

Estudio de la calidad trófica del humedal Gualí - Tres Esquinas

Gualí–Tres Esquinas wetland trophic quality

MANUEL ANDRÉS GONZÁLEZ MALAGÓN¹ - HÉCTOR MATAMOROS RODRÍGUEZ²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hídricos y Medioambiente.

2. Magíster en Ingeniería Civil. Profesor de planta.

manuel.gonzalez-ma@mail.escuelaing.edu.co - hector.matamoros@escuelaing.edu.co

Recibido: 12/11/2017 Aceptado: 10/12/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

El humedal Gualí - Tres Esquinas se encuentra a 2535 m.s.n.m., abarca un área aproximada de 1294,3 hectáreas y está ubicado en la parte central de la cordillera Oriental, en el occidente de la sabana de Bogotá, entre los municipios de Funza, Mosquera y Tenjo, a un costado de la Troncal de Occidente.

Este humedal es el límite natural entre Funza y Mosquera, convertido actualmente en un eje de desarrollo urbano, en cuya ribera se localizan conjuntos residenciales, parques industriales, instituciones educativas y edificaciones gubernamentales.

Debido a su ubicación geográfica, la cuenca de recarga hídrica se ha venido reduciendo, sometiendo el cuerpo lagunar a fuertes presiones que deterioran la calidad del recurso hídrico y ponen en riesgo la flora y fauna que allí habita.

Durante un recorrido perimetral se identificaron once puntos de descarga de aguas lluvias, cuatro descargas directas de aguas residuales, una de la planta de tratamiento de Funza y un punto de recarga y cinco de drenaje, operados por el Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones de La Ramada.

Aplicando los modelos propuestos por Karydis (1983), con el índice de eutrofización (IE), se determinó que el humedal presenta zonas mesotróficas y eutróficas. Por otra parte, utilizando la metodología de Vollenweider y la distancia inversa ponderada (IDW), utilizando el *software* ArcGis, se estableció que se encuentra en un grado eutrófico. Con dicho nivel de eutrofia se evidencia el fuerte impacto que genera

en el humedal la recarga que realiza el Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones de La Ramada con aguas del río Bogotá, captadas a la altura del río Chicú, en el municipio de Cota, y el efecto de las descargas directas de aguas residuales provenientes de las cabeceras municipales de Funza y Mosquera.

Palabras claves: humedal, eutrofización, descarga.

Abstract

The Gualí - Tres Esquinas wetland sits at 2,545 MAMSL, is about 1,294.3 hectares, and is located on the Eastern mountain range center region, west of the Bogota Savannah, between the municipalities of Funza, Mosquera, and Tenjo, by the Western Highway.

This wetland is a natural border between Funza and Mosquera, it is now an axis of urban development, whose riverside hosts gated communities, industrial parks, education institutions, and government buildings. Due to its geographic location, the infiltration basin has been shrinking, submitting the body of water to strong pressures that deteriorate this hydric resource's quality and threatens the flora and fauna living there. During a perimeter run, eleven rainwater discharge points could be identified, as well as four direct wastewater discharges, one from Funza's treatment plant, an infiltration point, and five drainage points managed by La Ramada's Hydraulic System of Environmental and Flood Control.

By using Karydis's (1983) models, eutrophication index (EI), it could be determined that the wetland has mesotrophic and eutrophic zones.

Additionally, using Vollenweider's methodology and inverse distance weighted (IDW), using ArcGis software, it was concluded that it is at a eutrophic level.

Such a eutrophic level shows the strong impact on the wetland generated by La Ramada's Hydraulic System of Environmental and Flood Control infiltration with water coming from the Bogotá River, collected from the Chicú river in the municipality of Cota, and the effect of direct wastewater discharges coming from the towns of Funza and Mosquera.

Keywords: wetland; eutrophication; discharge.

INTRODUCCIÓN

El humedal Gualí - Tres Esquinas y lagunas del Funzhé cubre un área aproximada de 1294,3 hectáreas, está a 2535 m.s.n.m. y se ubica en la parte central de la cordillera Oriental, en el sector occidental de la sabana de Bogotá, en jurisdicción de los municipios de Funza, Mosquera y Tenjo, sobre un costado de la carretera Troncal de Occidente.

La determinación del grado de eutrofización que presenta el humedal se estimó por medio de la aplicación de los modelos de índice de eutrofización (IE), Vollenweider y distancia inversa ponderada (IDW), mediante el *software* ArcGis.

La eutrofización en los cuerpos de agua es consecuencia del incremento nutricional, debido a la concentración y a la carga existente de nitrógeno y fósforo, principalmente en sus afluentes. A medida que avanza el estado trófico de un cuerpo lagunar, de oligotrófico a mesotrófico y eutrófico, la biomasa aumenta y disminuye la calidad del agua, haciendo más difícil su uso para abastecimiento y recreación¹.

CAUSAS DE LA EUTROFIZACIÓN

La principal causa es el incremento de la carga de nutrientes por diversas vías, especialmente de las fracciones de fósforo y nitrógeno. Dicho aumento se puede presentar en forma natural o por procesos exógenos:

Naturales

- Arrastre de nutrientes por la escorrentía generada por precipitaciones.
- Proliferación de maleza acuática.
- Descomposición de materia orgánica localizada en el fondo de los cuerpos lagunares.
- Incremento de partículas suspendidas que aumentan la turbidez del agua.
- Disminución del oxígeno disuelto.

Externas

- Desarrollo de actividades agrícolas en zona ribereña al cuerpo lagunar.
- Descargas directas de aguas residuales domésticas o industriales.
- Descarga directa de aguas lluvias que puedan arrastrar materia orgánica.
- Disposición de basuras o escombros.
- Urbanizaciones asentadas en la periferia, lo cual produce un incremento en los sedimentos que pueden llegar al cuerpo de agua.

Tomando como base el desarrollo de actividades en inmediaciones de los cuerpos lagunares, Salas & Martino (1990) determinaron los valores en gramo promedio anual por metro cuadrado de fósforo total y nitrógeno total en función del uso del suelo (tabla 1).

Tabla 1

Coefficiente de exportación en función del uso de la tierra (Salas & Martino, 1990)

Uso de la cuenca	Fósforo total (g/m ² /año ⁻¹)	Nitrógeno total (g/m ² /año ⁻¹)
Urbano	0,1	0,5
Agrícola	0,05	0,5
Forestal	0,01	0,3

Fuente: N. Mazzeo y otros. *Eutrofización: causas, consecuencias y manejo*.

Así mismo, establecieron los valores promedio generados por personas, animales o semovientes (tabla 2).

1. J. Romero (2009). *Calidad del agua* (3.^a ed.). Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, p. 413.

Tabla 2

Aportes de fósforo y nitrógeno total de animales utilizados en la explotación ganadera y por persona (Salas & Martino, 1990)

	Fósforo total (g/hab ⁻¹ o animal ⁻¹ /año)	Nitrógeno total (g/hab ⁻¹ o animal ⁻¹ /año ⁻¹)
Personas	1000 g*hab ⁻¹ *año ⁻¹	
Vacunos	7000	54.750
Porcinos - ovinos	3000	14.600
Caballos	4500	18.250
Patos y similares	300	474,5

Fuente: N. Mazzeo y otros. *Eutrofización: causas, consecuencias y manejo*.

METODOLOGÍA

Mediante el desarrollo de 3 campañas de muestreo, se tomaron muestras a lo largo del humedal en 33 estaciones, de las cuales 22 se localizaron en las diferentes descargas y drenajes y 11 en el interior del humedal. En total, se tomaron 99 muestras, a las cuales se les determinaron las cargas de fósforo y clorofila, entre otros. Los puntos de descargas y drenajes, así como las estaciones de muestreo, se detallan a continuación (figuras 1 y 2).

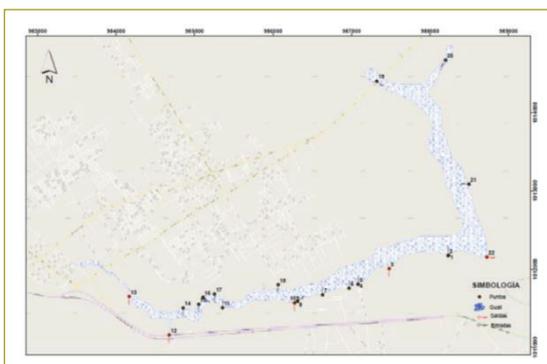


Figura 1. Puntos de descargas.

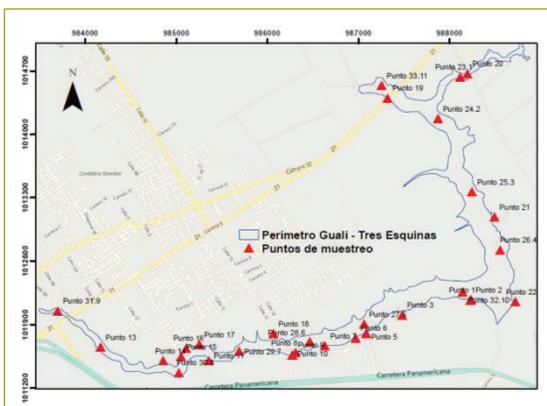


Figura 2. Estaciones de muestreo.

El análisis climatológico de la zona en estudio se realizó conforme a los registros de la estación climatológica La Ramada, suministrados por el grupo climatológico de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

El grado de eutrofia presente en el humedal se determinó mediante las metodologías planteadas a continuación:

Índice de eutrofización por nutriente²

Metodología creada por Karydis et al. (1983), cuyo objetivo es definir los aportes y la disponibilidad de sustancias o nutrientes inorgánicos y evaluar sus concentraciones. Este índice establece una escala < 3 para agua oligotrófica, entre 3 y 5 para mesotrófica y > 5 para eutrófica.

Ecuación 1:

$$IE_i = \frac{C}{C - \log X_i} + \log A$$

Donde:

IE_i = índice de eutrofización del nutriente en cada punto (estación) de muestreo durante el periodo de estudio, compuesto por M muestreos.

C = logaritmo de la concentración total del nutriente durante la etapa de estudio en cada punto de muestreo.

X_i = concentración total del nutriente durante la etapa de estudio en el punto de muestreo.

A = número de puntos de muestreo durante el periodo de estudio.

Vollenweider (1970)³

Vollenweider estableció la carga límite admisible de fósforo y nitrógeno en los años setenta, para que un lago conserve su condición oligotrófica indefinida (tabla 3), a la vez que planteó las siguientes hipótesis:

2. V. Betanzos, R. Garcés A., M. Delgado Y. & R. Pis M.A. (2012). Variación espaciotemporal y grado de eutrofia de sustancias nutrientes en aguas de los golfos de Ana María y Guacanayabo, Cuba. *Rev. Mar. Cost.*, (4), 120, pp. 117-130.
3. J. Romero (2009). *Calidad del agua* (3.ª ed.). Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, p. 415.

Tabla 3
Cargas de nutrientes en lagos

Profundidad media (m)	Carga permisible para lagos oligotróficos (g/m ² -año)		Carga excesiva conducente a eutrofización (g/m ² -año)	
	N	P	N	P
5	1,0	0,07	2	0,13
10	1,5	0,10	3	0,20
50	4,0	0,25	8	0,50
100	6,0	0,40	12	0,80
150	7,5	0,50	15	1,00
200	9,0	0,60	18	1,20

Fuente: J. Romero, *Calidad del agua*, p. 417 (tabla 9.29).

Debido a que los lagos no se ajustan a los valores de la tabla anterior, por su característica en el tiempo de retención, Vollenweider propuso las siguientes fórmulas:

Ecuación 2:

$$P = \frac{L t}{Z (1 + \sqrt{t})} ; L_c = \frac{P_c Z (1 + \sqrt{t})}{t}$$

Donde:

P = concentración del fósforo en el agua del lago, g/m³.

L = carga superficial anual de fósforo, g/m²-año.

Z = profundidad promedio, m.

t = tiempo de retención, año.

L_c = carga superficial anual crítica de fósforo, g/m²-año.

P_c = concentración crítica de fósforo, g/m³.

En términos generales, se acepta una concentración crítica de fósforo de 0,01 g P/m³ para que un lago templado conserve el estado oligotrófico y de 0,02 g P/m³ como límite de separación entre mesotrófico y eutrófico.

Para el caso de lagos cálidos tropicales, el modelo establece el fósforo como nutriente limitante, siempre que la relación nitrógeno a fósforo sea superior a 9; de lo contrario, el nitrógeno es el nutriente limitante. Con base en la concentración promedio de fósforo, se fijan los valores que se presentan a renglón seguido (tabla 4).

Tabla 4
Valores de fósforo promedio

	Eutrófico	Mesotrófico	Oligotrófico
P _{promedio} (mg/L)	0,12	0,04	0,02

Fuente: J. Romero, *Calidad del agua*, p. 418.

Para lagos limitados por el fósforo, se establece la ecuación 3:

$$P = \frac{0,29 L_c^{0,891} t^{0,676}}{Z^{0,934}}$$

Donde:

P: concentración total de fósforo total en el lago, mg/L.

L_c: carga superficial anual de fósforo, g/m²-año.

t: tiempo de retención, año.

Z: profundidad media, m.

P ≤ 0,03 mg/L para lagos oligotróficos.

P ≤ 0,07 mg/L para lagos mesotróficos.

Distancia inversa ponderada (IDW) mediante ArcGis⁴

Mediante la caja de herramientas de 3D Analyst, el programa ArcGis permite procesar la información recolectada en campo en los diferentes puntos de muestreo, según los siguientes principios:

- El valor de salida para una celda que utiliza la distancia inversa ponderada (IDW) se limita al rango de valores usados para la interpolación.
- Los mejores resultados de la IDW se obtienen cuando la muestra es lo suficientemente densa respecto de la variación local que intenta simular.
- La influencia de un punto de entrada sobre un valor interpolado es isotrópica.
- Ciertos *datasets* de entrada pueden tener algunos puntos con las mismas coordenadas x,y.
- Los datos de la entidad de entrada deben contener por lo menos un campo válido.

RESULTADOS

Tipos de descargas

En torno al humedal Gualí - Tres Esquinas se identificaron descargas directas de aguas residuales provenientes de barrios ubicados en los municipios de Funza y Mosquera, y descargas de aguas lluvias derivadas de los parques industriales asentados en el perímetro del cuerpo lagunar (tabla 5).

4. IDW (2016). ArcGisfor Desktop. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/idw.htm> el 24 de enero de 2017.

Tabla 5
Relación de descargas Gualí - Tres Esquinas

Cantidad	Tipo
11	Descarga de aguas lluvias
4	Descarga de aguas residuales
1	Descarga de plantas de tratamiento
5	Puntos de drenaje
1	Punto de ingreso

Fuente: Elaboración propia.

Resultados de laboratorio

Conforme al reporte de laboratorio presentado por el laboratorio ambiental de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), se tiene que en promedio se presentan las siguientes concentraciones: perímetro 2,79 mg/L-P de fósforo, 62,26 µg/L de clorofila e interior 3,06 mg/L-P de fósforo, 0,76 µg/L de clorofila (tabla 6).

Caudales y cargas de fósforo

Aguas lluvias

El volumen generado por agua lluvia se estima a partir de la precipitación promedio anual del área en estudio, multiplicado por el área aferente, datos que se presentan posteriormente (tabla 7).

De acuerdo con esta información, se puede concluir que el humedal recibe un volumen promedio de 35,57 L/s por descarga de aguas lluvias, generando un aporte de 141.550 g/año de fósforo.

Aguas residuales

Los caudales se estimaron con base en los parámetros de diseño para sistemas de alcantarillados contemplados en la Norma Técnica Colombiana RAS 2000. El nivel de complejidad de los sistemas se fundamenta en la población de la cabecera municipal y en su capacidad

Tabla 6
Resultado de laboratorio

Punto	Este	Norte	Clorofila 1 (ug/L)	Clorofila 2 (ug/L)	Clorofila 3 (ug/L)	Fósforo 1 (mg/L-P)	Fósforo 2 (mg/L-P)	Fósforo 3 (mg/L-P)
Punto 1	988237	1012175	747.750	21.400	57.700	0,989	3.353	2.595
Punto 2	988229	1012171	1178.645	38.200	208.000	0,830	2.146	0,576
Punto 3	987480	1012005	64.771	5.200	100.000	0,963	1.763	2.000
Punto 4	987084	1011804	89.571	40.600	19.000	2,066	2.080	2.753
Punto 5	987084	1011804	89.571	7.700	1.200	2,066	1.794	1.803
Punto 6	985959	1011754	20.539	10.100	2.000	2,973	7.952	2.417
Punto 7	985532	1011659	0,000	5.200	8.400	0,104	0,083	0,000
Punto 8	985313	1011588	28.484	187.000	18.300	0,089	1.839	0,978
Punto 9	985277	1011588	27.080	22.100	5.200	1.817	0.152	0,974
Punto 10	985273	1011557	59.042	3.200	31.700	0,254	1.573	0,922
Punto 11	985357	1011504	0,203	24.100	4.200	1,467	0,890	0,725
Punto 12	984577	1011155	0,000	1.900	3.500	0,968	1.707	0,906
Punto 13	984169	1011649	25.570	17.300	4.800	0,963	0,913	0,727
Punto 14	984855	1011501	43.444	70.100	0.000	3.311	0,874	0,762
Punto 15	985053	1011548	9,942	35.600	31.600	2.525	0,924	19.206
Punto 16	985108	1011639	203.422	9.400	1.900	1.358	6.312	17.430
Punto 17	985253	1011680	0,000	3.100	3.200	1.229	0,861	4.389
Punto 18	985055	1011799	9,567	1.000	20.600	17.051	0,960	0,252
Punto 19	987322	1014403	0,000	3.100	4.600	5.045	6.591	NA
Punto 20	988199	1014574	905.197	15.300	1.500	13.815	0,000	0,097
Punto 21	988495	1013087	43.272	0,000	43.100	13.344	NA	0,294
Punto 22	988725	1012153	40.500	9.700	23.600	1.794	0,641	0,639
Punto 23.1	988119	1014535	2,252	2.252	0,324	0,103	0,117	0,137
Punto 24.2	987874	1014177	0,590	0,590	1,574	4.567	5.062	6.820
Punto 25.3	988248	1013354	0,352	0,352	1,056	2.683	4.660	3.280
Punto 26.4	988555	1012725	0,000	0,000	0,000	0,891	0,890	0,969
Punto 27.5	987052	1011905	0,000	0,000	0,000	1.589	0,806	0,906
Punto 28.6	985455	1011713	0,000	0,000	0,000	0,635	0,845	0,975
Punto 29.7	985590	1011603	0,502	0,442	2,093	1.458	0,831	1.810
Punto 30.8	985025	1011370	0,000	0,507	0,000	1.180	0,807	0,940
Punto 31.9	983696	1012052	0,560	2,492	1,301	0,857	0,575	0,778
Punto 32.10	988144	1012259	0,578	2,307	1,275	1.058	0,877	1.500
Punto 33.11	987256	1014542	0,000	0,527	2,866	4.964	39.400	8.385

Fuente: Laboratorio de la CAR Cundinamarca.

Tabla 7

Punto	Tipo	P (mm/año)	A (ha)	Q (l/s) promedio (g/m ² -año)	P _{total} (g/año)	P _{aportado}
1	A.LL.	792,43	18,52	4,65	0,1	18.520
2	A.LL.	792,43	26,35	6,62	0,1	26.350
5	A.LL.	792,43	3,83	0,96	0,1	3830
6	A.LL.	792,43	5,86	1,47	0,1	5860
7	A.LL.	792,43	5,86	1,47	0,1	5860
8	A.LL.	792,43	5,86	1,47	0,1	5860
9	A.LL.	792,43	5,86	1,47	0,1	5860
11	A.LL.	792,43	11,16	2,80	0,1	11.160
14	A.LL.	792,43	34,5	8,67	0,1	34.500
16	A.LL.	792,43	6,17	1,55	0,1	6170
20	A.LL.	792,43	17,58	4,42	0,1	17.580
			Σ	35,57		141.550

Fuente: Elaboración propia.

económica. Según dicha metodología, se establece que el nivel de complejidad es alto, con una dotación neta máxima de 140 L/hab*día y un coeficiente de retorno de 0,85 (tabla 8).

Tabla 8

Carga dispersa de fósforo por aguas residuales

Punto	Tipo	Poblacional (hab/km ²)	A (km ²)	Habitantes	Q (L/s)	P _{total} (g/m ² -año)	P _{aportado} (g/año)
4	AR	1061*	0,0636	67	2,21	0,1	63,6
15	AR	773*	0,0617	44	1,45	0,1	61,7
17	AR	1061*	0,0857	91	3	0,1	85,7
18	AR	1061*	0,2183	232	7,67	0,1	218,3
19	PT				120**		
				Σ	14,35		429,3

Fuente: Elaboración propia.

* Dato tomado de la ficha de caracterización del Departamento Nacional de Planeación.

** Dato tomado de los reportes entregados por la empresa de servicios públicos de Funza a la CAR.

El humedal recibe un volumen promedio de 35,57 L/s por descarga de aguas residuales, generando un aporte de 429,3 g/año de fósforo.

Aporte por escorrentía

La estimación de las áreas que se emplean como potreros o de cobertura en pastos se realizó mediante la medición directa en imagen satelital, en tanto que el

valor promedio de fósforo se tomó de la clasificación de Salas & Martino (1990), como se resume en la tabla siguiente (tabla 9).

Tabla 9

Carga dispersa de fósforo por escorrentía

Uso	C	I (mm/año)	A (ha)	Q (L/s)	P _{total} (g/m ² -año)	P _{aportado} (g/año)
Pastos	0,3	792,43	413,70	103,95	0,05	206.850

Fuente: Elaboración propia.

Aporte puntual

Según los registros de bombeo efectuados mediante la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones, durante el año 2016 se captaron 176.310.000 m³ desde el río Bogotá, con un promedio de 5,59 m³/s, de los cuales 97.470.000 m³ se llevaron al humedal Gualí - Tres Esquinas, correspondiente a 3,09 m³/s. Por temas prácticos se asume el valor promedio anual de fósforo que se obtuvo en cada uno de los muestreos (tabla 10).

Tabla 10

Fecha del muestreo	Campaña	A _{superficial humedal} (m ²)	Q (L/s)	P (mg/L-P)	P (mg/s-P)	P (g/m ² -año)
28/05/2016	1	1558900	3090	13,344	41232,96	834,13
20/08/2016	3	1558900	3090	0,294	908,46	18,38

Fuente: Elaboración propia.

Carga total de fósforo

La carga total de fósforo presente en el humedal se determinó a partir de las cargas puntuales, la escorrentía y las descargas directas de aguas lluvias (A.LL.) y residuales (A.R.). Para el caso de las que se generaron por escorrentía, aguas lluvias y residuales, se dividió por el área superficial del humedal para determinar los gramos por metro cuadrado de fósforo disperso (tabla 11).

Conforme a la sumatoria de los aportes generados por las descargas directas, escorrentía y recarga, se establece que el humedal presenta una carga total de fósforo para la campaña de muestreo del 28 de mayo de 2016 de 834,35 g/m²-año y 18,60 g/m²-año para la campaña del 20 de agosto de 2016.

Tabla 11

Fecha del muestreo	Campaña	Puntual (g/m ² -año)	Escorrentía (g/m ² -año)	A.LL. (g/m ² -año)	A.R. (g/m ² -año)	P _{total} (g/m ² -año)
28/05/2016	1	834,13	0,13	0,091	0,00028	834,35
20/08/2016	3	18,38	0,13	0,091	0,00028	18,60

Fuente: Elaboración propia.

Aplicación del modelo

Índice de eutrofización (IE). Según la metodología presentada por Karydis, el humedal presenta un grado mesotrófico y eutrófico en sus aguas, según el uso de la ecuación 1 de los datos de la tabla 11 (tabla 12).

Tabla 12

Índice de eutrofización por fósforo en el humedal Gualí - Tres Esquinas

Punto	C	Xq	A	Log Xq	Log A	IE	Tipo
1	5,45	6938.00	33	3.84	1.52	4.91	Mesotrófico
2	5,45	3552.00	33	3.56	1.52	4.41	Mesotrófico
3	5,45	4726.00	33	3.67	1.52	4.59	Mesotrófico
4	5,45	6899.00	33	3.84	1.52	4.90	Mesotrófico
5	5,45	5663.00	33	3.75	1.52	4.73	Mesotrófico
6	5,45	13342.00	33	4.13	1.52	5.64	Eutrófico
7	5,45	187.00	33	2.27	1.52	3.23	Mesotrófico
8	5,45	2906.00	33	3.46	1.52	4.26	Mesotrófico
9	5,45	2953.00	33	3.47	1.52	4.27	Mesotrófico
10	5,45	2859.00	33	3.46	1.52	4.25	Mesotrófico
11	5,45	3082.00	33	3.49	1.52	4.30	Mesotrófico
12	5,45	3581.00	33	3.55	1.52	4.40	Mesotrófico
13	5,45	2603.00	33	3.42	1.52	4.20	Mesotrófico
14	5,45	4947.00	33	3.69	1.52	4.63	Mesotrófico
15	5,45	22755.00	33	4.36	1.52	6.51	Eutrófico
16	5,45	25110.00	33	4.40	1.52	6.72	Eutrófico
17	5,45	6479.00	33	3.81	1.52	4.85	Mesotrófico
18	5,45	18263.00	33	4.26	1.52	6.11	Eutrófico
19	5,45	11636.00	33	4.07	1.52	5.46	Eutrófico
20	5,45	13913.00	33	4.14	1.52	5.70	Eutrófico
21	5,45	13638.00	33	4.13	1.52	5.67	Eutrófico
22	5,45	3074.00	33	3.49	1.52	4.30	Mesotrófico
23.1	5,45	357.00	33	2.55	1.52	3.40	Mesotrófico
24.2	5,45	16569.00	33	4.22	1.52	5.95	Eutrófico
25.3	5,45	10603.00	33	4.03	1.52	5.35	Eutrófico
26.4	5,45	2540.00	33	3.40	1.52	4.19	Mesotrófico
27.5	5,45	3301.00	33	3.52	1.52	4.34	Mesotrófico
28.6	5,45	2456.00	33	3.39	1.52	4.17	Mesotrófico
29.7	5,45	3899.00	33	3.59	1.52	4.45	Mesotrófico
30.8	5,45	2927.00	33	3.47	1.52	4.27	Mesotrófico
31.9	5,45	2221.00	33	3.35	1.52	4.11	Mesotrófico
32.10	5,45	3435.00	33	3.54	1.52	4.37	Mesotrófico
33.11	5,45	52749.00	33	4.72	1.52	9.03	Eutrófico

Fuente: Elaboración propia.

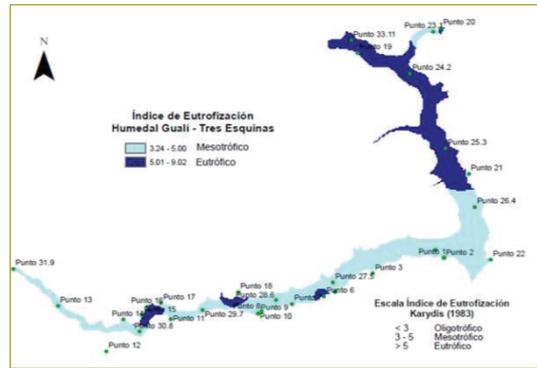


Figura 3. Índice de eutrofización del humedal Gualí - Tres Esquinas.

Vollenweider. De acuerdo con la metodología planteada, se establece que el humedal presenta un grado eutrófico, según el planteamiento detallado a continuación y usando las ecuaciones 2 y 3.

Campaña 1

- Fórmula lagos cálidos

Profundidad media (Z): 2,03 m
 Área superficial (As): 155,89 ha
 Caudal total (Q) = 3,24 m³/s
 Carga total de fósforo: 834,35 g/m² - año

$$t = \frac{Z * A}{Q} = \frac{2,03 * 1558900}{3,24 * 86400 * 365} = 0,031 \text{ años}$$

$$P = \frac{0,29 L_c^{0,991} t^{0,676}}{Z^{0,924}} = \frac{0,29 * 834,35^{0,991} * 0,031^{0,676}}{2,03^{0,924}} = \frac{11,104}{1,9374} = 5,73 \rightarrow \text{Eutrófico}$$

- Usando la tabla 3. Cargas de nutrientes en lagos:

$$t = \frac{Z * A}{Q} = \frac{2,03 * 1558900}{3,24 * 86400 * 365} = 0,031 \text{ años}$$

Carga límite permisible de fósforo para lagos templados: se estima una concentración crítica de fósforo de 0,02 para mesotrófico.

$$L_c = \frac{P_c Z (1 + \sqrt{t})}{t} = \frac{0,02 * 2,03 (1 + \sqrt{0,031})}{0,031} = \frac{0,0477}{0,031} = 1,54 \text{ g / m}^2 \text{ - año}$$

Carga límite permisible de fósforo para lagos cálidos tropicales: se estima una concentración promedio de fósforo de 0,12 mg/L para eutrófico.

$$L_c = \left[\frac{PZ^{0,924}}{0,29t^{0,676}} \right]^{0,991} = \left[\frac{0,12 * 2,03^{0,924}}{0,29 * 0,031^{0,676}} \right]^{0,991} = \left[\frac{0,2325}{0,0277} \right]^{0,991} = 10,88 \text{ g / m}^2 - \text{año}$$

Carga anual de fósforo sobre el lago:

$$L_p = 834,35 \text{ g/m}^2 - \text{año}$$

Como la carga anual sobre el lago es mayor que la admisible para lagos templados y cálidos tropicales, se deduce que es eutrófico.

Campaña 3

- Fórmula lagos cálidos

Profundidad media (Z): 2,03 m
 Área superficial (As): 155,89 ha
 Caudal total (Q) = 3,24 m³/s
 Carga total de fósforo: 18,60 g/m² - año

$$t = \frac{Z * A}{Q} = \frac{2,03 * 1558900}{3,24 * 86400 * 365} = 0,031 \text{ años}$$

$$P = \frac{0,29 L_c^{0,991} t^{0,676}}{Z^{0,924}} = \frac{0,29 * 18,60^{0,991} * 0,031^{0,676}}{2,03^{0,924}} = \frac{0,3747}{1,9374} = 0,19 \rightarrow \text{Eutrófico}$$

- Usando la tabla 3. Cargas de nutrientes en lagos:

$$t = \frac{Z * A}{Q} = \frac{2,03 * 1558900}{3,24 * 86400 * 365} = 0,031 \text{ años}$$

Carga límite permisible de fósforo para lagos templados se estima una concentración crítica de fósforo de 0,02 para mesotrófico.

$$L_c = \frac{P_c Z (1 + \sqrt{t})}{t} = 1,54 \text{ g / m}^2 - \text{año}$$

Carga límite permisible de fósforo para lagos cálidos tropicales: se estima una concentración promedio de fósforo de 0,12 mg/L para eutrófico.

$$L_c = \left[\frac{PZ^{0,924}}{0,29t^{0,676}} \right]^{0,991} = 10,88 \text{ g / m}^2 - \text{año}$$

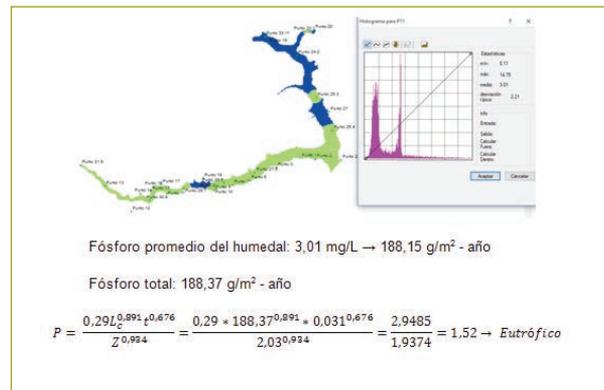
Carga anual de fósforo sobre el lago:

$$L_p = 18,60 \text{ g/m}^2 - \text{año}$$

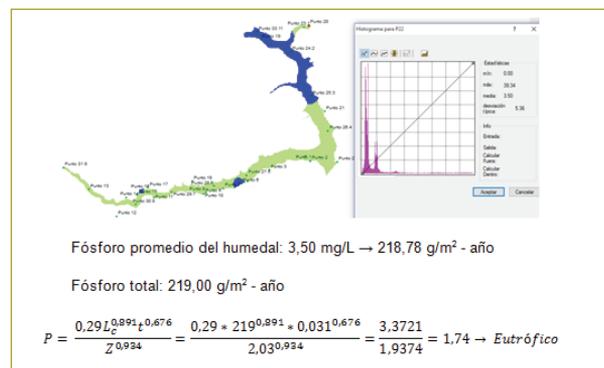
Como la carga anual sobre el lago es mayor que la admisible para lagos templados y cálidos tropicales, se deduce que es eutrófico.

Distancia inversa ponderada (IDW). Conforme al análisis estadístico obtenido de la interpolación generado mediante el *software* ArcGis, y al planteamiento establecido por Vollenweider según la ecuación 3, se establece que la ciénaga presenta un grafo eutrófico.

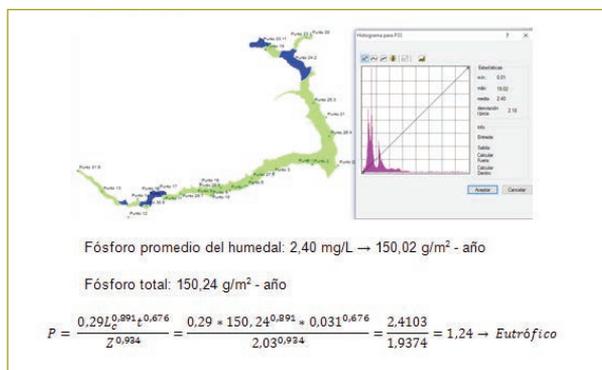
- Campaña 1



- Campaña 2



- Campaña 3



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. El humedal Gualí - Tres Esquinas es un cuerpo hídrico regulado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), mediante la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones de La Ramada, el cual es operado y mantenido para prestar los servicios de riego, drenaje, control de inundaciones a los municipios de Funza y Mosquera, y para la preservación y conservación de la flora y fauna que alberga. Este cuerpo de aguas es receptor de diversos tipos de aves migratorias y hogar de especies en peligro de extinción, así como de diferentes anfibios y reptiles.
2. Este cuerpo de agua se encuentra seriamente afectado por el desarrollo urbano que han sufrido los municipios de Funza y Mosquera, con los cuales limita, viéndose afectada su recarga hídrica natural y convirtiéndose en el receptor de escombros y basuras. Durante el estudio de campo se identificaron cuatro puntos de descarga directa de aguas residuales y once de aguas lluvias, que inciden directamente en la calidad del recurso hídrico.
3. Las aguas del humedal presentan valores de concentración de fósforo entre 2,40 y 3,01 mg/L, en promedio.
4. Con base en la metodología propuesta por Vollenweider, se concluye que el humedal se encuentra en un estado eutrófico, generado por el enriquecimiento de nutrientes como el fósforo, lo cual produce una alta proliferación de plantas acuáticas, las que aumentan la turbidez del agua, aportan nutrientes en su ciclo natural de vida y disminuyen la cantidad de

oxígeno disuelto, poniendo en riesgo la flora y la fauna que lo habitan.

5. Aplicando la metodología de Karydis (índice de eutrofización por nutrientes) se pudo establecer que los puntos de descarga de aguas residuales, así como la recarga efectuada a través del sistema hidráulico La Ramada, generan una alta incidencia en el nivel de eutrofización del humedal, produciendo zonas eutróficas en las áreas cercanas y de influencia de dichos puntos y zonas mesotróficas en el resto del cuerpo lagunar.
6. Según el análisis estadístico, al aplicar la interpolación IDW a las campañas de muestreo de fósforo se estableció que las aguas presentan niveles de concentración de fósforo entre 2,04 y 3,5 mg/L, que al aplicarse en el modelo de Vollenweider generan condición eutrófica.
7. Con base en los resultados del estudio, se puede afirmar que el humedal Gualí - Tres Esquinas presenta una condición eutrófica.

Recomendaciones

1. Como medida de control se propone eliminar las descargas directas de aguas residuales provenientes de los municipios de Funza y Mosquera, así como ejercer un estricto control en las descargas que se originan en las plantas de tratamiento de aguas residuales del parque industrial San Carlos y del municipio de Funza. Esta labor la debe ejercer la Dirección Regional Sabana de Occidente de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, haciendo seguimiento a los planes de saneamiento y manejo de vertimientos (PSMV).
2. Dado que el humedal es el principal cuerpo hídrico de regulación del sistema hidráulico La Ramada, no es posible eliminar la recarga efectuada por el sistema desde la captación en el río Bogotá, pero sí resulta necesario controlar la carga de nutrientes de las aguas transportadas por dicho afluente. Una posible medida es instalar tanques sedimentadores en el canal Chicú, que dentro de la maniobra de operación se puedan remover mecánicamente.
3. Implementar un plan de manejo que permita la recuperación total del espejo de agua del humedal, retirando la vegetación flotante y generando islas en el interior para albergar y resguardar la fauna

propia y migratoria. Dada la extensión del cuerpo lagunar es necesario usar maquinaria pesada, tipo retroexcavadora anfibia o dragas anfibas de succión multipropósito, para remover el material vegetal y los sedimentos, lo cual ha demostrado ser eficiente para la extracción de material acuático, como sucedió en el caso de la laguna de Fúquene.

4. Efectuar el dragado del humedal para recuperar el vaso, lo cual permite una mejor circulación del agua y aumenta la capacidad de dilución de nutrientes.
5. Paisajísticamente, el humedal ofrece grandes oportunidades de recreación activa y pasiva, como el avistamiento de aves y la práctica de deportes acuáticos no motorizados, para lo cual es necesario generar campañas de concientización con la población circundante, de tal manera que se genere un mayor sentido de pertenencia.

REFERENCIAS

- Betanzos V., Garcés R., A., Delgado M., Y. & Pis R., M.A. (2012). Variación espaciotemporal y grado de eutrofia de sustancias nutrientes en aguas de los golfos de Ana María y Guacanayabo, Cuba. *Rev. Mar. Cost.*, vol. 4, 120, pp. 117--130.
- Biocolombia (2004). Informe final del plan de manejo y propuesta de delimitación de un área natural protegida en el humedal Gualí - Tres Esquinas. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Consorcio CGT (2007). Informe final, contrato CAR N.º 419 de 2005. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- IDW (2016). ArcGis for Desktop. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/idw.htm> el 22 de febrero de 2017.
- Romero, J. (2002). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. (2009). *Calidad del agua* (3ª. ed.). Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, pp. 413-415.
- Tibaquirá, P.M. (2014). *Análisis de la calidad trófica del embalse El Hato* (tesis de maestría). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Villamarín, L. M. (2014). *Análisis de la calidad trófica de la laguna de Fúquene* (tesis de maestría). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.