlación	,505**	,536**	,461**	,454**	-,747**	,473**
		Sig. (bilateral)	0.003	0.002	0.008	0.009	0.000	0.006
		N	32	32	32	32	32	32
	Parámetro		DMg	COT	CL	SO4	NO2-L	DQO
	PSc	Coeficiente de correlación	,458**	,541**	,511**	,487**	,597**	,604**
		Sig. (bilateral)	0.008	0.001	0.003	0.005	0.000	0.000
		N	32	32	32	32	32	32
	Parámetro		NO3	SDT	ST	DBO5	** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). * . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).	
	PSc	Coeficiente de correlación	-,639**	,539**	,718**	,615**		
		Sig. (bilateral)	0.000	0.001	0.000	0.000		
		N	32	32	32	32		

Fuente: Autores.

Para el potencial de salinidad, analizando las variables correlacionadas, éstas son características de aguas salinas que incluyen: carbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, boratos, fertilizantes, pesticidas, humus, sólidos suspendidos totales, nitrógeno, fósforo, sales, compuestos orgánicos, amonio, nitrógeno, sólidos disueltos, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, metales como cromo, Hierro entre otros, (Liang et al., 2017). Así mismo, la salinización puede ser expresada en función de la conductividad eléctrica y esta se relaciona con diversos iones en solución (ej. Na⁺, Ca⁺², Mg⁺², Cl⁻, SO₄⁼, CO₃⁼, HCO₃⁻; entre otros).

5. Conclusiones

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 e índices asociadas a procesos de contaminación orgánica y eutrofización (S. Secchi, nitritos, nitratos, ICOSUS, ICA Dinius). El potencial de salinización refleja la presencia de sales e iones en solución y presenta una correlación negativa con variables vinculadas con la eutrofización (clorofila, nitratos).

6. Agradecimientos

Los autores reconocen y agradecen el trabajo del 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. 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”.

7. Referencias

Artículos de revistas

- Billen, G., & Garnier, J. (2007). River basin nutrient delivery to the coastal sea: Assessing its potential to sustain new production of non-siliceous algae. *Marine Chemistry*, 106(1), 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2006.12.017>
- Cifuentes, G. R., Jiménez-Millán, J., Quevedo, C. P., & Jiménez-Espinosa, R. (2020). Transformation of S-Bearing Minerals in Organic Matter-Rich Sediments from a Saline Lake with Hydrothermal Inputs. *Minerals*, 10(6), 525. <https://doi.org/10.3390/min10060525>
- 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>
- Moreno-Franco, D., Quintero-Manzano, J., & López-Cuevas, A. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS*, 78, 25–33. Retrieved from <http://lakewatch.ifas.ufl.edu/>
- Pérez, J. I., Nardini, A. G., & Galindo, A. A. (2018). Análisis Comparativo de Índices de Calidad del Agua Aplicados al Río Ranchería, La Guajira-Colombia Comparative Analysis of Water Quality Indices Applied to the Ranchería River, La Guajira-Colombia. *Información Tecnológica*, 29(3), 47–58. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000300047>
- Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(3), 135–153. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v1n3/v1n3a09.pdf>
- 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>

Fuentes electrónicas

- Blasco, J. (2017). *U m h e* [UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE]. http://dspace.umh.es/bitstream/11000/4308/1/TFG_Blasco_Ferre%2C_Jordi.pdf
- Usaquén-Perilla, O. L. (2017). *Desarrollo de una metodología para la gestión ambiental de humedales costeros y continentales sometidos a presiones agrícolas*. Cantabria. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10902/11538>

Sobre los autores

- **Diego Camilo Guio Sandoval:** Ingeniero Ambiental, ingeniero sanitario, candidato a magister en ingeniería Civil con énfasis en Hidroambiente de la Universidad Santo Tomas. Estudiante de maestría. Docente Universidad de Boyacá. dieguio@uniboyaca.edu.co
- **Olga Lucía Usaquén Perilla:** Ingeniera Sanitaria y Ambiental, Máster en Gestión Ambiental de Sistemas Hídricos, Sc.D en Ciencias y Tecnologías para la Gestión Ambiental de Sistemas Hídricos de la Universidad de Cantabria (España). Profesora Asociada Universidad de Boyacá. olusaquen@uniboyaca.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2020 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)